

TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ



ÇEVRE, İKLİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAĞINDA
E- VERİMLİLİK ÇALIŞMA RAPORU



TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ
"Teknoloji üreten bir Türkiye için"



TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ

TBD Kamu-BİB'28 ve BİMY'32 Bütünleşik Etkinliği

Bilişimin Yeni Sınırları: Standartlar ve Sürdürülebilirlik

ÇEVRE, İKLİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

ODAĞINDA E- VERİMLİLİK

ÇALIŞMA RAPORU



TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ
"Teknoloji üreten bir Türkiye için"

Türkiye Bilişim Derneği

KAMU-BİB'28 BİMY'32 Bütünleşik Etkinliği

Bilişimin Yeni Sınırları: Standartlar ve Sürdürülebilirlik

ÇEVRE, İKLİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAĞINDA E- VERİMLİLİK ÇALIŞMA RAPORU

Yayımcı Adı

TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ

Ceyhun Atuf Kansu Cad., 1246 Sk. No: 4/17 Balgat – ANKARA

Tel: +90 (312) 473 8215 (pbx) Faks: +90 (312) 473 8216

tbd-merkez@tbd.org.tr

Yayın Tarihi

30 Kasım 2025, Ankara

Raporu Hazırlayanlar

TBD Ankara Şubesi

ÇEVRE, İKLİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAĞINDA E- VERİMLİLİK ÇALIŞMA GRUBU

TBD Yayın Numarası: 2025 /

ISBN :

© Bu yayının herhangi bir kısmı veya tamamı Türkiye Bilişim Derneği'nden önceden yazılı ve onaylı izin alınmadan herhangi bir formda veya elektronik, mekanik, fotokopi kayıt veya diğer bir yöntemle tekrar çoğaltılabılır. Kaynak gösterilerek kullanılabilir.



TÜRKİYE BİLİŞİM DERNEĞİ
"Teknoloji üreten bir Türkiye için"

Bilişim Teknik Bilimini Ulusal Bir Kalkınma Aracı Olarak Kullanacağız...

Aydın KÖKSAL, 1968

TBD Kurucusu ve Onursal Başkanı



Çalışma Grubu Katılımcıları

Bu rapor, Türkiye Bilişim Derneği çatısı altında kurulan "ÇEVRE, İKLİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAĞINDA E-VERİMLİLİK ÇALIŞMA GRUBU" tarafından hazırlanmıştır.

- Çalışma Grubu Başkanı** : Özer Vona, Bilgisim Bilişim A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı
- Çalışma Grubu Bşk. Yrd.** : Esra Ocak Tamer, TMF Solutions, Kurucu Ortak
- Çalışma Grubu EYK** : Prof. Dr. Güray Çelik, Uludağ Üniversitesi, Çevre Mühendisi
- Çalışma Grubu EYK** : Berrin Benli , NOVUSENS Akıllı Şehirler Kurucusu (NOVUSENS İnovasyon ve Girişimcilik Enstitüsü), Bağımsız Yönetim Kurulu Üyesi
- Çalışma Grubu Üyeleri** : Dr. Veyssel SELİMOĞLU, T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, İklim Başkanlığı, Teknoloji ve Yeşil Dönüşüm Daire Başkanı
- : Meral Kaya, T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Daire Bşk.
- : Refia Karaca, İDE Danışmanlık, İdari İşler Yöneticisi
- : Fatih ÇİL, Araf Şirketler Grubu, Yönetim Kurulu Bşk.
- : Av. Melike KAYA, Araf Şirketler Grubu, Yönetici Asistanı
- : Serkan Ata, Bilgisim Bilişim Sistemleri, Genel Koordinatör
- : Betül Özbay, Ankara Bilgi Teknolojileri, Çevre Mühendisi
- : Mecit Dericizade, ICC Grup, Genel Müdür
- : Bülent Dericizade, ICC Group, Genel Müdür Yardımcısı
- : İsmail Bahadır, Qbit , Kurucu
- : Gökay Topal , GLOBAL CodeLabs, CEO
- : Dr. Mehmet Nurettin Şimşek, Global CodeLabs, Yazılım Takım Lideri / Mimari
- : Murat KANAT, EÜAŞ, Çevre, Emlak ve Kamulaştırma Dairesi Başkanı
- : Burcu Taşkan Demirkök, Toucan Code, Genel Müdür Yardımcısı
- : İlkem Bahçeci, T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çev.ve Şeh.Uzmanı
- : Doç. Dr. Sırma Oya Tekvar, Ankara Üniversitesi İletişim Fakültesi, Öğretim Üyesi
- : Aynur Türker, T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Bilgisayar Mühendisi
- : Eylül Zehra Akçaoğlu, Ankara Bilgi Teknolojileri, Sosyal Medya Yöneticisi, Grafik Tasarımcısı
- : Ahmet Ferhat Öztan, Kamu Gözetimi Kurumu (KGK), Uzman
- : Nihat T. Kaçar, T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Yaz. Mühendisi
- : Özlem Aras, İtron, Kamu Satış Müdürü (Raportör)



ÖNSÖZ

Dijitalleşmenin hızla arttığı, küresel ölçekte çevre ve iklim krizlerinin gündemin merkezine oturduğu günümüzde, sürdürülebilirlik artık yalnızca bir tercih değil, zorunlu bir dönüşüm alanı haline gelmiştir. Bilgi ve iletişim teknolojileri, bu dönüşümün hem itici gücü hem de sorumluluk alanıdır.

Türkiye Bilişim Derneği olarak hazırlanan bu çalışma raporu, "**Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Odağında E-Verimlilik**" temasıyla; ulusal ve uluslararası düzenlemelerden karbon piyasalarına, yapay zekâ tabanlı çözümlerden dijital ikiz teknolojilerine kadar geniş bir çerçevede analiz ve öneriler sunmaktadır. Rapor, yalnızca mevcut durumu değerlendirmekle kalmayıp, kamu, özel sektör, akademi ve sivil toplumun birlikte geliştirebileceği geleceğe dönük stratejilere de ışık tutmaktadır.

Amacımız; iklim değişikliğiyle mücadelede dijital teknolojilerin etkin kullanımını teşvik etmek, kurumların sürdürülebilirlik yolculuklarını bilimsel, teknik ve stratejik yaklaşımlarla desteklemektir. Bu bağlamda, çalışmamızın ülkemizin **2053 Net Sıfır hedeflerine** ve **yeşil kalkınma vizyonuna** katkı sunacağına inanıyoruz.

Bu raporun hazırlanmasında emeği geçen tüm çalışma grubu üyelerine, katkı sağlayan kurum ve uzmanlara teşekkür eder; raporun, karar vericilerden iş dünyasına, araştırmacılardan gençlere kadar geniş bir paydaş grubuna yol gösterici olmasını temenni ederiz.

Türkiye Bilişim Derneği

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Odağında E-Verimlilik Çalışma Grubu

Kısaltmalar

Karbon ayak izi ve çevre dostu uygulamalarla ilgili sık kullanılan bazı kısaltmalar şunlardır:

Kısaltma Adı	AÇIKLAMA
1D-CNN	1 Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağları - Convolutional Neural Networks
AEC	Alkali Electrolyzer Cell - Alkali Elektroliz Hücresi
ANN	Yapay Sinir Ağları - Artificial Neural Networks
BCC	Bioenergy Carbon Credits – Biyoenenerji Karbon Kredileri
BiLSTM	İki Yönlü LSTM - Bidirectional LSTM - BiLSTM
BMR	Buhar veya Metan Reformasyonu
CAA	Temiz Hava Yasası (ABD) - Clean Air Act
CAPEX	(Capital Expenditure) – Sermaye Harcaması
CBAM	Carbon Border Adjustment Mekanizması * Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage * Karbon yakalama, kullanma, depolama
CDM	Clean Development Mechanism * Temiz Kalkınma Mekanizması
CERs	Certified Emission Reductions * Sertifikalı Azaltma Karbon Kredileri
CFP	Carbon Footprint * Karbon Ayak İzi
CH₄	Metan
CO₂	Karbondioksit
CO₂e	Carbon Dioxide Equivalent * Karbon Eşdeğeri
COP	Taraflar Konferansı (Conference of the Parties - Birleşmiş Milletler İklim Zirvesi)
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation * Uluslararası Havacılık için Karbon Ofsetleme ve Azaltım Sistemi
CRP	Carbon Reduction Program - Karbon Azaltım Programı
DAC	Direct Air Capture * Karbon Yakalama Karbon Kredileri
DASHBOARD	Gösterge Panelleri
DEA	Veri Zarflama Analizi - Data Envelopment Analysis)
EA	European Accreditation * Avrupa Akreditasyon Birliği
EECC	Energy Efficiency Carbon Credits * Enerji Verimliliği Karbon Kredisi
EERE	Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi
EOR	Enhanced Oil Recovery * Geliştirilmiş Petrol Kurtarma (Üretimi)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPIAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş.
EU ETS	European Union Emission Trading System : Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
FCCs	Forest Carbon Credits * Orman Karbon Kredileri
HTFO	Hidrojen ve Yakıt Hücre Teknolojileri Ofisi
HyGATE	Hidrojen İnovasyon ve Teknoloji İnkübatörü
GHG	Greenhouse Gases * Sera Gazları

Kısaltma Adı	AÇIKLAMA
GHGE	Greenhouse Gas Emissions * Sera Gazı Emisyonları
GMM	Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi - Generalized Method Of Moments
GWP	Global Warming Potential * Küresel Isınma Potansiyeli
HFC	Hidroflorokarbonlar
IAF	International Accreditation Forum * Uluslararası Akreditasyon Forumu
IEA	International Energy Agency – Uluslararası Enerji Ajansı
ICAO	International Civil Aviation Organization * Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IFRS	International Financial Reporting Standard * Uluslararası Finansal Raporlama Standartları
ILAC	International Accreditation Cooperation * Uluslararası Laboratuvar Akreditasyonu Birliği
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IPCEI	Important Projects of Common European Interest - Ortak Avrupa Çıkarı Olan Önemli Projeler
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükte İşletme
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment)
LORAWAN	Long Range Wide Area Network – Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı
LSTM	Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory)
MBCC	Marine Biomass Carbon Credits * Deniz Biyokütlesi Karbon Kredileri
MRV	Monitoring (İzleme), Reporting (Raporlama) ve Verification (Doğrulama)
N ₂ O	Azot Oksit
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat * Soda Külü
NaHCO ₃	Sodyum Bikarbonat
NDCs	Nationally Determined Contributions : Ulusal Katkı Beyanları
NF ₃	Azot triflorür
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development – Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
OPEX	Operational Expenditure – İşletme Gideri
PEM	Proton Exchange Membrane - Proton Değişim Membranlı
PLM	Product Life Cycle Management – Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi
PFC	Perflorokarbonlar
PPM	Parts Per Million * Milyondaki parçacık sayısı; bir milyon gaz molekülü içinde kaç tane karbon molekülü olduğunu belirtir
PTF	Piyasa Takas Fiyatı
RECs	Renewable Energy Certificates * Yenilenebilir Enerji Sertifikaları
RFID	Radio Frequency Identification – Radyo Frekansı ile Tanımlama
RNN	Yinelemeli Sinir Ağları - Recurrent Neural Networks
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition – Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
SDG	Sustainable Development Goals – Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SEC	Security and Exchange Commission * Menkul Kıymetler ve Borsa Komisyonu
SF ₆	Kükürt hekzaflorür
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell - Katı Oksit Elektroliz Hücresi
TCFD	Task Force on Climate-Related Financial Disclosures * İklimle İlgili Finansal Açıklama Görev Gücü)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TR-ETS	Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi
TSRS	Türkiye Sustainability Reporting Standard * Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları



Kısaltma Adı	AÇIKLAMA
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change * Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
VAR	Vektör Otoregresyon
VERs	Voluntary Emission Reductions * Gönüllü Emisyon Azaltım Karbon Kredileri
WRI	World Resources Institute * Dünya Kaynakları Enstitüsü
WTO	World Trade Organization * Dünya Ticaret Örgütü
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi



İÇİNDEKİLER

1. İklim Kanunu ve Regülasyonlar Bağlamında Uyum – Yönetici Özeti.....	38
1.1 İklim Kanunu’nun Kapsamı Ve Bağlayıcı Yönleri	38
1.1.1 Kanunun Yasal Dayanağı Ve Mevzuat İçindeki Konumu	38
1.1.2 Amaç, Kapsam Ve Temel İlkeler.....	39
1.1.3 Kanunun Hedeflediği Yapısal Dönüşüm	39
1.1.4 İklim Değişikliğiyle Mücadelede Benimsediği İlkeler	40
1.1.5 Kurumsal Yapılanma Ve Görev Paylaşımı.....	40
1.1.6 İdareler Arası Yetki Dağılımı ve Koordinasyon Mekanizmaları	40
1.1.7 Emisyon Azaltımı Ve Sektörel Sorumluluklar.....	43
1.1.8 Sektörel Yükümlülükler ve Ulusal Sera Gazı Azaltım Hedefleriyle İlişkisi.....	43
1.1.9 Uygulama Araçları Ve Denetim Mekanizmaları	43
1.1.9.1 Planlama ve Uygulama	44
1.1.9.2 Denetim, Uyum ve Yaptırım Mekanizmaları	44
1.1.10 Kanun’un İş Dünyası Ve Yatırım Ortamına Etkileri.....	45
1.1.10.1 Kanunda Yer Alan Yükümlülüklerin İş Dünyasına Etkisi	45
1.1.10.2 Kanunun Ruhu Çerçevesinde Öngörülen Etkiler ve Fırsatlar	45
1.2 Ulusal Katkı Beyanı, ETS Ve CBAM İle Uyum Süreçleri	46
1.2.1 Ab Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM).....	46
1.2.2 Temel Unsurlar ve Etkileri.....	47
1.2.3 Sektörel yükümlülükler	48
1.2.4 Türkiye’nin Ets Ve Cbam İle Uyum Stratejisi	48
1.2.5 Ulusal Katkı Beyanı Ve Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Taahhüdü	49
1.2.6 Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (Tr-Ets)	50
1.2.7 ETS'nin hukuki dayanakları (İklim Kanunu ve Yönetmelik Taslağı)	51
1.2.8 ETS Uygulama Sistemi.....	52
1.2.8.1 Tahsisat Sistemi ve Piyasa Mekanizması	52
1.2.8.2 İzleme, Raporlama ve Doğrulama (MRV) Sistemi.....	53
1.2.8.3 Kurumsal Yapı ve Yönetişim	54
1.2.8.4 Piyasa İstikrar Mekanizmaları	55
1.2.8.5 Uygulama ve Denetim Mekanizmaları	55
1.2.8.6 Uluslararası Piyasalarla Entegrasyon	56
1.2.8.7 Gönüllü Karbon Piyasaları ve Kredilendirme Sistemi.....	56

1.2.9	İş Dünyası Açısından Riskler Ve Fırsatlar	57
KAPANIŞ		58
1.3	Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (KGK) ve Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS)	58
1.3.1	Giriş:	58
1.3.2	Kamu Gözetimi Kurumu ve Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarının (TSRS) Oluşum Süreci: 59	
1.3.3	TSRS 1 ve TSRS 2:	60
1.3.3.1	TSRS 1 Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler:	61
1.3.3.2	TSRS 2 İklmle İlgili Açıklamalar	64
1.3.4	TSRS Uygulama Kapsamı	67
1.3.5	Sonuç: TSRS'ler ve Beklenen Etkiler:	69
REFERANSLAR:		71
1.4	MRV Altyapısı: İzleme, Raporlama, Doğrulama Sistemleri	72
1.4.1	MRV Sistemlerinin Teorik Temelleri	72
1.4.2	MRV Kavramının Tanımı Ve Bileşenleri	72
1.4.3	Yasal ve Politik Bağlamda MRV'nin Rolü	73
1.4.4	Mevcut Uygulamalar ve Örnekler	73
1.4.5	Avrupa Birliği'ndeki MRV Uygulamaları	73
1.4.6	Türkiye'de MRV Uygulamaları	74
1.4.7	Diğer Ülke Örnekleri	74
1.4.8	MRV Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar	75
1.4.8.1	Teknik Zorluklar	75
1.4.8.2	Kurumsal ve Yönetişim Zorlukları	75
1.4.8.3	Finansal Zorluklar	76
1.4.9	Geleceğe Yönelik Stratejiler	76
1.4.10	Dijitalleşme ve İnovasyon	76
1.4.11	Kapasite Geliştirme	76
1.4.12	Uluslararası İşbirliği	76
1.4.13	Finansal Sürdürülebilirlik	77
1.4.14	Politik ve Hukuki Çerçevenin Güçlendirilmesi	77
KAYNAKÇA		77
2.	Esg & Dijital Dönüşüm Entegrasyonu	79

2.1	ESG ve Dijital Dönüşüm Kavramlarının Kesişimi	79
2.1.1	Neden ESG × Dijital Dönüşüm?	79
2.1.1.1	ESG, Dijital Dönüşüm ve Yeşil İnovasyonun Rolü	79
2.1.1.2	Türkiye Bağlamı: 2053 Net Sıfır Hedefi ve Yeşil Mutabakat	80
2.1.2	Enerji/Kamu Hizmetlerinde Dijitalleşmenin Performansa Etkisi	80
2.1.3	Dijital Dönüşüm, Kazanç Yönetimi ve ESG	81
2.1.4	Dijital Dönüşüm ve Yeşil İnovasyon Kalitesi	81
2.1.5	Devlet Mülkiyetindeki İşletmelerde ESG'ye Etkiler	81
2.1.6	Türkiye Perspektifi	82
2.1.7	Sonuç	82
2.1.8	Ortak Bulgular ve Eleştirel Değerlendirme	84
2.1.9	Uygulama Yol Haritası (Öneri)	84
2.1.10	ESG Performansının Dijital Araçlarla Takibi:	84
2.1.11	Giriş	84
2.1.12	Finansal Performans Ölçütleri ve ESG İlişkisi	85
2.1.13	ESG'nin kurumsal Sorumluluk ile İlişkisi	85
2.1.14	ESG Raporlarının Dinamik Analizi	86
2.1.15	Dijitalleşme ve ESG Performansı	86
2.1.16	Eleştirel Sentez	86
2.1.17	Gelecek Araştırmalar için Öneriler	87
2.1.18	Veri Odaklı ESG Uygulamaları: Örnek Yazılımlar ve Platformlar	87
2.1.18.1	Giriş	87
2.1.18.2	ESG Stratejileri ve Finansal Performans	87
2.1.18.3	Finansal Kurumlarda ESG Verilerinin Yönetimi ve Yapay Zekâ	89
2.1.18.4	ESG Derecelendirme	89
2.1.18.5	Genel Değerlendirme	90
2.1.18.6	Sonuç ve Gelecek Araştırmalar için Öneriler	90
2.1.19	Dijital ESG Raporlama ve Yapay Zekâ Destekli Analitik	91
2.1.19.1	Giriş	91
2.1.19.2	Yapay Zekâ Destekli Eğitim ve Sürdürülebilirlik Boyutu	91
2.1.19.3	ESG Raporlarının Dinamik Analizi ve Homojenleşme Eğilimi	92
2.1.19.4	Finans Sektöründe Yapay Zekâ ve ESG Entegrasyonu	92
2.1.19.5	Yapay Zekâ ve Sürdürülebilir Kalkınma	92

2.1.19.6	Eleştirel Sentez	93
2.1.19.7	Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler	93
2.1.19.8	Sonuç	93
2.1.20	Dijital Dönüşümün Kurumsal Sürdürülebilirlik Hedeflerine Etkisi	94
2.1.20.1	Giriş	94
2.1.20.2	Dijitalleşme ve Yeşil İnovasyon Kalitesi	94
2.1.20.3	Dijital Platformlar ve Kurumsal Sosyal Sorumluluk	94
2.1.20.4	Hizmet Odaklı Dönüşüm ve Döngüsel Ekonomi	94
2.1.20.5	Eleştirel Sentez	95
2.1.20.6	Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler	95
2.1.20.7	Sonuç	95
2.1.21	ESG Risklerinin Dijital Olarak İzlenmesi ve Yönetilmesi	96
2.1.21.1	Giriş	96
2.1.21.2	Dijitalleşme, Paydaşlar ve ESG Performansı	96
2.1.21.3	Yapay Zekâ ve Finansal Kurumlarda ESG Yönetimi	96
2.1.21.4	Dijital Platformlar ve Kurumsal Sorumluluk Uygulamaları	97
2.1.21.5	Eleştirel Sentez	97
2.1.21.6	Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler	97
2.1.21.7	Sonuç	98
2.1.22	Politika Önerileri: ESG ve Dijitalleşmenin Entegre Edilmesi	98
2.1.22.1	Dijital Vatandaşlık ve Eğitim Boyutu	98
2.1.22.2	Dijitalleşmenin Sürdürülebilir Kalkınma Üzerindeki Etkileri	98
2.1.22.3	Yeşil Bilgi Teknolojileri ve Dijital Yönetişim	99
2.1.22.4	Yeşil İnovasyonun Rolü ve ESG-Dijitalleşme Sinerjisi	99
2.1.22.5	Politika Boyutunda Çapraz Sonuçlar	99
2.1.22.6	Sonuç ve Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler	99
2.2	Yönetim Kurullarında Dijital Sürdürülebilirlik Yetkinliği	100
2.2.1	Yönetim Kurullarının Dijital Okuryazarlık Düzeyi	100
2.2.1.1	Yaşlı Bireylerde Dijital Okuryazarlık	100
2.2.1.2	Yönetim Kurullarının Dijital Teknolojilerle İlgili Sorumlulukları	100
2.2.1.3	Pandemi Sürecinde Dijital Yeterliliklerin Evrimi	101
2.2.1.4	Türkiye’de Pandemi Sürecinde Dijital Yeterliliklerin Gelişimi	102
2.2.1.5	Yükseköğretimde Dijital Liderliğin Önemi	102

2.2.1.6	Sonuç ve Genel Değerlendirme	103
2.2.2	Dijital Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yönetimsel Yansımaları	103
2.2.2.1	Dijital Sağlık Perspektifi	103
2.2.2.2	Türkiye’de Dijital Sağlık Uygulamaları	103
2.2.2.3	Dijital Sağlıkta Karşılaşılan Zorluklar	104
2.2.2.4	Sürdürülebilirlik Perspektifi.....	104
2.2.2.5	Dijital Dönüşüm, Akıllı Sistemler ve Sürdürülebilir Tedarik Zinciri.....	104
2.2.2.6	Döngüsel Ekonomi ve Net-Sıfır Hedefleri	105
2.2.2.7	Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Hedefleri Bağlamında Döngüsel Ekonomi	105
2.2.2.8	Eleştirel Değerlendirme.....	106
2.2.2.9	Yeşil İnovasyon ve Dijital Dönüşüm.....	106
2.2.2.10	Dijital Hizmet Odaklı Dönüşüm	106
2.2.2.11	Sonuç ve Yönetimsel Yansımalar	107
2.2.3	Karar Alma Süreçlerinde Veri ve Teknolojinin Rolü.....	107
2.2.3.1	Veri Bilimi ve Dijital Pazarlama	107
2.2.3.2	Derin Öğrenme ile Artırılmış Karar Alma	107
2.2.3.3	Büyük Veri Analitiği Yetkinlikleri	108
2.2.3.4	Karar Destek Sistemleri (DSS) ve Veri Analitiği	108
2.2.3.5	Finansal Teknolojilerde Büyük Veri	108
2.2.3.6	Sonuç ve Yönetimsel Yansımalar	108
2.2.4	Yönetim Kurulu Üyeleri için ESG & Dijitalleşme Eğitim Modülleri	109
2.2.4.1	Çevresel Yönelim ve Karbon Stratejisi	109
2.2.4.2	Kurumsal Sosyal Sorumluluk, Yönetişim ve Yönetim Kurulu Çeşitliliği	110
2.2.4.3	Dijitalleşme ve Yönetim Kurullarında Yeni Yetkinlikler.....	110
2.2.4.4	Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Hedefleri ile Uyumlu Eğitim İçerikleri	110
2.2.4.5	Sonuç ve Yönetimsel Yansımalar	111
2.2.5	Liderlik ve Dijital Dönüşüm: Sorumluluklar ve Etkiler	111
2.2.5.1	Yükseköğretimde Dijital Liderlik	112
2.2.5.2	Dijital Liderlik ve Stratejik Değişim	112
2.2.5.3	Çalışanların Yenilikçi Davranışlarını Teşvik Etmek	112
2.2.5.4	Sonuç ve Yönetimsel Yansımalar	112
2.2.6	En İyi Uygulamalar: AB ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü’den Örnekler	113
2.2.6.1	AB’de Önleyici Hizmetlerin Mevcut Durumu	113

2.2.6.2	Çerçeve Direktifi ve Yavaş İlerleme	114
2.2.6.3	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü Perspektifi ve Uygulama Sorunları	114
2.2.6.4	Piyasa Mekanizmalarının Sınırları	115
2.2.6.5	Sonuç ve Değerlendirme.....	115
2.2.7	Kurumsal Yönetişimde Dijital Yetkinlik Ölçütleri.....	115
2.2.7.1	Siber Güvenlik ve Dijital Risklerin Yönetişime Etkisi	116
2.2.7.2	Dijital Ekonomi ve Kurumsal Yönetişim	116
2.2.7.3	Eğitimde Dijital Yetkinlik Çerçeveleri	117
2.2.7.4	Dijital Liderlik ve Kurumsal Dönüşüm	118
2.2.7.5	Kurumsal Teoriler ve Dijital Yetkinlikler	118
2.2.7.6	Sonuç.....	118
2.3	Karbon Veri Yönetimi ve Raporlama Altyapısı	119
2.3.1	Veri toplama yöntemleri (ölçüm, beyan, otomasyon vb.)	119
2.3.2	Kapsam 3 Verilerine Ulaşmada Zorluklar	122
2.3.3	Emisyon Faktörünü Belirleme.....	125
2.3.4	Belirsizlik Analizi	127
2.3.5	Önemlilik Analizi.....	127
2.3.6	Raporlama Altyapısı	128
2.3.7	GHG Protokolü	129
2.3.8	TS EN ISO 14064-1 Standardı.....	131
	Referanslar.....	133
2.4	Yeşille Aklama (Greenwashing)	134
2.4.1	Giriş	134
2.4.2	Yeşille Aklama Kavramının Teorik Temelleri.....	135
2.4.2.1	Kavramsal Çerçeve ve Tanımlar	135
2.4.2.2	Yeşille Aklamanın Nedenleri	136
2.4.2.3	Meşruiyet Arayışı ve Kurumsal Baskılar.....	137
2.4.2.4	Rekabet Avantajı ve İmaj Yönetimi.....	137
2.4.2.5	Düzenleyici Belirsizlik ve Denetim Zafiyetleri	137
2.4.2.6	Finansal Teşvikler ve Politika Yan Etkileri.....	137
2.4.2.7	Bilgi Asimetrisi ve Piyasa Dinamikleri	137
2.4.2.8	İçsel Kapasite Eksiklikleri	138
2.4.3	Tarihsel Arka Plan ve Kavramın Evrimi.....	140

2.4.3.1	Teorik Yaklaşımlar	142
2.4.3.2	Meşruiyet Teorisi	142
2.4.3.3	Paydaş Teorisi	142
2.4.3.4	Sinyal Teorisi	142
2.4.3.5	Evrimsel Oyun Teorisi	143
2.4.4	Yeşille Aklamanın Tonları: Türler, Taktikler ve Uygulamalar	144
2.4.4.1	Yeşille Aklama Tipleri	145
2.4.4.2	İletişim Tabanlı Yeşille Aklama	145
2.4.4.3	Ürün ve Hizmet Düzeyinde Yeşille Aklama	146
2.4.4.4	Kurumsal Düzeyde Stratejik Yeşille Aklama	146
2.4.4.5	Dijital Yeşille Aklama (Yeni Eğilim)	146
2.4.4.6	Yeşille Aklama Sözlüğü	150
2.4.5	Görsel ve Söylemsel Manipülasyon Yoluyla Yeşille Aklama	152
2.4.6	Belirsiz ve Doğrulanamaz İddialar Yoluyla Yeşille Aklama	152
2.4.7	Stratejik Odak Saptırma ve Sembolik Eylemler Yoluyla Yeşille Aklama	153
2.4.8	Yetersiz Eylem ve Etkisiz Politikalar Yoluyla Yeşille Aklama	153
2.4.9	Sektörel Örnekler (enerji, tekstil, finans vb.)	154
2.4.10	Yeşille Aklama Karşısında Mevzuat ve Düzenleyici Çerçeve	155
2.4.10.1	Avrupa Birliği'nde Yeşille Aklamanın Önlenmesine Yönelik Mevzuat	155
2.4.10.2	Uluslararası Standartlar ve Kurumsal Çerçeveler	157
2.4.10.3	Türkiye'de Mevzuat Gelişmeleri	158
2.4.10.4	Düzenleyici Gelişmelerin Yetersizlikleri ve Riskler	160
2.4.10.5	Referanslar	162
2.5	E-Verimlilik Odaklı Sürdürülebilirlik Stratejileri	165
2.5.1	E-Verimlilik Nedir? Kavramsal Çerçeve ve Tanımlar	165
2.5.1.1	Dijital Verimlilik ve Güvenin Stratejik Önemi	165
2.5.1.2	Türkiye'de E-Verimlilik ve Enerji Politikalarıyla Bağlantısı	165
2.5.1.3	Çevrimiçi Güvenin Çok Boyutlu Dinamikleri	166
2.5.1.4	Sonuç ve Gelecek Perspektifleri	166
2.5.2	Enerji Yönetimi, Dijitalleşme ve Karbon Azaltım Stratejileri	166
2.5.2.1	Dijital Dönüşüm ve Karbon Nötrlüğü	166
2.5.2.2	Döngüsel Ekonomi ve Dijital Teknolojiler	167
2.5.2.3	Akıllı Enerji Yönetimi ve Davranışsal Boyut	167

2.5.2.4	Dijital Ekonomi ve Bölgesel Karbon Azaltımı	168
2.5.2.5	Sonuç ve Değerlendirme.....	168
2.5.3	Endüstriyel Sektörlerde E-Verimlilik Uygulamaları.....	169
2.5.3.1	Üretim ve Bakımın Entegrasyonu	169
2.5.3.2	Yöntemsel Çeşitlilik ve Gelişim	169
2.5.3.3	Önleyici ve Kestirimci Bakımın Rolü	170
2.5.3.4	Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Yönelimler	170
2.5.3.5	Sonuç.....	170
2.5.4	Karbon Ayak İzi İzleme Sistemleri ve Dijital Yaklaşımlar	170
2.5.4.1	Düşük Maliyetli Sensör Teknolojileri ve Madencilik Uygulamaları	171
2.5.4.2	Kontrollü Çevre Tarımı ve Dijital Yaklaşımlar.....	171
2.5.4.3	Akıllı Binalar, Pasif Kızılötesi Sensörler ve Makine Öğrenimi	172
2.5.4.4	Genel Değerlendirme ve Gelecek Araştırma Alanları.....	172
2.5.5	Yapay Zekâ ile Süreç Optimizasyonu: E-Verimliliğe Katkıları	172
2.5.5.1	Mobil Enerji Verimliliği ve Yapay Zekâ	172
2.5.5.2	Üretim Alanında Yapay Zekâ ve Toplumsal Etkiler	173
2.5.5.3	Operasyon Araştırmaları ve Yapay Zekâ	173
2.5.5.4	Bilimsel İletişim, Veri Analizi ve Yapay Zekâ.....	174
2.5.5.5	Sürdürülebilir Kalkınma, Enerji Verimliliği ve Yapay Zekâ.....	174
2.5.5.6	Genel Değerlendirme	174
2.5.6	E-Verimliliğin Ekonomik, Çevresel ve Sosyal Katkıları	175
2.5.6.1	Avrupa Birliği Deneyimi ve Çevresel Verimlilik	175
2.5.6.2	Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi	175
2.5.6.3	Türkiye Bağlamında E-Verimlilik.....	176
2.5.6.4	Sonuç.....	176
2.5.7	Politika ve Teşvik Araçları: E-Verimlilik Odaklı Düzenlemeler	176
2.5.7.1	Dijital Ekonomi ve E-Verimlilik İlişkisi	176
2.5.7.2	Yaratıcı Endüstriler ve Dijital İnovasyon Politikaları.....	177
2.5.7.3	Eğitim, Araştırma ve Geliştirme ile Ekonomik Verimlilik	177
2.5.7.4	Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Araştırmalar.....	177
2.5.7.5	Türkiye Bağlamında E-Verimlilik ve Politika Araçları	178
2.5.7.6	Sonuç.....	178
3.	Yaşam Döngüsü Yaklaşımıyla Karbon Ayak İzinin Azaltımı.....	179

3.1	Ürün Ve Hizmetlerin Yaşam Döngüsünde E-Verimlilik Etkisi Ve Sektörel Yaşam Döngüsü Analizi , ..	179
3.1.1	Ürün Geliştirme Süreçleri	180
3.1.2	Yaşam Döngüsü Analizinin Temiz Üretim-Hizmet İle İlişkisi	181
3.1.3	Yaşam Döngüsü Analizinin Sanayideki Yeri	181
3.1.4	Türkiye'deki Ar-Ge, Ür-Ge Çalışmaları Ve Plm Kullanımı, İhtiyaç Durumu	182
3.1.5	Plm Olmaksızın Yapılanlar: Artılar-Eksiler Plm'nin Yararları:	182
3.1.6	Ürün Ve Hizmetlerin Yda (Yaşam Döngüsü Analizi) Yapılması Ve E-Verimlilik	184
3.2	Tüketim, Üretim, Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyon	185
3.2.1	Dijital Optimizasyonun Temelleri	185
3.2.2	Dijital Optimizasyonun Temel Unsurları	186
3.2.3	Tüketim Süreçlerinde Dijital Optimizasyon	188
3.2.3.1	Tüketim Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri	189
3.2.3.2	Teknolojik Altyapılar	189
3.2.4	Üretim Süreçlerinde Dijital Optimizasyon	191
3.2.4.1	Üretim Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Amaçları	192
3.2.4.2	Dijital Optimizasyon Araçları	192
3.2.4.3	Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri	194
3.2.4.4	Dijital Optimizasyon Araçları	194
3.2.5	Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyon	196
3.2.5.1	Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri	196
3.2.5.2	Dijital Optimizasyon Araçları	197
3.2.6	Gelecek Trendleri	199
3.2.6.1	Enerji Sektöründe Gelecek Trendleri	199
3.2.6.2	Akıllı Şebekeler ve Dağıtık Enerji Kaynakları	199
3.2.6.3	Enerji Depolama ve Dijital Optimizasyon	200
3.2.6.3.4	Yapay Zekâ ile Enerji Talep Tahmini	200
3.2.6.3.5	Sanayi ve Üretim Sektöründe Gelecek Trendleri	200
3.2.6.3.6	Dijital İkizlerin Yaygınlaşması	200
3.2.6.3.7	Yapay Zekâ Destekli Üretim Planlama	200
3.2.6.3.8	Karbonsuz Üretim Hedefleri	201
3.2.6.4	Tarım ve Gıda Sektöründe Gelecek Trendleri	201
3.2.6.4.4	Hassas Tarım (Precision Agriculture)	201
3.2.6.5	Gıda Tedarik Zinciri ve Dijital İzlenebilirlik	201

3.2.6.5.4	Gıda Atıklarının Dijital Yönetimi	202
3.2.6.6	Ulaşım ve Lojistikte Gelecek Trendleri.....	202
3.2.6.6.4	Otonom ve Elektrikli Araçlar	202
3.2.6.7	Akıllı Lojistik Ağları.....	203
3.2.6.8	Blokzincir ile Şeffaf Tedarik Zinciri	203
3.2.6.9	Bina ve Şehir Yönetiminde Gelecek Trendleri.....	204
3.2.6.9.4	Akıllı Şehirler ve Dijital Altyapı	204
3.2.6.9.5	IoT Tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri	204
3.2.6.9.6	Atık Su Yönetimi	204
3.2.6.10	Atık ve Döngüsel Ekonomi Perspektifi.....	205
3.2.6.10.4	Yapay Zekâ Tabanlı Atık Ayrıştırma	205
3.2.6.10.5	Blokzincir ile Atık ve Karbon İzlenebilirliği	205
3.2.6.10.6	Döngüsel Ekonomi 5.0	205
3.2.6.11	Politika ve Eğitim Boyutu.....	206
3.2.6.11.4	Küresel Politikalar	206
3.2.6.11.5	Eğitim ve İnsan Kaynağı.....	206
İklim, Çevre Ve Sürdürülebilirlik Odağında E-Verimlilik.....		208
4.	E-Verimlilik Ve Akıllı Enerji Sistemleri	208
4.1	Akıllı Enerji Yönetimi Ve İot Destekli İzleme Sistemleri	208
Akıllı Enerji Yönetim Sistemlerinin Temelleri.....		208
4.1.1	Tanım ve Temel Prensipler	208
4.1.1.1	Akıllı Enerji Yönetimi Nedir?.....	208
4.1.1.2	Neden Akıllı Enerji Yönetimi?	208
4.1.2	Akıllı Enerji Yönetiminin Temel Prensipleri	209
A.	Veriye Dayalı Karar Alma	209
B.	Gerçek Zamanlı İzleme ve Hızlı Tepki	209
C.	Otomasyon ve Öngörü.....	210
D.	Esneklik ve Uyum Yeteneği	210
E.	Sürdürülebilirlik Odaklılık	210
F.	Kullanıcı Dostu ve Erişilebilirlik.....	210
4.1.3	Akıllı Enerji Yönetimi.....	210
4.1.3.1	Sadece Teknoloji Değil, Bir Dönüşüm	210
4.1.3.2	Neden Bu Prensipler Önemli?.....	210

4.1.4	Geleneksel enerji yönetimi ile dijital çözümler arasındaki farklar	211
A.	Veri Yönetimi: Dönemsel Ölçümlerden Gerçek Zamanlı İzlemeye	211
B.	Müdahale Yeteneği: Reaktif Yaklaşımdan Proaktif Yönetim	211
C.	Karar Alma: Deneyime Dayalı Yaklaşımdan Veriye Dayalı Stratejiye	211
D.	Esneklik: Statik Sistemlerden Uyarlanabilir Altyapılara	212
E.	Kullanıcı Deneyimi: Karmaşık Raporlardan Etkileşimli Panellere	212
4.1.4.1	Dönüşümün Katma Değeri	212
4.1.5	Enerji 4.0 Ve Endüstriyel Dönüşüm	213
4.1.5.1	Sanayi Devrimleri ve Enerjinin Evrimi	213
4.1.5.2	Enerji 4.0 Nedir?	214
4.1.5.3	Endüstriyel Dönüşüm	214
4.1.5.4	Enerji 4.0'ın Faydaları	215
Geleceğe Açılan Kapı		215
4.1.6	Sistem Mimarisi ve Bileşenleri	216
4.1.6.1	Donanım Altyapısı: Sensörler, Akıllı Sayaçlar, Veri Toplama Üniteleri	216
4.1.6.2	Yazılım Platformları ve Veri İşleme Sistemleri	217
4.1.6.3	Bulut Tabanlı ve Yerel (On-Premise) Çözüm Alternatifleri	218
4.1.7	IoT Destekli İzleme ve Kontrol Sistemleri	220
4.1.7.1	Sensör Teknolojileri: Sistemin Gözleri	220
4.1.7.2	Veri Toplama: Ham Veriden Anlamlı Bilgiye	221
4.1.7.3	Kablosuz İletişim Protokolleri: Verinin Yolculuğu	221
4.1.8	Gerçek Zamanlı İzleme ve Analiz	223
4.1.8.1	Anlık Enerji Tüketimi Takibi ve Görselleştirme	225
4.1.8.2	Otomatik Uyarı ve Müdahale Sistemleri	226
4.1.8.3	Uzaktan Erişim ve Kontrol İmkanları	226
4.1.8.4	Karar Destek Sistemleri: Veriden Stratejiye	228
4.1.9	Türkiye'deki Uygulama Örnekleri	229
4.1.9.1	Belediyelerimizin Başarılı örnekleri;	232
4.1.9.2	Dünya Örnekleri ve En İyi Uygulamalar	236
4.1.10	Avrupa'daki Akıllı Şebeke Projeleri	236
4.1.10.1	Amerika ve Asya-Pasifik Bölgesi Örnekleri	238
4.1.11	Maliyet-Fayda Analizi ve ROI Hesaplamaları	241
4.1.11.1	Akıllı Enerji Yönetimi ve e-Verimlilikte Yatırımın Değerlendirilmesi	241

4.1.11.2	Maliyet-Fayda Analizi Nedir?	241
c)	Yatırım Değişimi ve Geri Dönüş Süreleri	242
4.1.11.3	Enerji Tasarrufu Potansiyeli ve Maliyet Azaltımı	243
4.1.11.4	Operasyonel Verimlilik Kazanımları	244
4.1.11.5	ROI Hesaplama Örneği.....	244
4.1.11.6	Kurumsal Kaynaklarla Destek	245
4.1.11.7	Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi	248
4.1.12	Dijital Dönüşümle Zaman, İnsan, Malzeme ve Süreçlerde Yeni Bir Verimlilik Anlayışı	248
4.1.13	Zaman Verimliliği: Daha Az Bekleme, Daha Çok Üretim	249
4.1.14	İnsan Verimliliği: İnsan Kaynağını Stratejik Alanlara Yönlendirme	250
4.1.15	Kağıt ve Malzeme Verimliliği: Dijitalleşmenin Sürdürülebilir Etkisi.....	251
4.1.16	Ekipman Verimliliği: Daha Uzun Ömür, Daha Az Arıza	252
4.1.17	Dijital Süreç Yönetimi: Karmaşıklık Azaltan Çerçeve.....	253
4.1.18	Türkiye’den Çeşitli Örnekler.....	254
4.2	Dijital İkizler İle Enerji Modelleme Ve Simülasyon Uygulamaları.....	254
4.2.1	Dijital İkiz Kavramı ve Çalışma Prensipleri	256
4.2.1.1	Fiziksel-Dijital Entegrasyon Süreçleri	256
4.2.1.2	Veri Akışı ve Gerçek Zamanlı Senkronizasyon	257
4.2.2	Teknolojik Altyapı Gereksinimleri	261
4.2.2.1	3D Modelleme ve Simülasyon Araçları.....	261
4.2.2.2	IoT Sensörlü Ağlar ve Veri Toplama Sistemleri.....	262
4.2.2.3	Bulut Bilişim ve Uç (Edge) Bilişim Çözümleri	263
4.2.2.4	Dünya’dan Farklı Uygulama Örnekleri.....	264
4.2.2.5	Gelecek Perspektifi	265
4.2.3	Enerji Sistemlerinde Dijital İkiz Uygulamaları	266
4.2.3.1	Termik ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Dijital Modellenme	266
4.2.3.2	Türbin Performansı ve Verimlilik Optimizasyonu.....	267
4.2.3.3	Tahmine Dayalı Bakım Sistemleri	267
4.2.3.4	Dünya Geneline Dijital İkizlerin Güç Santrallerindeki Uygulama Örnekleri	268
4.2.3.5	Elektrik Şebekeleri ve Dağıtım Ağları	269
4.2.4	Bina ve Tesis Enerji Modellemesi	273
4.2.4.1	Akıllı Bina Dijital İkizleri ve Enerji Verimliliği.....	273
1.	Akıllı Bina Dijital İkizlerinin Temel İşlevleri	273

2. HVAC Sistem Programı ve Enerji Verimliliği	274
3. Aydınlatma ve Çevre Kontrol Sistemleri	274
4. Kullanıcı Konfor Analizi ve Enerji Tüketiminin Dengelenmesi	275
4.2.4.2 Endüstriyel Tesis Modelleme	276
1. Üretim Süreçleri ve Enerji Tüketimi Analizi	276
2. Ekipman Performansı ve Yaşam Döngüsü Yönetimi	277
3. Süreç Optimizasyonu ve Verimliliği Artırma Stratejileri	277
4. Örnek Çalışmalar	278
4.2.4.3 Simülasyon ve Optimizasyon Süreçleri	279
1. Senaryo Analizi ve Tahmin Modelleri	279
1.1. "Varsayım(What-if)" Modelleri	279
1.2. Tahmin Modelleri	280
2. Enerji Verimliliği Projeksiyonları	281
3. Yatırım ve Teknoloji Seçeneklerinin Değerlendirilmesi	281
4. Gerçek Zamanlı Optimizasyon	281
4.1. Dinamik Kontrol ve Ayarlama Programları	281
4.2. Makine Öğrenmesi Entegrasyonu	282
4.3. Otomatik Karar Verme Sistemleri	282
4.2.5 Türkiye'deki Dijital İkiz Projeleri ve Uygulamaları	283
4.2.5.1 Endüstriyel Uygulamalar	283
4.2.6 Dünya Çapında En İyi Uygulamalar	284
4.2.6.1 Avrupa Projeleri	284
4.2.7 Asya-Pasifik ve Amerika Örnekleri	285
4.3 Binalarda Ve Kampüslerde Entegre Enerji Verimliliği Uygulamaları	286
4.3.1 Bina Enerji Verimliliği Sistemleri ve Akıllı Teknolojiler	286
1. Temel Yaklaşımlar ve Entegrasyonlar	287
2. Akıllı Bina Teknolojileri: Dijitalleşmenin Bina Enerjisine Katkısı	288
3. Bina Otomasyon Sistemleri (BMS) ve Entegrasyonu	289
4. HVAC Sistemlerinin Optimizasyonu ve Kontrolü	289
5. Akıllı Aydınlatma ve Doğal Işık Kontrolü	290
4.3.2 Gerçek Zamanlı Enerji Tüketimi Takibi	291
4.3.2.1 Enerji Performans Kaybı ve Kıyaslama	292
4.3.2.2 Otomatik Raporlama ve Analiz Sistemleri	293

4.3.3	Kampüs Entegre Enerji Yönetimi: Türkiye'den Örnekler	293
1.	Özyeğin Üniversitesi SCOLA Binası Örneği.....	293
2.	Boğaziçi Üniversitesi LED Teknolojisi Uygulamaları.....	293
3.	Karabük Üniversitesi Enerji Verimliliği Projesi	294
4.3.4	Çoklu Bina Koordinasyonu: Kampüs Çapında Akıllı Yönetim	294
1.	Kampüs Çapında Merkezi Enerji Yönetimi.....	294
2.	Binalar Arası Enerji Paylaşımı ve Optimizasyonu	294
3.	Yük Dağılımı ve Pik Yönetimi	294
4.3.5	Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	295
1.	Güneş Enerjisi Sistemleri: Binaların Üzerindeki Enerji Santralleri	295
2.	Güneş Enerjisi Üretim Tahminleri ve Depolanması.....	296
3.	Şebeke Bağlantılı Sistemler ve Net Ölçümleme.....	296
4.3.6	Hibrit Enerji Sistemleri: Jeotermal ve Rüzgar Entegrasyonu	297
4.3.6.1	Enerji Depolama Çözümleri ve Batarya Yönetimi.....	297
4.3.7	Enerji Verimliliği Teknolojileri.....	299
4.3.7.1	Yapı Fiziği Temelli Çözümler	299
1.	Üst Düzey Isı Yalıtım Teknikleri	299
2.	Akıllı Cam ve Dinamik Pencere Sistemleri	300
3.	Isı Köprüleri ve Önlemleri	301
3.1.	Isı Köprüsü Analizi ve Tespit Yöntemleri	301
3.2.	Isı Köprüsü Önleme Stratejileri.....	301
4.3.8	Mekanik Sistemler	302
1.	Yüksek Verimli Pompa ve Fan Sistemleri	303
1.1.	Pompa ve Fanların Rolü.....	303
1.2.	Yüksek Verimli Sistemlerin Avantajları.....	303
2.	Değişken Devirli Sürücü (VFD) Uygulamaları.....	303
2.1.	Değişken Devirli Sürücü Nedir?.....	303
2.2.	Enerji Tasarruf ve Esneklik.....	303
3.	Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri.....	304
3.1.	Atık Isının Önemi.....	304
3.2.	Çözümler ve Teknolojiler.....	304
4.4	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dijital Yönetimi.....	305
4.4.1	Power-to-X Enerji Çeşitliliği Uygulamaları	306

1.1.	Power-to-Hydrogen (P2H2)	306
1.2.	Power-to-Ammonia (P2NH3)	306
1.3.	Power-to-Gas (P2G)	307
1.4.	Power-to-Liquids (E-fuel)	307
1.	Sanal Güç Santrali (VPP) Teknolojileri ve Uygulamaları	307
4.4.2	Enerji Depolama Teknolojileri	309
1.	Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS)	310
2.	Lityum-ion ve Alternatif Batarya Teknolojileri	310
3.	Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) ve Düzenlenmesi	311
4.	Ölçeklenebilir ve Dağıtık Depolama Çözümleri	312
4.4.3	Mekanik ve Termal Depolama	313
1.	Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PHES)	314
2.	Sıkıştırılmış Hava ve Yeraltı Enerji Depolama (CAES & LAES)	314
3.	Termal Enerji Depolama (TES) Yöntemleri	315
4.	Mekanik ve Termal Depolamanın Dijital Yönetimi	315
4.4.4	Hibrit Enerji Depolama Sistemleri	317
1.	Hibrit Enerji Depolamanın Temel Prensipleri	317
2.	Hibrit Sistem Tipleri	317
3.	Türkiye’de Hibrit Enerji Depolama Yaklaşımları	318
4.	Hibrit Sistemlerin Dijital Yönetimi	318
5.	Gelecek Trendleri	319
4.4.5	Küresel Dijital Enerji Dönüşümü	320
1.	2025 Enerji Teknolojileri Trendleri	320
2.	TOPCon ve Perovskit Güneş Teknolojileri	320
3.	Enerji Depolama Maliyetlerindeki Düşüş Trendleri	321
4.	Küresel Dijital Enerji Ekosisteminde Türkiye’nin Konumu	321
5.	Dijital Enerji Dönüşümünde Gelecek Senaryoları	322
4.5	Hidrojen Enerjisi Sektörel Bilgi Ve Yol Haritası Raporu	323
4.5.1	Yönetici Özeti	323
4.5.2	Yenilenebilir Enerji Kaynakları	323
4.5.2.1	Güneş Enerjisi	323
4.5.2.2	Rüzgar Enerjisi	324
4.5.2.3	Biyokütle Enerjisi	326

4.5.2.4	Tarımsal Biyokütle Kaynaklar.....	326
4.5.2.5	Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen Biyokütle Kaynakları.....	326
4.5.2.6	Hayvansal Biyokütle Kaynakları.....	326
4.5.2.7	Kentsel ve Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Biyokütle Kaynakları.....	326
4.5.3	Jeotermal Enerji.....	327
4.5.4	Hidroelektrik Enerjisi.....	329
4.5.5	Hidrojen.....	330
4.5.5.1	Hidrojen Üretimi.....	332
4.5.5.2	Fosil Kaynaklardan Hidrojen Üretimi.....	333
4.5.5.3	Buhar veya Metan Reformasyonu (BMR).....	333
4.5.5.4	Kısmi Oksidasyon.....	334
4.5.5.5	Piroliz.....	334
4.5.5.6	Gazlaştırma.....	334
4.5.5.7	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi.....	334
4.5.5.8	Biyokütle Enerjisi.....	335
4.5.5.9	Biyolojik Yöntemler.....	335
4.5.5.10	Termokimyasal Yöntemler.....	335
4.5.5.11	Suyun Ayrıştırılması Yöntemleri.....	336
4.5.6	Elektrolizör Teknolojileri.....	338
4.5.7	Hidrojen Üretiminde Yenilikçi Yöntemler.....	339
4.5.7.1	Hidrojen Sülfürün Ayrıştırılarak Hidrojen Üretimi.....	339
4.5.7.2	Nükleer Enerjiden Hidrojen Üretimi.....	340
4.5.7.3	Hidrojen Üretiminde Karbon Emisyonu ve Karbon Yakalama Teknolojileri.....	341
4.5.7.3.4	Karbon Yakalama Teknolojileri.....	341
4.5.8	Hidrojen Renkleri.....	342
4.5.8.1	Kahverengi Hidrojen.....	343
4.5.8.2	Siyah Hidrojen.....	343
4.5.8.3	Gri Hidrojen.....	343
4.5.8.4	Mavi Hidrojen.....	343
4.5.8.5	Yeşil Hidrojen.....	344
4.5.8.6	Turkuaz Hidrojen.....	344
4.5.8.7	Pembe Hidrojen.....	344
4.5.9	YEŞİL HİDROJEN FİNANSMANI.....	344

4.5.9.1	Finansal Politikalar	344
4.5.9.2	Türkiye Projeksiyonu.....	348
4.5.10	Hidrojenin Depolanması	349
4.5.10.1	Hidrojen Enerjisinin Depolama Yöntemleri	350
4.5.10.2	Sıkıştırılmış Gaz Depolama	350
4.5.10.3	Sıvılaştırılmış Hidrojen Depolama	350
4.5.10.4	Metal Hidrit Depolama.....	350
4.5.10.5	Gelecekteki Hidrojen Depolama Teknolojileri ve Beklentiler	351
4.5.10.6	Hidrojenin Bor ile Depolanması	351
4.5.10.7	Türkiye'nin Bor Kaynakları ve Hidrojen Ekonomisine Katkısı.....	352
4.5.10.8	Hidrojen Depolama Ekonomisinin Gelişmesi İçin Gereklilikler.....	352
4.5.11	Hidrojenin Taşınması	352
4.5.12	Hidrojenin Kara Yolu ile Taşınması	353
4.5.13	Demir Yolu Taşımacılığı.....	353
4.5.14	Deniz Yolu Taşımacılığı	354
4.5.15	Doğalgaz ile Taşıma	354
4.5.16	Dünya Örnekleri.....	355
4.6	Hidrojenin Kullanım Alanları.....	357
4.6.1	Çelik Sektörü	357
4.6.2	Çimento Sanayi	358
4.6.3	Ulaşım Sektörü	360
4.6.4	Doğalgaz Sektörü.....	361
4.6.4.1	Doğal Gaza Hidrojen Karıştırma Teknikleri	361
4.6.4.2	Uluslararası Çalışmalar ve Uygulamalar.....	361
4.6.4.3	Konya GAZBİR-GAZMER Hidrojen ve Doğalgaz Karışım Projesi.....	362
4.6.5	Hidrojen Ve Doğalgaz Karışımının Avantajları	362
4.6.6	Türkiye'deki Diğer Çalışmalar Ve İş Birlikleri.....	363
4.6.7	Uluslararası Hidrojen Politikaları.....	363
4.6.7.1	Avrupa Birliği.....	363
4.6.7.2	Amerika Birleşik Devletleri	364
4.6.7.3	Çin Halk Cumhuriyeti.....	366
4.6.7.4	Almanya.....	368
4.6.7.5	Japonya	370

4.6.7.6	Küresel Hidrojen Politikaları.....	372
4.6.7.7	Hidrojen Stratejisinde Türkiye'nin Rolü	373
4.6.7.8	Pilot Projeler ve Teknolojik Gelişim.....	375
4.6.7.9	Elektrolizör Üretimi ve Ar-Ge Çalışmaları.....	376
4.6.7.10	Ulusal ve Uluslararası Finansman Modelleri	377
4.6.7.11	Hidrojen Üretimi.....	378
4.6.7.11.4	Off-Grid	380
4.6.7.12	HİDROJENE İLİŞKİN HUKUKİ DÜZENLEMELER.....	381
4.6.7.12.4	Avrupa Birliği.....	382
4.6.7.12.5	Amerika Birleşik Devletleri.....	383
4.6.7.12.6	Diğer Yasama Faaliyetleri ve Türkiye	384
4.6.8	HİDROJEN'İN ENERJİ PİYASASINDAKİ KONUMU	385
4.6.9	Gün Öncesi ve Gün İçi Elektrik Piyasaları.....	386
4.6.9.1	Gün Öncesi Piyasası (GÖP).....	386
4.6.9.2	Gün İçi Piyasası (GİP).....	386
4.6.9.3	Mevzuat ve Yönetim	387
4.6.9.4	Spot Doğal Gaz Piyasası.....	387
4.6.9.5	Vadeli Doğal Gaz Piyasası	387
4.6.9.6	Mevzuat ve Yönetim	387
4.6.9.7	EPİAŞ ve Türkiye'nin Enerji Hedefleri.....	388
4.6.9.8	Enerji Piyasasında Hidrojenin Konumu	388
4.6.10	Sonuç Ve Öneriler	389
4.6.10.1	Araştırma, İnovasyon ve Teknoloji Geliştirme	389
4.6.10.2	Stratejik Planlama ve Uygulama	390
4.6.10.3	Yasal ve Standart Çerçeve	390
4.6.10.4	Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ve Teknoloji	390
4.6.10.5	Finansman ve Ekonomik Modeller.....	391
4.6.10.6	İhracat ve Bölgesel İşbirlikleri	391
4.6.10.7	Sektörel Dönüşüm ve Kullanım Alanları.....	391
4.6.10.8	Toplum ve Bilgilendirme	391
4.6.10.9	Hedefler ve İzleme	392
4.6.10.10	Uluslararası Gelişmeler ve Risk Yönetimi	392
4.6.11	Yerel ve Bölgesel Projeler.....	392

4.6.12	SONUÇ.....	392
5.	Dijital Karbon Yönetimi, Blokzincir Tabanlı Doğrulama, E-Verimlilik ve Dağıtık Sistemler Ekosistemi ..	394
5.1	Blokzincir Tabanlı Dijital Altyapının Temelleri: Kriptografi, Dağıtık Defterler ve Veri Güvenliği	394
5.1.1	Blokzincir ve Dağıtık Defter Kavramı.....	395
5.1.2	Kriptografik Doğrulama Mekanizmaları: Hash, Merkle Ağaçları ve ZKP	396
5.1.3	Merkezi Olmayan Veri Depolama Sistemleri ve Hibrit Mimari	398
5.1.4	Blokzincir Ağ Türleri: Kamu, Konsorsiyum ve Özel Ağlar	399
5.1.5	Siber Güvenlik, Dijital Kimlik ve Değiştirilemez Audit Trail	400
5.1.6	Karbon Ekonomisi için Blokzincir Tabanlı Değer Önerisinin Özeti.....	401
5.2	Dijital Karbon Doğrulaması: Kavramsal Temel, Regülasyonlar ve Yeni Nesil MRV Gereksinimleri	402
5.2.1	Dijital Karbon Doğrulamasının Regülasyon Bazlı Gereklilikleri	404
5.2.2	Mevcut MRV Sistemlerinin Teknik Sorunları	405
5.2.3	Yeni Nesil Veri Kaynakları: IoT, Uydu, Drone, ERP ve İş Süreçleri	406
5.2.4	dMRV Sistemlerinin Mimarisi: Veri Akışından Doğrulamaya.....	407
5.2.5	Kriptografik Doğrulama (ZKP, Hash, Merkle) ve Veri Bütünlüğü.....	407
5.2.6	Dijital Karbon Doğrulamasının Kurumsal Etkileri	408
5.2.7	Sonuç: dMRV, 2030–2050 Karbon Ekonomisinin Temel Altyapısıdır	409
5.3	E-Verimlilik ve Dijital İşletme Sistemleri: Blokzincir Tabanlı Karbon Piyasaları için Altyapı.....	409
5.3.1	E-Verimlilik Kavramının Evrimi: Endüstri 3.0'dan Karbon-Duyarlı Endüstri 5.0'a.....	410
5.3.2	Teknoloji–Süreç–İnsan Üçgeni: E-Verimliliğin Temel Mimarisi	411
5.3.3	E-Verimlilik Ekosisteminin Kavramsal Modeli	413
5.3.4	Dijital İkiz, RPA ve Otonom Sistemlerin Karbon ve E-Verimlilikteki Rolü.....	413
5.3.5	Veri Odaklı Kaynak Yönetimi: Kaynakların Sayısal Digitalizasyonu	415
5.3.6	Döngülerinde Sürdürülebilir Maliyet Analizi.....	416
5.3.7	Rebound Etkisi ve Dijital Verimlilik Yanılgıları: Karbon Yoğunluğu Perspektifi	416
5.4	Akıllı Sözleşmeler, Blokzincir Tabanlı Algoritmik Piyasalar ve Karbon Kredisi Yaşam Döngüsü	417
5.4.1	Karbon Kredilerinin Dijital Yaşam Döngüsü: Analog Piyasalardan Blokzincir Tabanlı Ekosisteme ..	417
5.4.2	Akıllı Sözleşmelerin Karbon Ekonomisindeki Rolü	418
5.4.3	Dijital Sertifikasyon: Dağıtık Defter Teknolojileri ile Karbon Piyasalarında Güven ve Bütünlük	420
5.4.4	Karbon Kredisi Yaşam Döngüsü – Teknik Diyagram	421
5.4.5	Algoritmik Karbon Piyasaları: AMM, Orderbook ve DeFi Likidite Yapıları	421
5.4.6	Emeklilik (Retirement) Sürecinin Dijitalleşmesi	422
5.4.7	Dijital Karbon Ekosisteminin Yönetişim ve Regülasyon Uyum Boyutu.....	423

5.5	Dijital Sürdürülebilirlik Raporlaması: ESG, Blokzincir Tabanlı Audit Trail ve Regülasyon Uyum Mimarileri.....	423
5.5.1	ESG Veri Modeli ve Kurumsal Veri Ekosisteminin Yeniden Tasarımı.....	423
5.5.2	Değiştirilemez Kayıt (Immutable Audit Trail): Blokzincir Tabanlı Dijital Güvenin Temeli.....	424
5.5.3	Dijital Sürdürülebilirlik Raporlama Mimarisi.....	425
5.5.4	Büyük kurumlarda etkisi:	426
5.5.5	Regülasyon Uyum Mimarileri: CSRD, SEC, IFRS S2 ve Yerel Düzenlemeler	426
5.5.6	Paydaş Şeffaflığı, Kurumsal Güven ve Veri Görselleştirme	427
5.5.7	Dijital Raporlamada Güvenlik, Gizlilik ve Erişim Hakları	427
5.6	Kurumsal Dijital Karbon Yönetimi Platformları: IoT, Yapay Zekâ, Uydu MRV, Blokzincir ve Çok Katmanlı Entegrasyon	428
5.6.1	IoT Tabanlı Karbon Ölçümü: Gerçek Zamanlı Veri Ekosistemi	428
5.6.2	Uydu MRV: Arazi Kullanımı, Metan Sızıntısı ve Uzaktan Doğrulama	429
5.6.3	Yapay Zekâ ile Karbon Analizi: Tahmin, Simülasyon ve Anomali Tespiti	430
5.6.4	Tedarik Zinciri Emisyonları (Scope 3), Çok Katmanlı Veri Entegrasyonu ve Blokzincir Tabanlı Doğrulama.....	431
5.6.5	Entegre Dijital Karbon Yönetimi Mimarisi ve Kurumsal Platform Tasarımı	431
5.6.6	Kurumsal Etkiler: Finansal, Operasyonel ve Stratejik Dönüşüm	432
5.6.7	Sonuç: Dijital ve Blokzincir Tabanlı Karbon Yönetimi, Kurumsal Dayanıklılığın Temelidir	433
5.7	Kaynakça	433
6.	YAPAY ZEKA İLE ENERJİ TÜKETİM ANALİZİ VE AZALTIM SENARYOLARI	435
6.1	Yapay Zeka Tabanlı Enerji Analitiği.....	435
6.1.1	Veri Toplama ve İşleme: YZ'nın Ham Maddesi	435
6.2	Yapay Zeka Tabanlı Enerji Analitiği Nedir?	436
6.3	Makine Öğrenme Algoritmaları: Enerji Tüketiminin Kodunu Çözmek	437
6.3.1	Makine Öğrenmesi Nedir?	437
6.4	Zaman Serisi Analizi ve Enerji Tüketimi Tahminleri.....	439
6.4.1	Yapay Zeka ile Geleceği Görmek Desen tanıma ve anomali belirleme sistemleri	439
a).	Zaman Serisi Analizinin Temel Kavramları ve Önemi.....	439
6.4.2	Yaygın Kullanılan Zaman Serisi Modelleri ve Yapay Zeka Yaklaşımları	440
6.4.2.1	Klasik İstatistiksel Modeller.....	440
6.4.2.2	Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları (YSA)	440
6.4.2.3	Karşılaştırmalı Performans.....	441

6.4.2.4	Veri Ön İşleme: Doğru Tahmin İçin Temel Adım	441
6.4.2.5	Veri Hazırlama	441
6.4.2.6	Model Eğitimi ve Doğrulama	441
6.4.2.7	Tahmin ve Uygulama	441
6.4.3	Pratik Uygulama ve Örnekler	441
6.4.3.1	Üniversite Kampüsünde Elektrik Tüketimi Tahmini	441
6.4.3.2	Kısa Vadeli Enerji Talep Tahmini	442
6.4.3.3	Derin Öğrenme ile Daha İyi Tahminler	442
6.4.4	Zaman Serisi Analizinde Uygulama Alanları	442
6.4.5	Zaman Serisi Modelleri Performans Analizi	442
6.4.6	Değerlendirme	443
6.5	Derin öğrenme modelleri ve sinir ağları	445
6.5.1	Derin Öğrenme ve Sinir Ağlarına Genel Bakış	445
6.5.1.1	Derin Öğrenme Nedir?	445
6.5.1.2	Sinir Ağlarının Temel Yapısı	445
6.5.2	Enerji Tüketim Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri	446
6.5.2.1	Yinelemeli Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks - RNN)	446
6.5.2.2	Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM)	446
6.5.2.3	İki Yönlü LSTM (Bidirectional LSTM - BiLSTM)	446
6.5.2.4	1 Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağları (1D-CNN)	446
6.5.3	Derin Öğrenme Modellerinin Teknik Yapısı ve Çalışma Prensibi	446
6.5.3.1	Veri Hazırlığı	446
6.5.3.2	Model Eğitimi	446
6.5.3.3	Performans Değerlendirme	447
6.5.4	Enerji Tüketim Tahmininde Derin Öğrenme Modelleri: Uygulama ve Karşılaştırmalar	447
6.5.4.1	Diyarbakır alışveriş merkezi örneği	447
6.5.4.2	Derin Öğrenme ile Enerji Tüketim Azaltım Senaryoları	447
6.6	Tahmine Dayalı Analitik	449
6.6.1	Tahmine Dayalı Analitik Nedir ve Neden Kritik?	449
6.6.2	Enerji Talep Tahmini ve Planlaması	449
6.6.3	Hava Durumu Verilerinin Entegrasyonu	450
6.6.4	Kullanıcı Davranış Analizi ve Profili	450
6.7	Enerji Tüketim Optimizasyonu	452

6.7.1	Enerji Tüketim Optimizasyonu: Temel Yaklaşım.....	452
6.7.2	Talep Yanıt Yönetimi	452
6.7.3	Dinamik Fiyatlandırma ve Yük Kaydırma Stratejileri	453
6.7.3.1	Dinamik Fiyatlandırma	453
6.7.4	Pik Yük Yönetimi ve Düzeltme Teknikleri.....	453
6.7.5	Tüketici Davranış Değişikliği Programları	454
6.8	Otomatik Optimizasyon Sistemleri.....	455
6.8.1	Yapay Zeka Destekli Enerji Tasarrufu Algoritmaları	456
6.8.1.1	Tipik Girdi–Karar Süreci.....	456
6.8.1.2	Algoritma Türleri ve Özellikleri.....	457
6.8.2	Akıllı Termostat ve Aydınlatma Kontrolü Algoritmaları.....	457
6.8.2.1	Akıllı Termostat Algoritmaları	457
6.8.2.2	Akıllı Aydınlatma Kontrolü Algoritmaları	458
6.8.2.3	Termostat ve Aydınlatma Entegrasyonunun Getirisi	459
6.9	Enerji Verimliliği Senaryoları.....	459
6.9.1	Sektörel Uygulamalar	459
6.9.2	Endüstriyel Alanlara Göre Bazı Uygulamalar ve Algoritmalar	460
6.9.3	Enerji Verimliliği Senaryoları ve Algoritmik Modeller	461
6.10	Çevresel Etki Senaryoları.....	462
6.10.1	Çevresel Etki Senaryoları: Dijitalleşme ve Yapay Zekanın Rolü.....	462
6.10.2	Karbon Ayak İzi Azaltım Projeksiyonları: Algoritmalar ve Modellemeler	465
6.10.2.1	Yapay Zeka ile Karbon Azaltım Modellemesi Neden Gereklidir?.....	465
6.10.2.2	Gelecek Perspektifi: Tahmine Dayalı Karbon Stratejileri	467
6.10.3	Yapay Zeka ile Karbon Hesaplama Yaklaşımları.....	467
6.10.3.1	Veri Kaynağı ve Özellik Mühendisliği (Feature Engineering)	468
6.10.3.2	Model Türleri ve Kullanım Amaçları	468
6.10.4	Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu Potansiyeli	469
6.11	Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkı Analizi.....	469
6.11.1	YZ'nin SDG'lerle (Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları) Uyum.....	470
6.12	Enerji Verimliliği İnternet ve Yapay Zeka Maliyetleri	470
6.12.1	İnternet Enerji Tüketimi.....	470
6.12.1.1	İnternet Enerji Tüketiminin Temel Bileşenleri	470
6.12.1.2	Evden Sunucuya Giden Bir Verinin Enerji Yolculuğu	471

6.12.1.3	Global Perspektif: Tüm İnternet Ne Kadar Enerji Tüketiyor?	475
6.12.1.4	Ülkelere Göre Dağılım ve Karbonsal Etki	475
6.12.1.5	Enerji Tüketiminin Nedenleri	476
6.12.1.6	Verimlilik Geliştirme Yöntemleri	476
6.13	Yapay zeka enerjisi enerji tüketimi problemleri	476
6.13.1	Yapay Zeka Modelleri Nasıl Çalışır ve Neden Enerji Tüketir?	477
6.13.2	Enerji Tüketimi Neden Bir Problem?	478
6.13.2.1	YZ Enerji Verimliliği İçin Hesaplama Örneği	478
6.13.2.2	Neden Optimize Edilmeli?	479
6.14	Verimlilik artışı ve enerji maliyeti dengeleri	480
6.14.1	Verimlilik Kazancı Nedir?	480
6.14.2	Enerji Maliyetleri – Artan Teknolojik Tüketim	480
6.14.2.1	Enerji – Verimlilik Dengesinin Nicel Analizi	481
6.14.2.2	Ama Ters Örnekler de Var	481
6.14.3	Verimlilik Artışı Hangi Durumda Enerjiye Değer?	481
6.14.3.1	Rebound Etkisi (Geri Tepme Etkisi)	482
6.14.3.2	Formül: Enerji Maliyeti Karşılığı Verimlilik Kazancı	482
6.14.3.3	Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirme	482
7.	Kurumlar İçin Karbon Ayak İzi Raporlanması Neden Gereklidir?	484
7.1	Dijital Karbon Ayak İzi Muhasebe Ve Ölçümleri	484
7.2	Dijital Karbon Ayak İzi İzleme (E-Dijital Karbon)	485
7.3	Gönüllü Karbon Piyasaları	486
7.4	Türkiye'nin Karbon Piyasalarındaki Mevcut Durumu Ve Geleceği	486
7.5	Pazar Boyutu Ve Trendler:	488
7.6	Temel Pazar İstatistikleri:	488
7.7	Bölgesel Görüşler	489
7.8	Abd Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri	489
7.9	Avrupa Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri	489
7.10	Asya Pasifik Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri	490
7.11	Orta Ve Güney Amerika Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri	490
7.12	Orta Doğu Ve Afrika Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri	490
7.13	Gönüllü Karbon Kredisi'nin Temel Görüşleri	490
7.14	Küresel Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Raporu Segmentasyonu	492

7.14.1	Proje Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030)	492
7.14.2	Uygulama Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030).....	492
7.14.3	Son Kullanım Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030).....	492
7.14.4	Bölgesel Görünüm (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030).....	492
7.15	Karbon Piyasası Geliştirme Projesi Açılışı.....	495
7.16	Karbon Offsetleme Mekanizmaları Ve Dijital Doğrulama	498
7.17	Sonuç Ve Öneriler:.....	498
8.	Dirençli Şehirler ve Topluluklar İçin Dijital Altyapılar	500
8.1	Akıllı ulaşım sistemleri, afet riski azaltımı ve kent altyapısı	500
8.1.1	Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Tanımı ve Bileşenleri.....	500
8.1.2	Kent Altyapısına Entegrasyon	500
8.1.3	Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler	501
8.1.4	Afet Yönetiminde Akıllı Ulaşımın Rolü	502
8.1.5	Uygulama Örnekleri ve Başarı Hikayeleri	503
8.1.6	Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri	503
8.2	Doğa temelli çözümler ile dijital risk modellemesi	504
8.2.1	Dijital Risk Modellemesi	504
8.2.2	Doğa Temelli Çözümler (DoCS).....	505
8.2.3	Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri	506
8.3	Kentsel risk haritalama, dijital eşitsizlik ve kapsayıcı veri altyapısı.....	507
8.3.1	Kentsel Risk Haritalamanın Teknik Temelleri	507
8.3.2	Dijital Eşitsizlik ve Etkileri.....	508
8.3.3	Veri Adaleti (Data Justice) İlkeleri	508
8.3.4	Entegrasyon Örnekleri ve Uygulamalar	509
8.3.5.	Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri.....	510
8.4	İDEP ve SECAP uyumlu eylem planlarında e-verimliliğin rolü.....	511
8.4.1	İDEP ve SECAP: Temel Yapılar ve Amaçlar	511
8.4.2.	E-Verimlilik Kavramı ve Dijital Teknolojilerin Rolü	512
8.4.3.	İDEP ve SECAP Planlarında E-Verimlilik Entegrasyonu	513
8.4.4.	Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Önerileri.....	513
8.5	Sonuç ve Öneriler.....	514
8.5.1	Entegrasyonun Önemi: Fiziksel ve Dijital Altyapının Uyumu	514
8.5.2	Politika Yapıcılara, Belediyelere ve Teknoloji Sağlayıcılara Öneriler.....	515

8.5.3	Gelecekteki Araştırma Alanları ve Dijital Kent Planlamasında Fırsatlar	516
KAYNAKÇA		517
8.6	Organize Sanayi Bölgelerinde Yeşil Dönüşüm	518
8.6.1	Dünyada Sanayi Bölgeleri.....	518
8.6.2	Türkiye’de Sanayi Bölgeleri	518
8.7	Osib’lerin Genel Tanımı.....	518
8.7.1	OSB’lerin Temel Hedefleri:.....	519
8.7.2	OSB Kuruluş ve İşleyiş Matrisi	519
8.7.3	Güncel Durum.....	520
8.7.4	Türkiye Organize Sanayi Bölgelerinde Mevcut Durum	520
8.7.4.1	OSB’lerin Yapısı ve Genel Profili.....	520
8.7.5	OSB’lerin Yapısı	520
8.7.5.1	Yönetim ve Organizasyon.....	520
8.7.5.2	Altyapı Hizmetleri.....	520
8.7.5.3	Sanayi Parselleri.....	521
8.7.5.4	Çevresel Planlama	521
8.7.5.5	OSB’lerin Genel Profili	521
8.7.5.5.4	Sanayi Türleri ve Sektörel Dağılım	521
8.7.5.6	Teknolojik Gelişim ve İnovasyon	521
8.7.5.7	İstihdam ve Eğitim.....	521
8.7.5.8	İhracata Yönelik Üretim	522
8.7.5.9	Yatırım Cazibesi.....	522
8.7.5.10	Çevresel ve Sosyal Sorumluluk	522
8.7.6	OSB’lerin Türkiye Ekonomisindeki Rolü ve Önemi.....	522
8.7.6.1	Sanayileşmenin Teşviki ve Üretim Üssü.....	522
8.7.6.2	İstihdam Yaratma	522
8.7.6.3	Bölgesel Kalkınmaya Katkı	522
8.7.6.4	Yatırım Teşvikleri ve Vergi Avantajları.....	523
8.7.6.5	Dış Ticaret ve İhracata Katkı	523
8.7.6.6	Çevre Dostu Üretim ve Sürdürülebilirlik	523
8.7.6.7	Altyapı ve Lojistik Avantajlar.....	523
8.8	Yeşil Dönüşüm Nedir?	523
8.9	Küresel Bağlam: İklim Krizi ve Sürdürülebilirlik	524

8.10	Türkiye’de Sürdürülebilirlik ve Yeşil Dönüşüm Gündemi	524
8.10.1	İklim Değişikliği ile Mücadele	525
8.10.2	Yenilenebilir Enerji ve Temiz Teknolojiler	525
8.10.3	Sıfır Atık Projesi.....	525
8.10.4	Yeşil Mutabakat ve Yeşil Ekonomi	525
8.10.5	Enerji Kullanımı ve Emisyonlar	525
8.11	OSB’lerde Enerji Kullanımı	525
8.11.1	Yoğun Enerji Tüketimi.....	525
8.11.2	Yenilenebilir Enerji Kullanımı	526
8.11.3	Enerji Verimliliği Projeleri	526
8.11.4	Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemleri.....	526
8.12	Organize Sanayi Bölgelerinde Yeşil Dönüşüm	526
8.12.1	Giriş	526
8.12.2	Yeşil Dönüşüm Kavramı ve Küresel Perspektif	526
8.12.2.1	Kavramsal Tanım	526
8.12.2.2	Küresel Trendler.....	526
8.12.2.3	Türkiye’de OSB’lerde Yeşil Dönüşüm Mevzuatı ve Politikalar	527
8.12.2.3.4	Ulusal Mevzuat.....	527
8.12.2.3.5	Teşvik ve Destekler	527
8.12.3	Devlet Stratejileri	527
8.12.4	Yeşil Dönüşüm Uygulamaları OSB’lerde	527
8.12.4.1	Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji	527
8.12.4.2	Atık Yönetimi ve Su Kullanımı	527
8.12.4.3	Çevre Dostu Altyapı ve Binalar	527
8.12.4.4	4Dijitalleşme ve Akıllı OSB Uygulamaları.....	528
8.12.5	Türkiye’de Örnek Yeşil OSB Projeleri	528
8.12.6	Ekonomik ve Sosyal Etkiler	528
8.12.7	Karşılaşılan Zorluklar	528
8.12.8	Gelecek Perspektifi ve Öneriler.....	528
8.12.9	Sonuç	529
9.	İletişim, Farkındalık Ve Toplumsal Etki	530
9.1	Dijital Farkındalık Kampanyaları ve İklim Okuryazarlığı	530
9.1.1	Hedef Kitleye Yönelik Özelleştirilmiş Stratejiler	530

Gençler, Çocuklar ve Eğitim Kurumları	530
Kırılgan Gruplar ve Toplumsal Katılım	531
Özel Sektör ve İş Dünyası.....	532
Kamu Kurumları ve Politika Yapıcılar	532
9.1.2 Oyunlaştırma (Gamification) ve İklim Okuryazarlığı	533
9.1.3 Yapay Zeka Destekli Kişiselleştirilmiş İklim Bilgisi	534
9.2 Sanal İletişim Araçlarının Karbon Ayak İzi Üzerindeki Etkisi	535
9.2.1 İletişimde Karbon Ayak İzini Azaltma Stratejileri	535
9.2.2 Uzaktan Çalışma ve Etkinliklerin Etkisi	536
9.2.3 Yeşil Bilişim Uygulamaları	536
9.3 Sosyal Etki Ölçümlemede Dijitalleşmenin Kullanımı	537
9.3.1 İklim Eylemlerinin Toplumsal Faydalarının Analizi	537
9.3.2 Blokzincir ile Sosyal Etki Takibi.....	537
9.3.3 STK'lar ile İşbirliği Modelleri.....	538
9.4 Kırılgan Grupların Dijital Çözümlerle İklim Dirençliliğine Entegrasyonu.....	539
9.4.1 Kapsayıcı Dijital İklim Çözümleri.....	539
9.4.2 Afet Yönetimi ve Dijitalleşme	539
9.4.3 Mobil Teknolojilerle İklim Bilinci Yayılımı	539
KAYNAKÇA.....	540
9.5. Kurumsal Sorumluluk ve Şeffaflık.....	542
9.5.1. Kurumsal Sorumluluk Anlayışının Gelişimi	542
9.5.2. Şeffaflığın Yönetişimdeki Rolü.....	542
9.5.3. Uluslararası Standartlar ve Uygulamalar	543
9.5.4. Türkiye'de Uygulamalar ve İyi Örnekler	543
9.5.5. Stratejik Önemi ve 2053 Net Sıfır Hedefi ile Bağlantı	543
9.6. ESG Raporlamasının Önemi.....	543
9.6.1. ESG Kavramının Kapsamı.....	543
9.6.2. Raporlamanın Küresel Standartları	544
9.6.3. Yatırımcılar ve Finansal Kuruluşlar Açısından Önemi.....	544
9.6.4. Türkiye'de ESG Raporlama Uygulamaları.....	544
9.6.5. Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi.....	544
9.7. Karbon Ayak İzi Raporlama Standartları	544
9.7.1. Karbon Ayak İzi Kavramı.....	544

9.7.2.	Küresel Standartlar ve Çerçevesler	545
9.7.3.	Avrupa Birliği ve Uluslararası Yönelimler	545
9.7.4.	Türkiye’de Uygulamalar	545
9.7.5.	Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi	545
9.8.	Toplumsal Kapasite ve İklim Adaptasyonu	545
9.8.1.	Kavramsal Çerçeve	545
9.8.2.	Dünya Geneline Uygulamalar	546
9.8.3.	Türkiye’de Toplumsal Kapasite ve Adaptasyon	546
9.8.4.	Kamu, Özel Sektör ve Sivil Toplumun Rolü	546
9.8.5.	Dijitalleşme ve Toplumsal Kapasite	546
9.8.6.	Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi	546
9.8.7.	Toplumsal Kapasite Gelişimi ve İklim Adaptasyonu	547
9.8.7.1	Yerel Yönetimlerle İşbirliği Projeleri	547
9.8.7.2.	Sektörler Arası Farkındalık Projeleri	547
9.8.7.3.	Gençlerin İklim Eylemlerine Katılımı	548
9.8.7.4.	Sonuç ve Değerlendirme	548



1. İklim Kanunu ve Regülasyonlar Bağlamında Uyum – Yönetici Özeti

Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadele süreci, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde hukuki, ekonomik ve kurumsal boyutlarıyla önemli bir dönüşümü ifade etmektedir. Bu doğrultuda ilgili çalışma; Türkiye İklim Kanunu'nun kapsamı ve bağlayıcı yönleri ile Ulusal Katkı Beyanı (NDC), Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ile uyum süreçleri ekseninde şekillenmiştir.

İlk bölümde, İklim Kanunu'nun getirdiği temel çerçeve ortaya konulmuş; anayasal dayanaklar, idari yapılanma, hukuki yükümlülükler ve piyasa mekanizmaları analiz edilmiştir. Kanun'un yalnızca çevresel bir düzenlemenin ötesinde ekonomi, enerji ve sanayi politikalarını doğrudan etkileyen stratejik bir metin olduğu vurgulanmıştır.

İkinci bölümde ise Türkiye'nin güncellenmiş Ulusal Katkı Beyanı ele alınmış; 2030 için %41 emisyon azaltım hedefi ve sektörel politikalar değerlendirilmiştir. Bu hedeflerin uluslararası müzakerelerde Türkiye'ye sağlayacağı avantajlar, yeşil finansmana erişim kanalları ve sürdürülebilir büyüme vizyonu öne çıkarılmıştır. Ayrıca AB'nin CBAM düzenlemesinin Türkiye'nin ihracatçı sektörlerine getirdiği yükümlülükler analiz edilmiş, uyum süreçlerinde şirketler açısından riskler ve fırsatlar değerlendirilmiştir.

Genel olarak bu rapor, Türkiye'nin iklim politikalarının yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve stratejik boyutlarıyla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. İklim Kanunu, NDC, ETS ve CBAM birlikte düşünüldüğünde; iş dünyasının riskleri yönetmesi, fırsatları değerlendirmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerini iş modellerine entegre etmesi kritik önem taşımaktadır.

1.1 İklim Kanunu'nun Kapsamı Ve Bağlayıcı Yönleri

Türkiye, iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum sürecinde hem uluslararası hem de ulusal düzeyde hukuki düzenlemelere yönelmiş, bu kapsamda 7552 sayılı İklim Kanunu ile temel çerçeveyi oluşturmuştur. Kanun, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi, Paris Anlaşması kapsamındaki Ulusal Katkı Beyanı (NDC) ve AB Yeşil Mutabakatı gibi dışsal yükümlülükleri gözeterek hazırlanmıştır. İklim Kanunu, ekonomik, sektörel ve sosyal politikaları dönüştüren yapısal bir çerçeve niteliğindedir.

1.1.1 Kanunun Yasal Dayanağı Ve Mevzuat İçindeki Konumu

Türkiye İklim Kanunu, Anayasa'nın 56. maddesinde güvence altına alınan "herkesin sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkı" ilkesine dayanmakta olup çevre hakkının korunması ve geliştirilmesi yönünde anayasal bir temeli ifade etmektedir. Kanun, 2872 sayılı Çevre Kanunu, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ve 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu başta olmak üzere çevre ve enerji mevzuatı ile bütünlük bir yapı oluşturmakta, mevcut düzenlemelerle koordinasyon içinde uygulanmaktadır.

Uluslararası boyutta ise Türkiye'nin taraf olduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Paris Anlaşması ve Kyoto Protokolü ile uyumlu bir hukuki altyapı sağlanmıştır. Özellikle Paris Anlaşması, emisyon azaltımı ve iklim değişikliğine uyum politikalarının bağlayıcı referans noktası niteliğindedir. Bunun yanı sıra Avrupa Birliği'nin Sınırdan Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) direktifleri, Türkiye'nin dış ticaret ve sanayi sektörleri üzerinde dolaylı bağlayıcılık yaratarak İklim Kanunu'nun uluslararası boyutunu güçlendirmektedir.

Kanun, 2025 yılında Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde kabul edilmiştir. Toplamda 20 madde ve 2 geçici madde içermekte olup yalnızca çevresel bir düzenleme olmanın ötesinde; Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon ve Yeşil Kalkınma hedefinin hukuki dayanağını oluşturan kapsamlı bir politika belgesidir. Bu yönüyle, ulusal iklim politikalarının anayasal, yasal ve kurumsal çerçevesini kalıcı şekilde tesis etmektedir.

1.1.2 Amaç, Kapsam Ve Temel İlkeler

Türkiye İklim Kanunu'nun temel amacı, sera gazı emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılması ve yeşil dönüşümün yasal bir zemine oturtulmasıdır.

Kanun; sera gazı emisyonlarının azaltımına, iklim değişikliğine uyum faaliyetlerine, planlama ve uygulama araçlarına, gelir kaynaklarına, izin ve denetime, karbon piyasaları ile bunlara ilişkin kurumsal ve yasal çerçevenin usul ve esaslarına ilişkin hükümleri kapsamaktadır.

1.1.3 Kanunun Hedeflediği Yapısal Dönüşüm

İklim Kanunu, aynı zamanda kurumsal ve yönetsel bir reform süreci öngörmektedir. Bu reform; kamu-özel iş birliğini, şeffaflığı ve hesap verebilirliği esas alan yeni bir yönetim modeline geçişi ifade etmektedir.

- **İzleme ve Raporlama:** Sera gazı emisyonlarının azaltımı ve uyum faaliyetleri, İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından izlenecek; kurumlar arası koordinasyon sağlanacak, faaliyet ve standartlar belirlenecek, karbon fiyatlandırmasına dayalı piyasa mekanizmaları düzenlenecektir.
- **Kamu ve Özel Sektörün Yükümlülüğü:** Kamu kurumları, özel sektör ve gerçek kişiler, kamu yararı gözetilerek alınacak tedbirlere süresinde uymak ve kendi sorumluluk alanlarında plan, proje ve uygulama yapmakla yükümlüdür.
- **Bilgi ve Veri Paylaşımı:** Başkanlık, gerekli gördüğü bilgi, belge ve verileri kamu ve özel sektörden talep edebilir; bu veriler Ulusal Coğrafi Bilgi Platformu'nda toplanır. Milli güvenlik ve savunmaya ilişkin verilerin paylaşımı ise ilgili bakanlıklarla belirlenen usul ve esaslara tabidir.

- **Yetki Devri:** Kanun, Bakanlığa tanınan bazı yetkilerin yazılı ve sınırları açıkça belirlenmiş şekilde Başkanlığa devrine imkan vermektedir.

Bu düzenlemeler, iklim politikalarının yalnızca hedef ve ilkeler belirlemekten öteye geçerek idari yapı ve kurumsal işleyişte köklü bir dönüşüm getirdiğini göstermektedir.

1.1.4 İklim Değişikliğiyle Mücadelede Benimsediği İlkeler

Kanun, iklim değişikliğiyle mücadelede evrensel kabul gören ilkeleri yasal güvence altına almıştır. Buna göre; eşitlik, iklim adaleti, ihtiyatlılık, katılım, entegrasyon, sürdürülebilirlik, şeffaflık, adil geçiş ve ilerleme yaklaşımları esas alınır. Ayrıca Türkiye'nin iklim diplomasisinde uzun süredir vurguladığı "ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler" ilkesi de Kanun'da temel bir referans noktası olarak yer almaktadır.

Bu çerçevede Ulusal Katkı Beyanı'nın hazırlanması ve uygulanmasında net sıfır emisyon hedefi gözetilecek; kalkınma öncelikleri ve ülkenin özel koşulları dikkate alınarak tedbirler alınacaktır.

1.1.5 Kurumsal Yapılanma Ve Görev Paylaşımı

İklim Kanunu, iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum politikalarının uygulanması için merkezi ve yerel düzeyde kurumsal mekanizmalar öngörmektedir. Bu yapı, hem yatay (bakanlıklar arası) hem dikey (merkezi-idari ve yerel yönetimler arası) koordinasyonu zorunlu kılan bütüncül bir idari model ortaya koymaktadır.

1.1.6 İdareler Arası Yetki Dağılımı ve Koordinasyon Mekanizmaları

- **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı:** Kanunun genel koordinasyonundan sorumludur. Emisyon envanteri hazırlanması, ulusal raporlamalar, ulusal strateji ve eylem planlarının yayımlanması Bakanlık uhdesindedir.
- **İklim Değişikliği Başkanlığı:** Kanunla birlikte yetkileri genişletilmiş ve merkezi aktör haline gelmiştir. Başkanlık; sera gazı emisyonlarının azaltımı ve uyum faaliyetlerini izlemek, karbon fiyatlandırmasına dayalı mekanizmaları (ETS, denkleştirme, gönüllü karbon piyasaları vb.) düzenlemek, ulusal, sektörel ve tematik raporlar hazırlamak ve Türkiye Yeşil Taksonomisi'ni yürütmekle görevlidir. Ayrıca yeni teknolojilerin (karbon yakalama, hidrojen, temiz enerji) geliştirilmesi ve kurumlar arası koordinasyon Başkanlığın sorumluluğundadır.
- **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı:** Yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimliliği ve temiz enerji teknolojileri politikalarının uygulanmasından sorumludur.
- **Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı:** Sanayi sektöründe düşük karbon teknolojileri ve verimlilik artırıcı uygulamaların teşvik edilmesi ile ETS uyumunun sağlanmasında görev üstlenmektedir.

- **Ticaret Bakanlığı:** Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ve uluslararası ticaret yükümlülükleri çerçevesinde düzenleme yapma ve raporlama esaslarını belirleme görevini yürütmektedir.
- **Tarım ve Orman Bakanlığı:** İklim değişikliğine dirençli tarımsal üretim desenleri, gıda güvenliği ve ekosistemlerin korunması bakımından sorumlu aktördür.
- **Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı:** Ulaştırma sektöründe düşük karbonlu ve elektrifikasyona dayalı dönüşümün yürütülmesinden sorumludur.
- **Yerel Yönetimler:** Kanunla birlikte her ilde "İl İklim Değişikliği Koordinasyon Kurulları" kurulmuştur. Vali başkanlığında toplanacak bu kurullar; il düzeyinde sera gazı azaltımı ve uyum eylemlerinin koordinasyonunu üstlenecek, yerel iklim değişikliği eylem planlarının hazırlanmasından ve uygulanmasından sorumlu olacaktır. Büyükşehirlerde koordinasyon büyükşehir belediyelerinin katılımıyla yürütülecektir.
- **Cumhurbaşkanlığı:** Net sıfır hedefi doğrultusunda yürütülen plan ve stratejilerin yıllık olarak izlenmesi ve gerektiğinde süre uzatımı gibi yetkiler Cumhurbaşkanlığı tarafından kullanılacaktır.

Karbon Piyasası Kurulu

Kanun ile kurulan Karbon Piyasası Kurulu, Türkiye'nin karbon piyasalarına yönelik en üst karar organıdır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanı başkanlığında; Enerji ve Tabii Kaynaklar, Hazine ve Maliye, Sanayi ve Teknoloji, Ticaret, Tarım ve Orman, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlıklarının bakan yardımcıları, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı temsilcisi, Sermaye Piyasası Kurulu Başkanı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Başkanı ve İklim Değişikliği Başkanı'ndan oluşmaktadır. Kurulun sekreteryası İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından yürütülmektedir.

Kurul; ulusal tahsisat planını onaylamak, ETS kapsamında ücretsiz tahsisatların dağılımına karar vermek, denkleştirme oranlarını belirlemek, birincil piyasada satışa sunulacak tahsisat miktarını tespit etmek, uluslararası karbon piyasalarında Türkiye'nin konumunu şekillendirecek sektörleri ve faaliyetleri belirlemekle yetkilidir. Bu yönüyle Kurul, yalnızca iç piyasayı değil aynı zamanda Türkiye'nin uluslararası karbon piyasalarındaki pozisyonunu da doğrudan etkilemektedir.

İklim Değişikliği İle Mücadele Faaliyetleri

İklim Kanunu, sera gazı emisyonlarının azaltımı ve iklim değişikliğine uyum faaliyetlerinin yalnızca belirli sektörlerle sınırlı kalmamasını, ekonominin tüm alanlarına yayılarak bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesini öngörmektedir. Bu bağlamda Kanun, enerji, sanayi, tarım, hayvancılık, ulaştırma, şehirleşme, yeşil alanlar ve doğal ekosistemler dahil olmak üzere çok geniş bir etki alanına sahiptir.

- **Stratejik Çerçeve:** Sera gazı emisyonları, Paris Anlaşması kapsamında sunulan Ulusal Katkı Beyanı (NDC), Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi ve İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından yayımlanan ulusal strateji ve eylem planları doğrultusunda azaltılacaktır. Strateji ve eylem planları ulusal ölçekte hazırlanacak, uygulanacak ve dönemsel olarak güncellenecektir.
- **Enerji, Su ve Hammadde Verimliliği:** Kamu kurumları, özel sektör ve diğer aktörler; enerji, su ve hammadde verimliliğini sağlamak, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak, karbon ayak izini azaltmak, temiz veya düşük karbonlu yakıtları tercih etmek, elektrifikasyonu yaygınlaştırmak, temiz teknolojileri geliştirmek ve kullanmakla yükümlüdür. Bu önlemler, adil geçiş ilkesi gözetilerek hayata geçirilecektir.
- **Karbon Yutak Alanları ve Doğa Temelli Çözümler:** Emisyonların dengelenmesi için orman, tarım, mera ve sulak alanlarda karbon yutağı kayıplarının engellenmesi ve mevcut yutak kapasitesinin artırılması esastır. Ayrıca doğa temelli çözümler, ekosistemlerin korunması ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi yoluyla gıda güvenliğinin sağlanmasına katkı sağlayacaktır.
- **Su Yönetimi:** İklim değişikliğinin etkilerine karşı su kaynaklarının etkin yönetimi hedeflenmiştir. Bu kapsamda planlama araçları geliştirilerek su bütçesi dikkate alınacak, tarım ve şehirleşme politikalarıyla entegre edilecektir.
- **Afet Risk Yönetimi ve Erken Uyarı Sistemleri:** İklim değişikliğine bağlı afetlerin yol açtığı kayıp ve zararların azaltılması için risk değerlendirme, izleme, bilgilendirme ve erken uyarı sistemleri oluşturulacak, bütünsel afet yönetimi esas alınarak bu mekanizmalar güçlendirilecektir.
- **Tarımsal Dönüşüm ve Gıda Güvenliği:** Tarım sektöründe iklim dirençli ürün desenlerinin geliştirilmesi, akıllı sulama uygulamaları, gübre yönetimi ve doğa temelli çözümler önceliklidir. Böylece hem gıda güvenliği sağlanacak hem de iklim değişikliğine uyum desteklenecektir.
- **Şehirler ve Yeşil Alanlar:** Kanun, yalnızca sanayi ve üretim sektörlerini değil, aynı zamanda şehirleri, tarımı, hayvancılığı ve yeşil alanları da kapsayan bütüncül bir koruma yaklaşımı benimsemiştir. Yerel İklim Değişikliği Eylem Planlarının hazırlanmasıyla birlikte şehirler ve yerel yönetimler iklim değişikliğine uyum sürecinin aktif aktörleri haline gelecektir.

Bu faaliyetler, Kanun'un çevresel hedeflerinin ekonomik ve sosyal dönüşümle entegre bir şekilde hayata geçirileceğini göstermektedir. Amaç, yalnızca emisyon azaltımı değil; aynı zamanda ekonominin iklim bazlı olumsuz sonuçlara karşı dirençli hale getirilmesi ve toplumun her kesiminde yeşil dönüşümün desteklenmesidir.

1.1.7 Emisyon Azaltımı Ve Sektörel Sorumluluklar

Kanunda, özellikle ETS'nin kurulması, karbon yutak alanlarının korunması ve yerel iklim eylem planlarının hazırlanması gibi başlıca yükümlülükler açıkça düzenlenmiştir. Bu hükümler, sanayi ve enerji sektörlerinin karbon üst sınırlarıyla denetlenmesi, tarım ve doğal ekosistemlerin korunması ve şehirlerde emisyon azaltıcı tedbirlerin uygulanması bakımından bağlayıcı bir temel oluşturmaktadır.

Ancak Kanun'un öngördüğü çerçeve, yalnızca bu hükümlerle sınırlı kalmamakta; farklı sektörlerde yapısal bir dönüşüm beklentisini de beraberinde getirmektedir.

1.1.8 Sektörel Yükümlülükler ve Ulusal Sera Gazı Azaltım Hedefleriyle İlişkisi

- **Enerji Sektörü:** Yenilenebilir kapasitenin artırılmasına yönelik uzun vadeli yatırım stratejileri geliştirilmesi, kömürden çıkışın kademeli bir yol haritasına bağlanması, hidrojen ve karbon yakalama teknolojilerinin Ar-Ge teşvikleriyle desteklenmesi
- **Sanayi:** ETS kapsamında karbon maliyetlerini yönetebilecek teknolojik dönüşümün sağlanması, düşük karbonlu üretim yöntemlerinin zorunlu hale gelmesi ve verimlilik yatırımlarına yönelik finansal teşviklerin artırılması
- **Tarım ve Hayvancılık:** İklim dirençli ürün desenlerinin yaygınlaştırılması, akıllı sulama sistemlerinin bölgesel ölçekte uygulanması, gübre yönetiminin emisyon azaltımına katkı sağlayacak şekilde yeniden düzenlenmesi; hayvancılıkta sürdürülebilir yem ve üretim teknikleriyle metan emisyonlarının azaltılması
- **Ulaştırma ve Lojistik:** Elektrikli araç altyapısının hızla geliştirilmesi, demiryolu ve denizyolu taşımacılığının payının artırılması, yeşil liman ve yeşil lojistik uygulamalarının ulusal standartlara kavuşturulması
- **Binalar ve Şehirleşme:** Enerji verimliliği sertifikalarının ve yeşil bina standartlarının zorunlu hale getirilmesi, kent planlamasında karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik entegre imar politikalarının benimsenmesi
- **Doğal Kaynak Yönetimi:** Orman, mera ve sulak alanların karbon yutak kapasitesinin artırılması, arazi tahribatının dengelenmesi ve ekosistem restorasyon projelerinin yaygınlaştırılması

1.1.9 Uygulama Araçları Ve Denetim Mekanizmaları

Kanunda; iklim değişikliğiyle mücadeleyle ilişkin planlama ve uygulama araçlarının İklim Değişikliği Başkanlığı koordinasyonunda hazırlanacağı, ulusal ve yerel eylem planlarının bağlayıcı nitelikte olacağı ve İl İklim Değişikliği Koordinasyon Kurullarının bu süreçte görev alacağı açıkça düzenlenmiştir. Ayrıca karbon piyasalarının işleyişine, gönüllü karbon piyasalarına, denkleştirme sistemlerine ve SKDM uygulamalarına ilişkin usul ve esasların da yönetmeliklerle ayrıntılandırılacağı belirtilmiştir.

Bunun ötesinde, Kanun'un öngördüğü yönetim modelini etkin kılmak amacıyla aşağıdaki politika araçları ve denetim mekanizmaları öngörülmektedir:

1.1.9.1 Planlama ve Uygulama

- **Ulusal ve Yerel Planlama:** Ulusal strateji ve eylem planlarının düzenli aralıklarla güncellenmesi, yerel planların vali koordinasyonunda hazırlanarak bölgesel iklim risklerini dikkate alacak şekilde bütüncül hale getirilmesi
- **Sektörel Risk Analizleri:** Başkanlık tarafından iklim modellerine dayalı olarak hazırlanacak sektörel risk ve etkilenebilirlik analizlerinin, tüm planlama araçlarının hukuki dayanağı haline getirilmesi
- **Finansman Mekanizmaları:** İklim yatırımlarının desteklenmesi amacıyla yeşil tahvil, sürdürülebilirlik bağlantılı krediler, yeşil fonlar ve sigorta araçlarının geliştirilmesi; ayrıca kamu bankaları ve kalkınma bankalarının iklim finansmanında aktif rol üstlenmesi
- **Döngüsel Ekonomi:** Atıkların yan ürün veya alternatif hammadde olarak kullanılması, geri dönüşümden elde edilen ürünlere zorunlu kullanım oranları getirilmesi ve bu alanda teşvik mekanizmalarının devreye sokulması
- **Teknoloji ve Ar-Ge:** Karbon yakalama, depolama, hidrojen ve dijital ölçüm teknolojilerinin öncelikli Ar-Ge alanları olarak belirlenmesi, bu alanlarda kamu-özel sektör iş birliklerinin teşvik edilmesi.
- **Eğitim ve Toplumsal Farkındalık:** Milli Eğitim Bakanlığı ve YÖK iş birliğiyle iklim değişikliği ve yeşil dönüşümün müfredata entegre edilmesi, yeşil iş gücü yetiştirilmesine yönelik sertifikasyon programlarının yaygınlaştırılması.

1.1.9.2 Denetim, Uyum ve Yaptırım Mekanizmaları

- **Bağımsız Doğrulama:** İşletmelerin emisyon raporlarının bağımsız doğrulama kuruluşları tarafından denetlenmesi ve yanlış beyanların ağır idari yaptırımlara bağlanması
- **Cezai Yaptırımlar:** Emisyon raporlamasında eksiklik, ETS yükümlülüklerine uyumsuzluk veya karbon ticaretinde usulsüzlük hallerinde idari para cezaları ve faaliyet kısıtlamaları uygulanması
- **Teşvik Mekanizmaları:** Yükümlülüklerini yerine getiren işletmeler için vergi indirimleri, KDV istisnaları, yeşil finansman araçlarına erişim kolaylığı ve Ar-Ge destekleri sağlanması
- **Şeffaflık ve Hesap Verebilirlik:** Kamu kurumlarının ve özel sektörün hazırladığı raporların kamuya açık şekilde yayımlanması, böylece iklim politikalarında toplumsal denetim mekanizmasının da işletilmesi

Bu yönüyle İklim Kanunu, emisyon azaltım hedefleri belirlemekle kalmayıp planlama – uygulama – denetim döngüsünü kurumsallaştırmakta; önerilen politika araçları ve teşviklerle de uygulamanın etkinliğini güçlendirmeyi amaçlamaktadır.

1.1.10 Kanun'un İş Dünyası Ve Yatırım Ortamına Etkileri

İklim Kanunu, yalnızca çevre politikalarının çerçevesini çizmekle kalmamış; Türkiye'nin ekonomik yapısını, iş dünyasının yatırım kararlarını ve küresel rekabet gücünü doğrudan etkileyecek bağlayıcı düzenlemeler getirmiştir. Kanunda açıkça öngörülen Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), karbon piyasası mekanizmaları, yeşil taksonomi ve yerel iklim eylem planları, hem sanayi ve enerji sektörleri hem de ticaret ve finans dünyası için yeni yükümlülükler doğurmaktadır. Bu yönüyle Kanun, iş dünyası için çevresel bir mevzuattan öte, stratejik yatırım kararlarını yönlendiren bir "ekonomi kanunu" niteliği taşımaktadır.

1.1.10.1 Kanunda Yer Alan Yükümlülüklerin İş Dünyasına Etkisi

- **Emisyon Raporlaması ve ETS Yükümlülükleri:** İşletmelerin sera gazı emisyonlarını düzenli olarak raporlaması ve ETS kapsamında tahsisat yükümlülüklerini yerine getirmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu düzenlemeye uyulmaması durumunda ağır idari para cezaları ve faaliyet kısıtlamaları uygulanabilecektir.
- **Karbon Piyasası ve Uluslararası Entegrasyon:** Karbon Piyasası Kurulu'nun kararları doğrultusunda ETS'nin işleyişi belirlenecek; ücretsiz tahsisatlar, denkleştirme oranları ve birincil piyasada satışa sunulacak tahsisatlar iş dünyasının doğrudan maliyet unsurları olacaktır.
- **Yeşil Taksonomi ve Finansal Raporlama:** Türkiye Yeşil Taksonomisi'nin kurulmasıyla birlikte, yatırımların çevresel ve iklim dostu kriterlere göre sınıflandırılması iş dünyası açısından finansmana erişimin ön koşulu haline gelecektir.
- **Yerel Eylem Planları:** Şirketler, bulundukları ilde hazırlanan iklim eylem planlarına uyum sağlamakla yükümlü olacak; bu da özellikle enerji, lojistik, tarım ve sanayi sektörlerinde yerel ölçekte farklı yükümlülükler doğuracaktır.

1.1.10.2 Kanunun Ruhu Çerçevesinde Öngörülen Etkiler ve Fırsatlar

Kanunun doğrudan öngörmediği ancak bağlamı itibarıyla iş dünyasında yaratacağı dönüşümler şu şekilde öngörülmektedir:

- **Rekabetçilik ve İhracat:** ETS'nin kurulması, özellikle çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre ve elektrik gibi sektörlerin AB'ye ihracatında CBAM kaynaklı karbon vergisi riskini azaltacak ve Türk ihracatçısının rekabet gücünü koruyacaktır.

- **KOBİ'ler ve Tedarik Zincirleri:** Kanunda KOBİ'lere doğrudan bir yükümlülük öngörülmemekle birlikte, ETS ve emisyon raporlama zorunluluklarının büyük ölçekli sanayi tesislerine uygulanması, tedarik zincirini de doğrudan etkileyecektir. Büyük ihracatçı şirketler, kendi karbon ayak izlerini raporlarken tedarikçilerden kaynaklanan Kapsam 3 emisyonlarını da hesaba katmak zorunda olduğundan, KOBİ'ler fiilen bu uyum sürecine dahil olmak durumunda kalacaktır. Bu durum, KOBİ'lerin iklim verisi toplama, raporlama ve düşük karbonlu üretim süreçlerine geçiş konusunda kapasite geliştirmelerini zorunlu kılmaktadır.
- **Yeşil Finansman ve Yatırımcı Güveni:** Bankalar ve yatırım kuruluşları, kredi ve yatırım kararlarını ESG kriterleri doğrultusunda şekillendirecek; yeşil tahvil, sürdürülebilirlik bağlantılı krediler ve karbon sertifikaları gibi finansal araçlar ön plana çıkacaktır. Bu sayede yabancı yatırımcı güveni artacak ve Türkiye'nin yatırım ortamı iyileşecektir.
- **Vergisel ve Mali Teşvikler:** Düşük karbon teknolojileri, yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği yatırımları için vergi indirimleri, KDV istisnaları ve devlet destekli finansman imkanlarının genişletilmesi beklenmektedir.
- **Kurumsal Yönetim ve ESG Yükümlülükleri:** Kanun, dolaylı olarak şirket yönetim kurullarına iklim risklerini karar alma süreçlerine entegre etme yükümlülüğü getirmektedir. ESG ilkelerinin kurumsal yönetim standartlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmesi, iş dünyasında şeffaflık ve hesap verebilirlik kültürünü güçlendirecektir.
- **İstihdam ve Sosyal Boyut:** Yeşil enerji, karbon piyasaları, atık yönetimi ve çevre teknolojileri alanlarında yeni istihdam olanakları doğacaktır. Karbon yoğun sektörlerde çalışanların adil geçiş ilkesi doğrultusunda yeniden eğitilmesi ve sosyal güvenlik desteklerinin artırılması, Kanun'un toplumsal etkilerinin önemli bir boyutunu oluşturacaktır.

1.2 Ulusal Katkı Beyanı, ETS Ve CBAM İle Uyum Süreçleri

1.2.1 Ab Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM)

AB Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın en kritik araçlarından biri olarak karbon kaçağını önlemek ve AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) ile uyumlu bir karbon fiyatlandırma mekanizmasını sınır ötesine taşımak amacıyla kurgulanmıştır. Regülasyon (AB) 2023/956 ile 16.05.2023 tarihinde yürürlüğe girmiş olan düzenleme, AB'ye ihracat yapan ülkeler için stratejik bir dönüm noktasıdır. Türkiye gibi ihracatının yarısını AB'ye yönlendiren ülkeler açısından CBAM, aynı zamanda yapısal dönüşüm ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

1.2.2 Temel Unsurlar ve Etkileri

Hukuki Çerçeve:

- CBAM'ın temelini Regülasyon (AB) 2023/956 oluşturmaktadır.
- Komisyon Uygulama Tüzüğü (AB) 2023/1773, geçiş döneminde raporlama ve hesaplama usullerini detaylandırmaktadır.

Amaç:

- AB üreticileri ile ithalatçıların eşit karbon maliyeti altında rekabet etmesini sağlamak.
- Karbon kaçağını önlemek ve düşük karbonlu üretim teknolojilerinin küresel ölçekte yaygınlaşmasına katkıda bulunmak.
- AB'nin 2050 iklim nötr hedefi ile uyumlu bir dış ticaret politikası geliştirmek.

Geçiş Dönemi (1 Ekim 2023 – 31 Aralık 2025):

- İthalatçılar yalnızca çeyreklik raporlama yapmakla yükümlüdür.
- Ürünlerin gömülü emisyonları beyan edilir; henüz mali yükümlülük doğmaz.
- Raporlama yöntemleri; doğrudan ölçüm, hesaplama formülleri veya Komisyon tarafından yayımlanan varsayılan değerlere göre belirlenir.

Kalıcı Uygulama (1 Ocak 2026'dan itibaren):

- İthalatçılar, ürünlerindeki gömülü emisyonlara karşılık CBAM sertifikası satın almak ve teslim etmek zorundadır.
- Sertifika fiyatı AB ETS karbon fiyatına endeksli olacaktır.
- İthalatçıların ayrıca CBAM Yetkilisi (Authorized Declarant) olarak atanması ve sicile kaydı zorunlu hale gelecektir.

Ekonomik Etkiler:

- Türkiye'nin AB'ye ihracatının yaklaşık %50'si karbon yoğun sektörlerden (çelik, alüminyum, çimento, gübre) oluşmaktadır.
- 2026'dan itibaren CBAM uyumunun sağlanmaması, ürün maliyetlerinin artmasına ve rekabet gücünün düşmesine yol açacaktır.

- Bu durum, doğrudan yabancı yatırımların yönünü ve tedarik zinciri yapılanmasını da etkileyecektir.

1.2.3 Sektörel yükümlülükler

CBAM başlangıçta yalnızca karbon yoğun sektörleri kapsamaktadır. Ancak ilerleyen dönemlerde kapsamın genişletilmesi beklenmektedir.

- **Demir-Çelik:** Türkiye'nin en büyük ihracat kalemlerinden biridir. Fırın teknolojisi, enerji kaynağı ve hurda kullanım oranı gibi parametreler gömülü emisyonları doğrudan belirlemektedir.
- **Alüminyum:** Elektrik yoğun bir sektör olduğu için maliyet baskısı yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimde payının artırılması kritik bir stratejidir.
- **Çimento:** Klinker üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltılması zordur. Karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri ön plana çıkmaktadır.
- **Gübre:** Azot bazlı gübrelerde N₂O emisyonları yüksek maliyet getirmektedir. Verimlilik teknolojileri kullanılmadığında ciddi yük doğar.
- **Elektrik ve Hidrojen:** Elektrik ithalatında üretim kaynağına göre gömülü emisyon hesaplanır. Türkiye'nin elektrik ihracatı şu anda sınırlı olsa da yenilenebilir enerji kapasitesiyle ileride stratejik fırsatlar yaratabilir.

1.2.4 Türkiye'nin Ets Ve Cbam İle Uyum Stratejisi

Türkiye, iklim politikalarını şekillendirirken hem 7552 sayılı İklim Kanunu hem de uluslararası yükümlülükler çerçevesinde Emisyon Ticaret Sistemi (TR-ETS) ile AB'nin Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'na (CBAM) uyumlu bir dönüşüm süreci yürütmektedir. Bu süreç, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda Türkiye'nin ihracat odaklı sektörleri için ekonomik ve ticari bir gereklilik olarak da öne çıkmaktadır. Zira AB'ye ihracat yapan sektörler, CBAM'ın yürürlüğe girmesiyle birlikte karbon fiyatlandırmasına tabi olacak, dolayısıyla Türkiye'nin ETS uygulamaları bu yükümlülüğü dengelemede kritik bir araç işlevi görecektir.

Uyum stratejisinin temelinde, sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına (MRV sistemi) ilişkin kapasitenin güçlendirilmesi yer almaktadır. Türkiye, AB ile teknik uyumu sağlamak için izleme ve raporlama standartlarını TR-ETS kapsamında tek bir mevzuat çatısı altında toplamış ve doğrulayıcı kuruluşların bağımsızlığına ilişkin mekanizmaları kurmuştur. Bununla birlikte pilot dönemden itibaren tahsisat planlarının hazırlanması, İşlem Kayıt Sistemi'nin faaliyete geçirilmesi ve piyasa istikrar mekanizmalarının geliştirilmesi de uyumun önemli bileşenleri arasında bulunmaktadır.

Türkiye'nin uyum stratejisi, üç ana boyutta şekillenmektedir:

- I. Birincisi, sektörel kapsama alanıdır. Pilot ETS döneminde enerji, demir-çelik, alüminyum, çimento ve kimya sektörlerinin sisteme alınması, Türkiye'nin emisyon yoğun sektörlerini önceliklendirdiğini göstermektedir. Bu sektörler aynı zamanda CBAM kapsamında karbon maliyetine en çok maruz kalacak alanlardır.
- II. İkincisi, karbon piyasası entegrasyonudur. Türkiye, ETS'nin ulusal boyutta işler hale gelmesini takiben gönüllü karbon piyasaları ile bağlantıyı sürdürmeyi ve ilerleyen aşamada AB ETS ile bağlantı imkanlarını değerlendirmeyi hedeflemektedir.
- III. Üçüncüsü ise yeşil finansman ve yatırım politikalarıdır. ETS'den elde edilecek gelirlerin yeşil dönüşüm projelerine, enerji verimliliğine ve yenilenebilir enerji yatırımlarına aktarılması öngörülmektedir.

Bu çerçevede, Türkiye'nin ETS ve CBAM uyum stratejisinin hem iç hukuka hem de dış ticaret dengelerine yönelik etkileri olacaktır. Bir yandan işletmeler karbon izleme ve raporlama yükümlülüklerine tabi olurken diğer yandan bu yükümlülüklerin yerine getirilmesi sayesinde AB'ye ihracatta karbon vergisi riskinin azaltılması mümkün hale gelecektir. Böylece Türkiye'nin rekabet gücü korunacak, aynı zamanda 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda düşük karbonlu kalkınma süreci hızlanacaktır.

1.2.5 Ulusal Katkı Beyanı Ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Taahhüdü

Ulusal Katkı Beyanı, ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlama konusundaki taahhütlerini somutlaştıran resmi beyanlardır. Bu kapsamda Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (NDC), Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Sekretaryası tarafından NDC siciline kaydedilmiştir.

Türkiye, yükümlülüklerini yerine getirmek üzere sunduğu Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı (NDC) ile, 2015 yılında duyurduğu %21 emisyon azaltım hedefini 2030 yılı için %41'e yükseltmiştir. Bu yeni hedef doğrultusunda Türkiye, 2030 yılına kadar emisyonlarını 695 Mt CO₂ eşdeğeri seviyesinde sınırlamayı ve en geç 2038'de emisyonlarını tepe noktasına ulaştırmayı taahhüt etmiştir. Bu, Türkiye'nin düşük karbonlu kalkınma yolunda attığı en somut adımlardan biridir ve küresel iklim mücadelesine yönelik kararlılığını göstermektedir.

2053 yılı için ilan edilen net sıfır emisyon hedefi, yalnızca uzun vadeli bir vizyon değil, aynı zamanda ulusal politika belgeleri ve sektörel stratejilerle uyumlu bir dönüşüm sürecini de ifade etmektedir. Bu kapsamda enerji, sanayi, ulaştırma, tarım, binalar, atık yönetimi ve arazi kullanımı sektörlerinde hem azaltım hem de uyum eylemleri öngörülmüştür. Özellikle yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimliliği programları, sürdürülebilir ulaşım modelleri ve döngüsel ekonomi uygulamaları, net sıfır hedefinin omurgasını oluşturmaktadır.

Ulusal Katkı Beyanı aynı zamanda, Türkiye'nin uluslararası finansman ve teknoloji transferi beklentilerini de açıkça ortaya koymaktadır. Zira belirlenen hedeflere ulaşılmasında; yeşil finansman kaynaklarına erişim, gelişmiş ülkelerden sağlanacak teknoloji ve kapasite geliştirme desteği kritik bir rol oynayacaktır. Türkiye, bu çerçevede iklim diplomasisini finansal mekanizmalara erişim odaklı bir şekilde yürütmekte ve net sıfır vizyonunu "yeşil büyüme" perspektifiyle ilişkilendirmektedir.

1.2.6 Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (Tr-Ets)

Türkiye'de emisyonların azaltılması ve karbon fiyatlandırma mekanizmasının hayata geçirilmesi amacıyla Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi, İklim Kanunu ile düzenlenmiş ve Başkanlık tarafından kurulacağı hüküm altına alınmıştır. TR-ETS, esas itibarıyla karbon yoğun sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerin sera gazı emisyonlarını sınırlandırmayı ve bu emisyonların ekonomik araçlarla kontrol edilmesini hedeflemektedir.

Kanun çerçevesinde, doğrudan sera gazı emisyonlarına sebep olan faaliyetleri yürüten işletmelerin sera gazı emisyon izni alması zorunlu hale getirilmiştir. Bu izinler, tesislerin niteliğinde veya işleyişinde meydana gelecek değişikliklere bağlı olarak güncellenebilir ya da iptal edilebilir. Böylece sistemin dinamik bir yapıda işletilmesi öngörülmektedir.

TR-ETS'nin işleyişine ilişkin önemli kararların alınabilmesi için Karbon Piyasası Kurulu ve Danışma Kurulu oluşturulacaktır. Bu kurullar, piyasa istikrar mekanizmaları, tahsisat yöntemleri, ücretsiz tahsisatlar ve uluslararası karbon piyasalarıyla entegrasyon süreçlerinde rehberlik sağlayacaktır. Bu yönüyle Türkiye, yalnızca ulusal ölçekte değil, küresel karbon piyasalarına entegre olmayı hedeflemektedir.

Ayrıca sistemin tamamlayıcı unsurları arasında gönüllü karbon piyasaları ile ulusal karbon kredilendirme ve denkleştirme sistemi de yer almaktadır. Bu sayede işletmeler, zorunlu yükümlülükler dışında gönüllü karbon kredileri aracılığıyla emisyon azaltımına katkıda bulunabilecek, elde edilen karbon kredilerinin ise merkezi bir kayıt sistemi aracılığıyla izlenmesi sağlanacaktır.

İklim Kanunu'nun kabulünün ardından, TR-ETS'nin uygulama esaslarını netleştirmek üzere Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği ve Türkiye Karbon Kredilendirme ve Denkleştirme Yönetmeliği tasarımları yayımlanmıştır. Bu ikincil düzenlemeler, ETS'nin işleyişine dair detayları somutlaştırmakta; izleme, raporlama ve doğrulama süreçlerinden tahsisat planlamasına kadar geniş bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak TR-ETS, Türkiye'nin uluslararası ticaret, yeşil finansman ve rekabet gücü stratejilerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. Bu sistem, AB'nin CBAM düzenlemesiyle uyumlu bir biçimde tasarlanarak Türkiye'nin ihracat pazarlarındaki sürdürülebilirliğini güvence altına almayı da hedeflemektedir.

1.2.7 ETS'nin hukuki dayanakları (İklim Kanunu ve Yönetmelik Taslağı)

Türkiye'de Emisyon Ticaret Sistemi'nin (TR-ETS) kurulmasına ilişkin en üst normatif dayanak, 7552 sayılı İklim Kanunu'dur. Kanun, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik temel politika aracı olarak ETS'yi düzenlemiş ve bu çerçevede Başkanlığa (İklim Değişikliği Bakanlığı) ulusal tahsisat planının hazırlanması, tahsisatların dağıtılması ve sistemin piyasa istikrar mekanizmalarıyla birlikte işletilmesi görevlerini yüklemiştir. Ayrıca doğrudan sera gazı emisyonuna neden olan faaliyetlerin yalnızca Başkanlıktan alınacak emisyon izni ile yürütülebileceği hüküm altına alınmıştır.

Kanunun ardından yayımlanan Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği Taslağı, ETS'nin uygulama usul ve esaslarını detaylandıran ikincil düzenleme olarak sistemin işleyişini belirlemektedir. Taslak yönetmelik ile halihazırda yürürlükte olan Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik hükümleri tek çatı altında toplanmış ve AB ETS'si ile uyumlu bir çerçeveye geçilmiştir. Yönetmelikte tesisler, kurulu kapasite ve emisyon miktarına göre üç kategoriye ayrılmış, Kategori B (50.000 – 500.000 ton CO₂) ve Kategori C (500.000 ton CO₂ üstü) tesisler ETS kapsamına alınmıştır. Bu sınırlandırma ile sistemin alt eşiği 50.000 ton CO₂ olarak belirlenmiştir.

Yönetmelik ayrıca emisyon izni, tahsisatlar, işlem kayıt sistemi, doğrulama ve raporlama yükümlülükleri ile pilot uygulama dönemini ayrıntılı şekilde düzenlemektedir. Buna göre işletmeler beş yıllık sürelerle geçerli emisyon izni almakla yükümlü olup iznin yenilenmesi ve gerekirse iptali yönetmelik hükümlerine bağlanmıştır. Tahsisatlar ulusal üst sınır kapsamında belirlenecek ve birincil ile ikincil piyasalarda işlem görecektir. İşlem kayıt sistemi üzerinden tesisler adına açılacak hesaplarda tahsisatların ihracı, transferi ve iptali gerçekleştirilecektir.

Hukuki dayanak açısından dikkat çekici bir diğer düzenleme, Türkiye sınırları içinde üretilen karbon kredilerinin tahsisat teslim yükümlülüklerinde %10'a kadar kullanılabilmesine imkan tanınmasıdır. Bu hüküm, gönüllü karbon piyasaları ile zorunlu ETS mekanizması arasında köprü kurmakta ve Türkiye'de karbon piyasalarının gelişimi için ikincil bir altyapı sağlamaktadır.

Son olarak Yönetmelik, 2026-2027 dönemini kapsayan bir pilot uygulama öngörmüş; bu dönemde ücretsiz tahsisatlar sağlanırken yükümlülüklerin yerine getirilmemesi halinde indirimli idari para cezaları uygulanacağı hükme bağlanmıştır. 2028-2035 arası dönem ise iki alt faza bölünmüş olup sistemin kademeli olarak tam işleyişine geçişi hedeflenmektedir. Bu çerçevede Yönetmelik, hem İklim Kanunu'nun çizdiği genel hukuki çerçevenin

somutlaştırılması hem de Türkiye'nin AB ETS'si ile uyum sürecinde hukuki entegrasyonun sağlanması bakımından kritik rol oynamaktadır.

1.2.8 ETS Uygulama Sistemi

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (TR-ETS), iklim politikalarının merkezinde yer alan enerji ve sanayi sektörleri başta olmak üzere doğrudan sera gazı emisyonlarına yol açan faaliyetleri kapsamaktadır. Sistem, özellikle yüksek emisyon yoğunluğuna sahip sektörlerin kapsama alınmasıyla hem çevresel etkinin yüksek olduğu alanlarda emisyonların kontrol altına alınmasını hem de AB ETS'si ile uyumlu bir çerçeve oluşturulmasını hedeflemektedir.

Sektörel kapsam bakımından TR-ETS; enerji üretimi, çimento, demir-çelik, rafineri, petrokimya, seramik, cam, kireç, kağıt, alüminyum gibi sanayi kolları ile birlikte büyük ölçekli ulaştırma faaliyetlerini ve belirli yakma tesislerini içine almaktadır. Bununla birlikte tarım ve atık sektörleri doğrudan ETS kapsamına girmemekte, bu sektörlerde emisyonların izlenmesi ve dolaylı uyum politikaları öngörülmektedir.

Tesis kategorileri açısından Yönetmelik Taslağı, kurulu kapasite ve yıllık emisyon miktarına göre üç ayrı kategori belirlemiştir:

- I. Kategori A: 50.000 ton CO₂ altı tesisler. Bu tesisler ETS kapsamı dışında tutulmuş, yalnızca izleme ve raporlama yükümlülükleriyle sınırlı bırakılmıştır.
- II. Kategori B: 50.000 – 500.000 ton CO₂ emisyonu olan tesisler. Bu gruptaki tesisler doğrudan ETS kapsamına dahil edilmiş ve tahsisat yükümlülükleri getirilmiştir.
- III. Kategori C: 500.000 ton CO₂ üzerinde emisyon üreten tesisler. Bu tesisler yüksek emisyon yoğunluğu nedeniyle sıkı yükümlülüklerle tabi kılınmış ve sistemin omurgasını oluşturmuştur.

Bu kademeli ayırım, bir yandan büyük ölçekli ve emisyon yoğun tesislerin kapsama alınmasını sağlarken diğer yandan küçük tesislerin idari yüklerini azaltmayı ve uyum maliyetlerini makul düzeyde tutmayı amaçlamaktadır. Böylece TR-ETS, çevresel etkinin yüksek olduğu alanlarda öncelikli uygulama modeli benimsemiş, kademeli olarak daha geniş kapsamlı bir sistemin zeminini hazırlamıştır.

1.2.8.1 Tahsisat Sistemi ve Piyasa Mekanizması

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (TR-ETS), "üst sınır ve ticaret" (cap-and-trade) modeli üzerine inşa edilmiştir. Bu modelde her yıl için ulusal düzeyde bir emisyon üst sınırı belirlenmekte, bu sınır dahilinde tesislere belirli miktarda emisyon tahsisatı dağıtılmaktadır. Tahsisatlar, işletmelerin emisyonlarını karşılamaları için kullanılmakta, fazla

taahhüsler piyasada satılabilmekte, yetersiz kalan işletmeler ise ihtiyaçlarını piyasadaki karşılamak zorunda kalmaktadır.

Taahhüslerin belirlenmesi sürecinde iki temel yöntem öne çıkmaktadır:

- Ücretsiz taahhüsler: Karbon kaçağı riski yüksek sektörler için öngörülmüş olup başlangıçta belirli bir oranda ücretsiz taahhüs sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle enerji yoğun ve ticarete açık sektörlerin rekabet gücünü korumayı amaçlamaktadır.
- Açık artırma yoluyla taahhüs: Zamanla ücretsiz taahhüslerin kademeli olarak azaltılması ve daha büyük oranda açık artırma yöntemine geçilmesi planlanmaktadır. Böylece piyasa mekanizmasının işleyişi güçlendirilecek ve karbon fiyat sinyali daha etkin hale getirilecektir.

Piyasa mekanizması bakımından, taahhüsler elektronik kayıt sistemi üzerinden izlenmekte ve karbon piyasasında alınıp satılabilmektedir. Bu piyasa, Karbon Piyasası Kurulu'nun düzenleyici rolü ve Piyasa İşletmecisi'nin teknik işlemleriyle yürütülmektedir. Ayrıca esneklik mekanizmaları (örneğin offset kredilerinin sınırlı oranda kullanılması) ve piyasa istikrar mekanizmaları da sistemin parçası olarak öngörülmüştür.

TR-ETS'nin tasarımı, AB ETS'si ile uyum gözetilerek uluslararası karbon piyasalarına entegrasyon hedeflenmektedir. Bu doğrultuda hem fiyat oluşumunun şeffaf olması hem de karbon kredilerinin karşılıklı tanınabilirliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır.

1.2.8.2 İzleme, Raporlama ve Doğrulama (MRV) Sistemi

Emisyon Ticaret Sistemi'nin etkinliğinin sağlanabilmesi için şeffaf, güvenilir ve doğrulanabilir bir izleme, raporlama ve doğrulama (MRV) altyapısı oluşturulmuştur. Bu sistem, tesislerin emisyonlarını düzenli olarak ölçmesini, raporlamasını ve bağımsız doğrulama kuruluşları aracılığıyla denetlenmesini zorunlu kılmaktadır.

İzleme aşamasında, işletmeler faaliyet türlerine ve tesis kapasitelerine göre belirlenen metodolojiler çerçevesinde yıllık emisyonlarını hesaplamakla yükümlüdür. İzleme planlarının Başkanlık tarafından onaylanması gerekmekte olup tesisler bu planlara uygun hareket etmek zorundadır.

Raporlama süreci, her takvim yılı sonunda hazırlanan sera gazı emisyon raporlarının Başkanlığa sunulmasını kapsar. Raporlar, belirlenen format ve içerik standartlarına göre hazırlanır; böylece tesisler arası karşılaştırılabilirlik sağlanır.

Doğrulama aşamasında ise akredite bağımsız kuruluşlar devreye girer. Raporlanan verilerin doğruluğu, eksiksizliği ve metodolojik uygunluğu bu kuruluşlarca denetlenir. Doğrulama sonucunda düzenlenen rapor, Başkanlığa iletilerek sürecin resmiyet kazanması sağlanır.

Bu sistem sayesinde, hem ulusal karbon piyasasının güvenilirliği sağlanmakta hem de uluslararası piyasalara entegrasyon için gerekli şeffaflık koşulları yerine getirilmektedir.

1.2.8.3 Kurumsal Yapı ve Yönetişim

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi'nin (TR-ETS) işlerliği, çok katmanlı bir kurumsal yapıyla güvence altına alınmıştır. Bu yapı, politika belirleyici otorite, piyasa düzenleyici mekanizmalar ve danışma organları üzerinden sistemin hem hukuki hem de teknik işleyişini düzenlemektedir.

Başta İklim Değişikliği Başkanlığı; ETS'nin kurulması, tahsisatların belirlenmesi, emisyon izinlerinin verilmesi ve denetim süreçlerinin yürütülmesinden sorumludur. Başkanlık, aynı zamanda uluslararası yükümlülüklerle uyumun sağlanması ve raporlamaların Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne sunulması görevini de yerine getirir.

Bunun yanında Karbon Piyasası Kurulu, ETS'nin genel işleyişine yön veren stratejik kararları almakla yetkilendirilmiştir. Kurul, tahsisatların ücretsiz dağıtım oranları, piyasa istikrar mekanizmaları, denkleştirme oranları ve uluslararası piyasalara entegrasyon gibi kritik konularda belirleyici rol oynar.

Sistemin teknik işleyişinde ise Piyasa İşletmecisi ön plana çıkmaktadır. Piyasa İşletmecisi, ETS kapsamında tahsisatların alınıp satıldığı piyasanın düzenli, şeffaf ve etkin şekilde çalışmasını sağlar. Alım-satım işlemlerinin güvenliği, veri yönetimi ve piyasa istikrarının korunması bu aktörün asli görevleri arasındadır.

Ayrıca Danışma Kurulu, özel sektör temsilcileri, akademisyenler ve sivil toplum kuruluşlarının katılımıyla ETS'nin uygulanmasında çok paydaşlı bir görüş ortamı yaratır. Bu kurul, piyasa aktörlerinin geri bildirimlerini karar mekanizmalarına taşımakta, böylece ETS'nin hem etkinliğinin hem de toplumsal meşruiyetinin güçlenmesine katkıda bulunmaktadır.

Sonuç itibarıyla TR-ETS kurumsal yapısı yalnızca devletin düzenleyici otoritesine değil, aynı zamanda piyasa aktörleri ve toplumsal paydaşların katkısına dayalı çok boyutlu bir yönetim modeli üzerine kurulmuştur. Bu yapı, ETS'nin sürdürülebilirliği ve uluslararası karbon piyasalarıyla uyumlu şekilde işlemesi için kritik önem taşımaktadır.

1.2.8.4 Piyasa İstikrar Mekanizmaları

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi'nin etkin ve öngörülebilir şekilde işlemesi için karbon fiyatlarının aşırı dalgalanmasını önleyecek ve piyasa güvenliğini sağlayacak istikrar mekanizmaları öngörülmüştür. Bu mekanizmalar, hem piyasa oyuncularının yatırım kararlarını güvence altına almakta hem de sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliğini garanti etmektedir.

Öncelikle, tahsisatların rezerv yönetimi temel istikrar unsurlarından biridir. Aşırı arz veya talep dengesizliği yaşandığında, piyasaya sürülecek veya piyasadan çekilecek tahsisat miktarıyla fiyat istikrarı sağlanır. Bu yöntem, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi'nde uygulanan Piyasa İstikrar Rezervi (Market Stability Reserve) modelinden esinlenmiş olup Türkiye koşullarına uyarlanmıştır.

Bunun yanında, fiyat tabanı ve tavanı gibi araçlarla karbon fiyatlarının hem aşırı düşmesi hem de öngörülemez seviyelere çıkması engellenmektedir. Bu sayede piyasa, spekülasyon dalgalarından korunurken düşük fiyat nedeniyle yatırımların sektöre uğraması ya da yüksek fiyat nedeniyle işletmelerin aşırı maliyet baskısı altına girmesi önlenir.

Ayrıca yedek tahsisat havuzları ve esneklik mekanizmaları (örneğin, belirli oranlarda denkleştirme kredisi kullanım hakkı) piyasanın arz-talep dengesine uyum sağlamasına yardımcı olur. Böylece işletmelerin karbon azaltım yükümlülüklerini yerine getirmesi kolaylaşırken aynı zamanda karbon piyasasının güvenilirliği pekiştirilir.

Sonuç olarak TR-ETS'de öngörülen istikrar mekanizmaları, hem piyasa aktörleri hem de kamu otoriteleri için güvenli ve öngörülebilir bir işleyiş sağlayarak Türkiye'nin düşük karbonlu kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik rol oynamaktadır.

1.2.8.5 Uygulama ve Denetim Mekanizmaları

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi'nin (TR-ETS) işlerliğini ve güvenilirliğini sağlayan temel unsurların başında uygulama ve denetim mekanizmaları gelmektedir. Bu çerçevede hem sera gazı emisyonlarının doğru ve şeffaf biçimde raporlanması hem de yükümlülüklerin yerine getirilip getirilmediğinin etkin biçimde denetlenmesi hedeflenmiştir.

Öncelikle, işletmelerin yıllık emisyonlarını ölçme ve kayıt altına alma yükümlülüğü, İzleme-Raporlama-Doğrulama (MRV) sistemi üzerinden işletilmektedir. Denetim mekanizmasının ikinci boyutunu, izin süreçleri ve tahsisat teslim yükümlülükleri oluşturmaktadır. ETS kapsamındaki tesislerin, faaliyetlerini sürdürebilmek için Başkanlık'tan sera gazı emisyon izni almaları zorunludur. Yıllık emisyonların, tahsis edilen haklarla uyumlu olması gerekir; aksi

takdirde işletmeler idari yaptırımlarla karşılaşır. İdari yaptırımlar arasında, eksik teslim edilen tahsisatlar için para cezaları, ek tahsisat teslim zorunluluğu ve emisyon izinlerinin askıya alınması gibi yaptırımlar yer almaktadır. Bu düzenlemeler, işletmelerin yükümlülüklerini ertelemesini engelleyerek sistemin caydırıcılığını artırır. Son olarak denetim mekanizmaları yalnızca yaptırıma dayalı değildir. Aynı zamanda işletmelerin kapasite geliştirmesi ve uyum süreçlerinin kolaylaştırılması amacıyla rehberlik ve bilgilendirme faaliyetleri de yürütülmektedir. Bu yaklaşım, piyasa oyuncularının sisteme uyumunu hızlandırmakta ve TR-ETS'nin etkinliğini artırmaktadır.

1.2.8.6 Uluslararası Piyasalarla Entegrasyon

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (TR-ETS), uluslararası karbon piyasalarıyla uyum içinde çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu yaklaşım, hem Avrupa Birliği'nin Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) ile uyumun sağlanması hem de gönüllü karbon piyasalarıyla entegrasyonun güçlendirilmesi açısından stratejik önem taşımaktadır. Özellikle AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) kapsamında, AB'ye ihracat yapan sektörlerin rekabet gücünü koruyabilmesi için TR-ETS'nin AB ETS ile eşgüdümlü şekilde işlemesi kritik görülmektedir. Bu kapsamda Türkiye'deki emisyon izleme, raporlama ve doğrulama süreçlerinin AB standartlarına uygun hale getirilmesi ve karbon fiyatlandırma sisteminin şeffaf bir şekilde işletilmesi hedeflenmektedir.

Ayrıca TR-ETS'nin uluslararası karbon piyasalarıyla bağlantısı, yalnızca AB ile sınırlı değildir. Gönüllü karbon piyasaları ile entegrasyon, Türkiye'de geliştirilen karbon kredilerinin uluslararası yatırımcılar ve şirketler tarafından kullanılabilmesine imkan tanımaktadır. Bu sayede, düşük karbonlu yatırımların finansmanına yeni kaynaklar yaratılmakta ve özel sektörün iklim eylemine katılımı teşvik edilmektedir.

İklim Kanunu ve ilgili yönetmeliklerde, Karbon Piyasası Kurulu ve Danışma Kurulu gibi mekanizmaların oluşturulması, uluslararası standartlarla uyum sürecinin sürekli gözetilmesini sağlamaktadır. Böylece Türkiye hem iç piyasada istikrarı güçlendirmekte hem de dış ticaretinde karbon regülasyonlarından kaynaklanan riskleri azaltmaktadır.

1.2.8.7 Gönüllü Karbon Piyasaları ve Kredilendirme Sistemi

Türkiye, zorunlu ETS mekanizmasının yanı sıra gönüllü karbon piyasalarının geliştirilmesine de önem vermektedir. Bu yaklaşım, işletmelerin yalnızca yasal yükümlülüklerle sınırlı kalmadan kendi iklim taahhütlerini hayata geçirmelerini ve düşük karbonlu projeleri teşvik etmelerini sağlamaktadır.

İklim Kanunu'nda, gönüllü karbon piyasaları ile ulusal karbon kredilendirme ve denkleştirme sisteminin kurulacağı açıkça hüküm altına alınmıştır. Bu kapsamda işletmeler, sera gazı emisyonlarını azaltan veya denkleştiren projeler geliştirerek karbon kredisi üretebilecek; üretilen bu krediler kayıt altına alınarak piyasada şeffaf ve güvenilir

biçimde işlem görebilecektir. Böylece hem özel sektör yatırımları desteklenmekte hem de iklim dostu teknolojilere geçiş için finansman imkanları genişletilmektedir.

Gönüllü karbon piyasalarının kurumsallaştırılması, Türkiye'nin uluslararası karbon finansmanına erişimini de kolaylaştırmaktadır. Özellikle enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, atık yönetimi ve tarım gibi sektörlerde geliştirilen projeler aracılığıyla küresel ölçekte kabul gören kredilendirme standartlarına uyum sağlanması hedeflenmektedir. Bu durum, Türk şirketlerinin uluslararası markalarla iş birliği yaparken karbon nötrlüğü taahhütlerini desteklemesine de katkı sağlamaktadır.

Bu bağlamda, Türkiye Karbon Kredilendirme ve Denkleştirme Yönetmeliği Taslağı gönüllü piyasaların işleyişini belirleyen en güncel düzenleme olup kredilerin izlenmesi, doğrulanması ve raporlanmasına ilişkin esasları ortaya koymaktadır. Yönetmelik, kredilendirme sürecinde şeffaflık, hesap verebilirlik ve izlenebilirlik ilkelerini ön plana çıkarmaktadır.

1.2.9 İş Dünyası Açısından Riskler Ve Fırsatlar

Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi'nin (TR-ETS) yürürlüğe girmesi, iş dünyası açısından hem uyum yükümlülükleri hem de yeni fırsatlar doğurmaktadır. Öncelikle, emisyon izinleri ve tahsisatların yönetimi, işletmelerin karbon yoğun faaliyetlerinde maliyet baskısı yaratacaktır. Karbon fiyatlandırması, yüksek emisyonlu sektörlerde üretim maliyetlerini artıracaktır; bu da özellikle enerji, çimento, demir-çelik ve kimya gibi sektörlerde rekabet gücü açısından riskler doğurabilecektir. Ayrıca AB'nin CBAM mekanizmasıyla birlikte ihracat yapan firmaların karbon ayak izini doğru şekilde hesaplaması ve raporlaması bir zorunluluk haline gelecektir. Bu bağlamda, uyum süreçlerini erteleyen şirketler hem maliyet artışıyla hem de pazar kaybıyla karşı karşıya kalabilecektir.

Bununla birlikte TR-ETS iş dünyası için önemli fırsatlar da barındırmaktadır. Karbon ticareti, emisyonlarını azaltan işletmelerin fazla tahsisatlarını satarak gelir elde etmesine imkan tanıyacaktır. Yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimliliği projeleri, yeşil finansmana erişim ve sürdürülebilir üretim modelleri, işletmelere hem maliyet avantajı hem de pazar erişiminde stratejik üstünlük sağlayabilecektir. Ayrıca gönüllü karbon piyasaları ve ulusal karbon kredilendirme sistemine entegrasyon, işletmelerin yalnızca uyum yükümlülüklerini yerine getirmesine değil, aynı zamanda marka değerini yükseltmesine ve yatırımcı güvenini pekiştirmesine katkı sunacaktır.

Sonuç olarak iş dünyası açısından TR-ETS bir maliyet unsuru olmanın ötesinde, dönüşüm ve rekabet gücünün artırılması için kritik bir araçtır. İşletmelerin bu sürece erken uyum sağlamaları, riskleri yönetirken fırsatları da etkin şekilde değerlendirmelerini mümkün kılacaktır.

KAPANIŞ

Türkiye, iklim değişikliğiyle mücadelede yükümlülük üstlenen bir aktör olmanın ötesinde, bölgesinde dönüşümü yönlendirecek bir ülke olma potansiyeline sahiptir. Gelecek dönemde Türkiye'nin başarısı, belirlenen hedeflerin hukuki, kurumsal ve ekonomik araçlarla desteklenmesine; iş dünyasının uyum süreçlerine katılım göstermesine ve toplumsal farkındalığın artırılmasına bağlı olacaktır. Bu çerçevede, sürdürülebilir kalkınma vizyonunun yalnızca çevre politikalarının değil, sanayi, enerji, finans ve ticaret politikalarının ayrılmaz bir parçası haline getirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak iklim değişikliğiyle mücadele, yeşil dönüşümün sunduğu ekonomik fırsatları değerlendirme imkanıdır. Bu fırsatların hayata geçirilmesi, yalnızca küresel yükümlülüklerin yerine getirilmesini değil, aynı zamanda yeni bir kalkınma modeli inşasını mümkün kılacaktır.

1.3 Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (KGK) ve Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS)

1.3.1 Giriş:

Son yıllarda sürdürülebilirlik raporlaması, özellikle iş dünyası olmak üzere geniş kesimlerin ilgisini çekmektedir. İklim değişikliği, küresel ısınma ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel çevresel sorunlar, işletmelerin finansal performanslarının değerlendirilmesinde çevresel, sosyal ve yönetim (ÇSY) unsurlarının dikkate alınmasını zorunlu hale getirmiştir.

Kurumsal sürdürülebilirlik raporlaması, günümüzde yatırımcılar ve diğer paydaşlar açısından, işletmelerin şeffaflık düzeyinin ve ÇSY performansının önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bu raporlar, kullanıcıların işletme faaliyetlerine ilişkin anlamlı ve bütüncül bilgi edinmelerini sağlayarak, şeffaflık ve hesap verebilirlik çerçevesinde değerlendirme yapılmasına imkân tanımaktadır.

Sürdürülebilirlik raporu, müşteri hizmetlerinden iklim değişikliğine kadar finansal olmayan pek çok konunun işletmenin değer oluşturma kapasitesine nasıl katkıda bulunduğunu veya değer oluşturma kapasitesini nasıl etkilediğini ele alır. İşletmelerin söz konusu finansal olmayan konulara karşılık verme şekli, işletmenin itibarını, inovasyon kapasitesini ve nihayetinde kârlılığını önemli ölçüde etkilediğinden, söz konusu finansal olmayan konular yalnızca sürdürülebilirlik alanını değil, aynı zamanda tüm seviyelerde yapılan raporlamaları ve dolayısıyla işletmelerin finansal yapılarını etkilemeye başlamıştır. Diğer taraftan, sürdürülebilirlik konularının gönüllü olarak raporlanmasında da önemli bir artış olduğu ve gönüllü olarak geliştirilmeye başlayan pek çok raporlama aracı ve standardının artık küresel ölçekte kabul görmeye başladığı görülmektedir.

Sürdürülebilirlik raporları, finansal tabloların tamamlayıcısı niteliğindedir ve işletmelerin faaliyetlerinin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla değerlendirilmesine olanak sunar. Bu yönüyle, işletmenin sürekliliği ve

uzun vadeli stratejik duruşu hakkında bilgi sağlama işlevi görür. Dolayısıyla işletmelerin, uzun vadeli değer yaratabilmeleri için ÇSY faktörlerini iş süreçlerine ve karar mekanizmalarına entegre etmeleri kaçınılmazdır. Bu bağlamda kurumsal sürdürülebilirlik raporlaması, işletmelerin kalıcı başarılarını sağlamaları ve sürdürülebilir büyümeye ulaşmaları açısından stratejik öneme sahiptir.

1.3.2 Kamu Gözetimi Kurumu ve Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarının (TSRS) Oluşum Süreci:

Sürdürülebilirlik, çevresel, sosyal ve yönetim alanlarını kapsayan çok boyutlu ve geniş bir kavram olarak, günümüzde işletmelerin stratejik kararlarında merkezi bir yer edinmiştir. Bu çok yönlü yapısı nedeniyle, süreç içinde sürdürülebilirlik raporlaması da farklı standartlar, çerçeveler ve yaklaşımlarla şekillenmektedir. Aşağıdaki



şekil, bu sürece ilişkin bir özet sunmaktadır:

Şekil 1: Sürdürülebilirlik Konusundaki Önemli Kuruluşlar, Düzenlemeler ve Raporlama Çerçeveleri

Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (KGK), kamu gözetimi alanında uluslararası gelişmelerin gereği olarak yeni Türk Ticaret Kanunu uyarınca öngörülen bağımsız denetim alanını düzenlemek üzere 660 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile 2 Kasım 2011 tarihinde kurulmuştur. KGK, Hazine ve Maliye Bakanlığıyla ilişkili, idari özerkliğe sahip bir Üst Kuruldur. KGK'nın temel amacı, yatırımcıların çıkarlarını ve denetim raporlarının doğru ve bağımsız olarak hazırlanmasına ilişkin kamu yararını korumak ile doğru, güvenilir ve karşılaştırılabilir finansal bilginin sunumunu sağlamaktır.

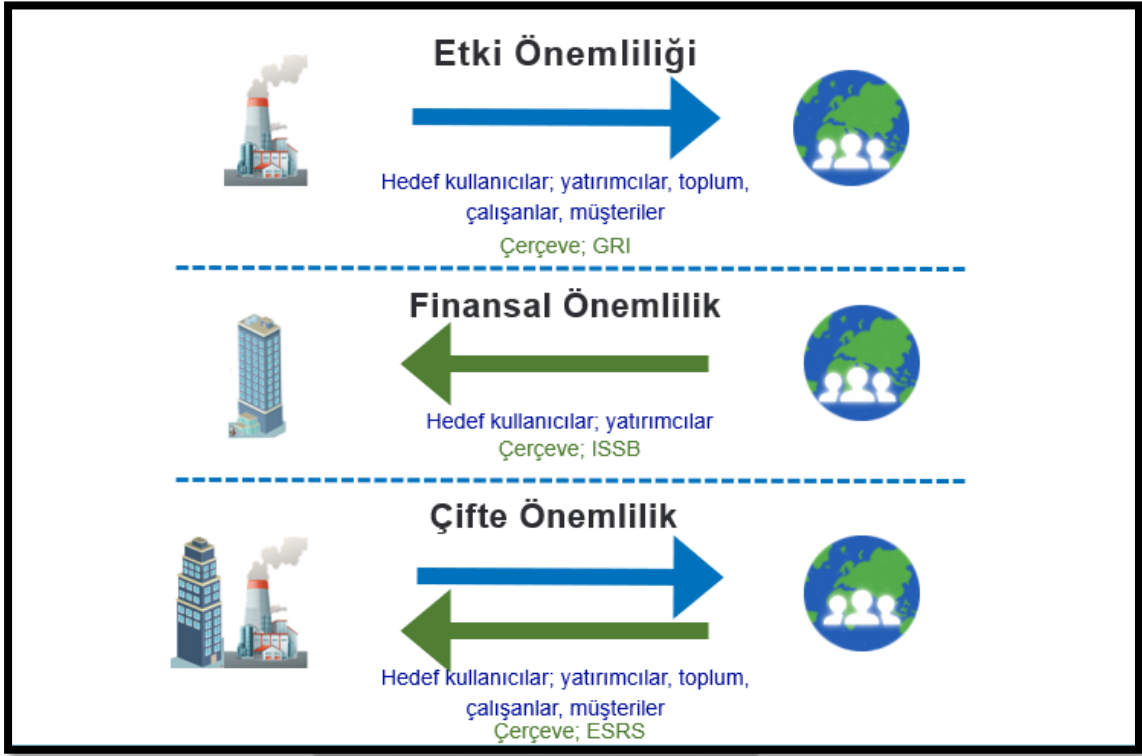
Küresel düzeyde gelişen ve yukarıdaki şekilde görülen süreç doğrultusunda KGK önemli bir misyonu yüklenmiş, sürdürülebilirliğin raporlamaya ilişkin yönünü ele almıştır. KGK bu alandaki düzenlemeleri ülkemizle uyumlu hale getirmeye yönelik çalışmalar yürütmektedir.

Bu kapsamda 04/06/2022 tarihli ve 31856 sayılı Resmî Gazete'de 6102 Sayılı Türk Ticaret Kanunu'nun 88'inci maddesinde yapılan değişiklikle KGK; uluslararası standartlarla uyumlu Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarını (TSRS) belirlemeye ve yayımlamaya, gerektiğinde değişik işletme büyüklükleri ve sektörler itibarıyla farklı düzenlemeler yapmaya yetkili kılınmıştır. Söz konusu yetki çerçevesinde, işletmelerimizin uluslararası alanda rekabet gücünü artırmak, paydaşlar ve yatırımcıların karar vermesini kolaylaştıracak şekilde raporlarda yeknesaklığı sağlamak amacıyla KGK; Uluslararası Finansal Raporlama Standartları Vakfı (IFRS) altında kurulan Uluslararası Sürdürülebilirlik Standartları Kurulu (ISSB) tarafından yayımlanan ve 140'tan fazla ülkede kabul gören Uluslararası Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarını benimsemiş olup, söz konusu standartları "TSRS 1 Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler" ve "TSRS 2 İklimle İlgili Açıklamalar" adlarıyla 29/12/2023 tarihli ve 32414 (1.M) sayılı Resmî Gazete'de yayımlayarak mevzuatımıza kazandırmıştır.

1.3.3 TSRS 1 ve TSRS 2:

TSRS'lerden bahsetmeden önce, sürdürülebilirlik raporlamasında yer alan önemlilik kavramına değinilmesi gerekmektedir. Önemli bilgi genel olarak hedef kullanıcıların kararlarını etkilemesi beklenen bilgi şeklinde tanımlanabilir. Sürdürülebilirlik raporlama çerçevelerinin önemlilik kavramını nasıl ele aldığına ilişkin birçok yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki etki önemliliği kavramıdır. Etki önemliliği bir işletmenin faaliyetlerinin çevre, toplum veya ekonomi üzerindeki önemli etkilerini ifade eder. Bu yaklaşım, Küresel Raporlama Girişimi (GRI) tarafından benimsenmektedir. İkinci olarak finansal önemlilik kavramı ele alınabilir. Finansal önemlilik, ÇSY hususlarının işletme üzerindeki etkilerini dikkate alır. İşletmenin mevcut ve gelecekteki nakit akışları, finansal durumu ve finansal performansı üzerinde etkisi olan risklerin dikkate alınmasını gerektirir. Bu yaklaşım TSRS'ler

tarafından benimsenmiştir. Son olarak çifte önemlilik yaklaşımı gelmektedir. Çifte önemlilik hem etki önemliliği hem de finansal önemliliği birlikte ele alan bir yaklaşımdır. Konuların hem işletme üzerindeki finansal etkisi hem de işletmenin çevre ve toplum üzerindeki etkileri dikkate alınır. Avrupa Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (ESRS) bu yaklaşımı benimsemektedir. Aşağıdaki şekil bu kavramların bir özetini sunmaktadır:



Şekil 2: Önemlilik Kavramı ve Sürdürülebilirlik Raporlama Çerçeveleri

Daha öncesinde bahsedildiği üzere KGK, ISSB tarafından yayımlanan 2 adet Uluslararası Sürdürülebilirlik Raporlama Standardını, TSRS 1 "Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler" ve TSRS 2 "İklimle İlgili Açıklamalar" adlarıyla mevzuatımıza kazandırmıştır. İlgili standartlar 1/1/2024 ve sonrasında başlayan hesap dönemlerinde uygulanmak üzere yürürlüğe konmuştur.

1.3.3.1 TSRS 1 Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler:

TSRS 1, içeriği ve yapısı itibarıyla çerçeve bir standart olup diğer sürdürülebilirlik açıklama standartlarının uygulanmasında rehberlik sağlar. Bu Standart bir nevi TSRS'lerin anayasası olarak ele alınabilir.

TSRS 1'in 1'inci paragrafın Standardın amacı şu şekilde tanımlanmaktadır:

"Bu Standart, bir işletmenin kısa, orta veya uzun vadede nakit akışlarını, finansmana erişimini veya sermaye maliyetini etkilemesi makul ölçüde beklenebilecek sürdürülebilirlikle ilgili tüm risk ve fırsatlara ilişkin bilgileri açıklamasını zorunlu kılar. Bu Standardın amaçları doğrultusunda, söz konusu risk ve fırsatlar toplu hâlde "işletmenin gelecekteki finansal yeterliliğini etkilemesi makul ölçüde beklenebilecek sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlar" olarak anılır."

TSRS 1, sürdürülebilirlikle ilgili tüm risk ve fırsatların, işletmenin gelecekteki finansal durumu üzerindeki etkisi dikkate alınarak raporlanmasını öngörür. Buradaki "makul ölçüde beklenebilecek" ifadesi, belirsizlik içeren ancak işletmenin nakit akışları, finansmana erişimi veya sermaye maliyeti yani Standardın da bu üç kavramı kısalttığı şekliyle işletmenin finansal yeterliliği üzerinde etkili olabileceği öngörülen durumların dikkate alınması gerektiğine işaret eder. Yani işletmeler, yalnızca mevcut değil, aynı zamanda orta ve uzun vadede ortaya çıkması muhtemel sürdürülebilirlik kaynaklı risk ve fırsatları da değerlendirerek, bu unsurların finansal yeterlilikleri üzerindeki potansiyel etkilerini açıklamakla yükümlüdür. Bu yaklaşım, yatırımcıların ve diğer paydaşların geleceğe yönelik daha bütüncül bir değerlendirme yapabilmesini hedefler. Ayrıca Standart kısa, orta ve uzun vade kavramlarını zaman dilimi olarak kısaltmış ve bu zaman dilimlerinin ne kadarlık bir süreyi kapsayacağını işletmenin muhakemesine bırakmıştır.

Standartta sürdürülebilirlikle ilgili bilginin temel niteliksel özellikleri belirlenmiştir. Buna ilişkin standardın "Kavramsal Temeller" başlığı altında yer alan 10'uncu paragrafında şu hüküm yer almaktadır:

"Sürdürülebilirlikle ilgili finansal bilgilerin faydalı olması için; bu bilgilerin ihtiyaca uygun olması ve sunmayı amaçladığı hususu gerçeğe uygun bir şekilde sunması gerekir. Bunlar sürdürülebilirlikle ilgili finansal bilginin temel niteliksel özellikleridir. Sürdürülebilirlikle ilgili finansal bilginin karşılaştırılabilir, doğrulanabilir, zamanında sunulmuş ve anlaşılabilir olması durumunda, söz konusu bilginin faydası artar. Bunlar, sürdürülebilirlikle ilgili faydalı finansal bilginin bu niteliğini artıran özelliklerdir."

TSRS 1'de sürdürülebilirlikle ilgili finansal bilginin temel ve destekleyici niteliksel özellikleri, Türkiye Muhasebe Standartları'nda (TMS) finansal tablolar için öngörülen bilgi kalitesi unsurlarıyla büyük ölçüde paralellik gösterir. Her iki standart setinde de ihtiyaca uygunluk ve gerçeğe uygun sunum, faydalı finansal bilginin temel niteliksel özellikleridir. Benzer şekilde, karşılaştırılabilirlik, doğrulanabilirlik, zamanında sunum ve anlaşılabilirlik gibi tamamlayıcı özellikler her iki standart setine uygun olarak açıklanan bilgilerin faydasını artıran özelliklerdir. Ancak TSRS 1, bu nitelikleri belirsizlik içeren sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlarla ilişkili bilgilerle ilişkilendirir. Böylece, finansal raporlama ilkeleri sürdürülebilirlikle ilgili açıklamalara adapte edilmiş olur.

TSRS 1 işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili açıklayacağı risk ve fırsatların asgari olarak 4 başlık altında açıklanmasını öngörmektedir. Bunlar Standartın "Temel İçerik" başlığı altında sayılmaktadır.

Bunlardan ilki **yönetişim** başlığıdır. Yönetişim, işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları izlemek ve yönetmek için kullandığı yönetim süreçleri, kontrolleri ve prosedürleridir. Örneğin, işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili yönetim organı/organlarının veya sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların gözetiminden sorumlu kişi/kişilerin açıklanması gerekmektedir.

İkinci olarak **strateji** başlığı gelmektedir. Bu başlık altında işletme genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının, işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları yönetme stratejisini anlamalarını sağlayacak açıklamalarda bulunur. Örneğin, işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlarının işletmenin iş modeli yani nakit akışı yaratma sistemi ve değer zinciri üzerindeki mevcut ve öngörülen etkilerini açıklanması gerekmektedir.

Üçüncü başlık **risk yönetimi** başlığıdır. Bu başlık altında işletmenin rapor kullanıcılarının sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları belirleme, değerlendirme, önceliklendirme ve izleme süreçlerinin işletmenin genel risk yönetimi sürecine entegre edilip edilmediği, edildiyse nasıl entegre edildiği ve genel risk yönetimi sürecine nasıl bilgi verdiği de dâhil olmak üzere, söz konusu süreçleri anlamalarını sağlayacak bilgileri açıklaması gerekmektedir.

Son başlık ise **metrik ve hedefler**dir. Bu başlığın amacı Standartta şu şekilde ifade edilmiştir: *"Metrikler ve hedeflere ilişkin sürdürülebilirlikle ilgili finansal açıklamaların amacı, genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının, işletmenin kendi belirlediği hedeflere ve mevzuat uyarınca ulaşması gereken hedeflere yönelik ilerlemeleri de dâhil olmak üzere, sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlarla ilgili olarak işletmenin performansını anlamalarını sağlamaktır."*

TSRS 1'de yer alan raporlama zamanı ve dönemi belirlenmiştir. Buna göre işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili finansal açıklamaları işletmenin finansal tablolarıyla aynı zamanda ve aynı raporlama dönemi için yapılmalıdır. Bununla ilgili geçiş hükümleri Standartta ve Kurul Kararlarında ayrıca yer almaktadır.

İşletmelerin hazırlayacağı TSRS uyumlu sürdürülebilirlik raporlarının nerede/hangi raporda yayımlanacağına ilişkin KGK tarafından bir düzenleme yapılmış olup Standartta 61T Paragrafı eklenmiş ve böylece raporların ya "TSRS Uyumlu Sürdürülebilirlik Raporu" başlığıyla ayrı bir rapor olarak yayımlanacağı ya da rapor başlığı dâhil olmak üzere bir bütün hâlinde entegre faaliyet raporu vb. raporların içinde yayımlanabileceği hüküm altına alınmıştır.

TSRS 1, diğer sürdürülebilirlik açıklama standartları için temel bir çerçeve oluşturarak, sürdürülebilirlikle ilgili finansal bilgilerin raporlanmasına ilişkin genel esasları belirler. Bu Standart açıklanacak bilgilerin kapsamı,

sunum ilkeleri, önemlilik değerlendirmesi ve niteliksel özellikler gibi temel unsurları tanımlar. Böylece TSRS 1, sürdürülebilirlikle ilgili konuya özgü açıklama standartlarının (örneğin TSRS 2: İklimle İlgili Açıklamalar) uygulanmasında rehberlik işlevi görür ve sürdürülebilirlik raporlamasının tutarlı, karşılaştırılabilir ve güvenilir olmasını sağlar.

1.3.3.2 TSRS 2 İklimle İlgili Açıklamalar

Daha önce bahsedildiği üzere TSRS 1 sürdürülebilirlik açıklama standartları için genel bir çerçeve çizerken TSRS 2 bir işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili belli bir konu için yani iklimle ilgili yapacağı açıklamaları içermektedir. TSRS 2'nin amacı ikinci paragrafta şu şekilde açıklanmıştır:

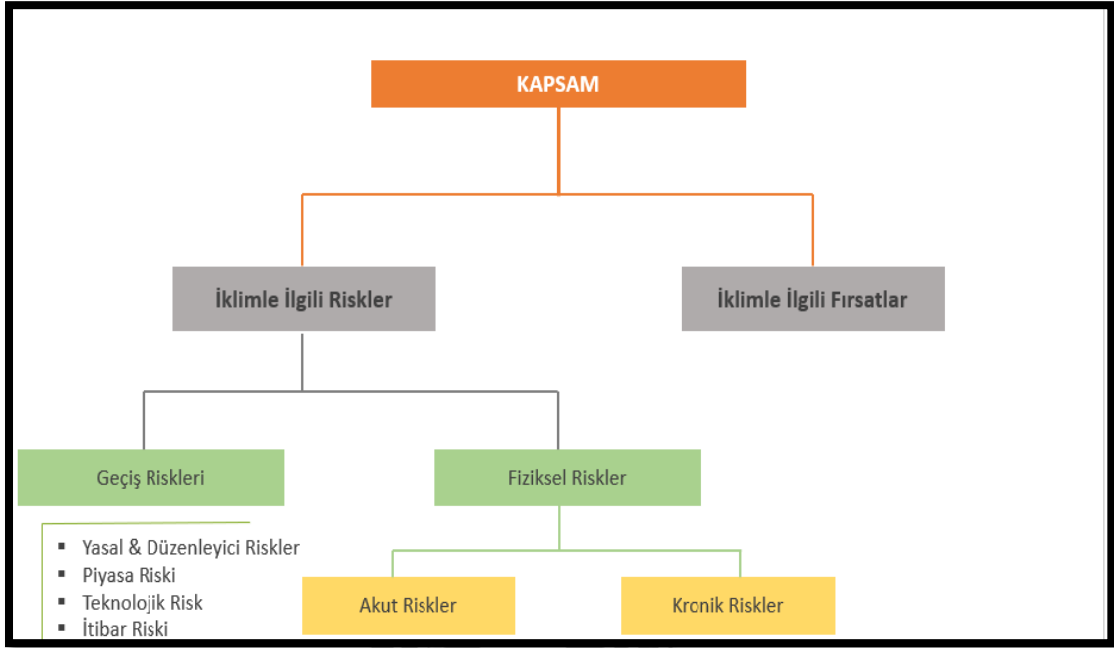
"Bu Standart, bir işletmenin kısa, orta veya uzun vadede nakit akışlarını, finansmana erişimini veya sermaye maliyetini etkilemesi makul ölçüde beklenebilecek iklimle ilgili risk ve fırsatlara ilişkin bilgileri açıklamasını zorunlu kılar."

Yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği üzere Standardın amacı işletmenin finansal yeterliliğini makul ölçüde etkilemesi beklenen iklimle ilgili risk ve fırsatlarının açıklanmasıdır. Bu risk ve fırsatlar aynı zamanda Standardın kapsamını da oluşturmaktadır. Standart işletmenin iklimle ilgili maruz kaldığı riskleri ikiye ayırmaktadır. Bunlar **iklimle ilgili fiziksel riskler** ve **iklimle ilgili geçiş riskleri** olarak adlandırılır.

Fiziksel riskler incelendiğinde TSRS 2, bu fiziksel riskleri kendi içinde ikiye ayırmaktadır. Bunlardan ilki olay tabanlı gerçekleşen bir iklim değişikliğinden kaynaklanan **akut fiziksel riskler**dir. Bu riskler şiddeti ve sıklığı artan fırtınalar, seller, kuraklık veya sıcak hava dalgaları gibi hava muhalefetiyle ilgili olaylardan kaynaklanır. İkinci fiziksel risk grubu olan **kronik fiziksel riskler** ise, deniz seviyesinin yükselmesine, suya erişimin azalmasına, biyolojik çeşitlilik kaybına ve toprak verimliliğindeki değişikliklere yol açabilecek yağış ve sıcaklıktaki değişiklikler dâhil olmak üzere iklim olaylarındaki uzun vadeli değişimlerden kaynaklanır.

İklimle ilgili geçiş riskleri düşük karbon ekonomisine geçiş çabalarından kaynaklanan risklerdir. Geçiş riskleri; politika, yasal, teknoloji, pazar ve itibar risklerini içerir. Bu riskler; artan işletme maliyetleri veya iklimle ilgili yeni veya değişen düzenlemeler nedeniyle varlık değer düşüklüğü gibi, işletme için finansal sonuçlar doğurabilir.

Aşağıdaki şekil TSRS 2'nin Kapsam adlı bölümünü şematize etmektedir.



Şekil 3: TSRS 2'nin Kapsamı

TSRS 2 işletmenin iklimle ilgili açıklayacağı risk ve fırsatların yine TSRS 1'dekine paralel olarak asgari olarak 4 başlık altında (yönetişim, strateji, risk yönetimi, metrik ve hedefler) açıklanmasını öngörmektedir.

Yönetişim başlığı altında genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının, işletmenin iklimle ilgili risk ve fırsatları izlemek, yönetmek ve denetlemek için kullandığı yönetim süreçlerini, kontrollerini ve prosedürlerini anlamalarını sağlayacak bilgilerin açıklanması gerekmektedir.

Standardın **strateji** başlığı altında genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının, işletmenin iklimle ilgili risk ve fırsatları yönetme stratejisini anlamalarını sağlayacak bilgilerin açıklanması gerekmektedir. Yine bu başlık altında iklim dirençliliği kavramının anlaşılması önemlidir. İklim dirençliliği Standartta şu şekilde tanımlanmıştır:

"İşletmenin, iklimle ilgili değişikliklere, gelişmelere veya belirsizliklere uyum sağlama kapasitesidir. İklim dirençliliği, iklimle ilgili geçiş risklerine ve iklimle ilgili fiziksel risklere karşılık verme ve bunlara adaptasyon sağlama yeteneği de dâhil olmak üzere, iklimle ilgili riskleri yönetme ve iklimle ilgili fırsatlardan yararlanma kapasitesini içerir. Bir işletmenin iklim dirençliliği; iklimle ilgili değişiklik, gelişme ve belirsizliklere karşı hem stratejik dirençliliğini hem de operasyonel dirençliliğini içerir.

Bu noktada senaryo analizi kavramı öne çıkmaktadır. Standardın 22'nci paragrafında şu ifade yer almaktadır:

"İşletme, genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının; işletmenin stratejisi ile iş modelinin iklimle ilgili değişiklik, gelişme ve belirsizliklere karşı dirençliliğini -işletmenin iklimle ilgili belirlenmiş risk ve fırsatlarını da dikkate alarak- anlamalarını sağlayan bilgileri açıklar. İşletme, içinde bulunduğu şartlarla orantılı bir yaklaşım kullanarak, iklim dirençliliğini değerlendirmek amacıyla iklimle ilgili senaryo analizini kullanır."

TSRS 2 kapsamında işletmelerin iklim değişikliğiyle ilgili risk ve fırsatlara karşı strateji ve iş modellerinin ne derece dayanıklı olduğunu değerlendirmeleri beklenir. Bu çerçevede, işletmelerin iklim senaryo analizi kullanarak kısa, orta ve uzun vadede karşılaşılabilecekleri iklimle ilgili gelişmeleri dikkate alması önemlidir. Senaryo analizi, işletmenin mevcut kaynaklarının esnekliğinden yatırım planlarına, fiziksel ve geçiş risklerine karşı adaptasyon kapasitesine kadar birçok unsuru değerlendirir. Ayrıca kullanılan senaryoların içeriği, kaynakları, zaman dilimleri ve yapılan varsayımlar gibi yönetsel bilgiler de açıklanmalıdır. Böylece, genel amaçlı finansal rapor kullanıcıları işletmenin iklim risklerine karşı ne ölçüde hazırlıklı olduğunu ve stratejik uyum kapasitesini daha net bir şekilde görebilir.

Risk yönetimine ilişkin iklimle ilgili finansal açıklamaların amacı, genel amaçlı finansal raporların kullanıcılarının, işletmenin iklimle ilgili risk ve fırsatları belirleme, değerlendirme, önceliklendirme ve izleme süreçlerinin işletmenin genel risk yönetimi sürecine entegre edilip edilmediği, edildiyse nasıl entegre edildiği ve genel risk yönetimi sürecine nasıl bilgi verdiği de dâhil olmak üzere, söz konusu süreçleri anlamalarını sağlayacak bilgilerin açıklanmasıdır.

Metrik ve hedefler başlığı altında açıklanacak metrikler ve hedefler aşağıdaki tabloda açıklanmıştır:

Sektörler-arası metrikler	Sektör bazlı metrikler	Hedefler
Sera gazı emisyonları	TSRS 2'nin Sektör Bazlı Uygulanmasına İlişkin Rehber (SASB'den türetilmiştir)	Hedefi belirlerken kullanılan metrik
Geçiş riskleri		Hedefin amacı
Fiziksel riskler		Hedefin geçerli olduğu işletme bölümü
İklimle ilgili fırsatlar		Hedefin geçerli olduğu dönem
Sermaye dağıtımı		İlerlemenin ölçüldüğü baz dönem
İç karbon fiyatları		Dönüm noktaları ve ara hedefler

Sektörler-arası metrikler	Sektör bazlı metrikler	Hedefler
Ücretlendirme		Mutlak hedef ya da yoğunluk hedefi
		İklim değişikliğiyle ilgili en güncel uluslararası anlaşmanın hedefi nasıl şekillendirdiği

Bu noktada özellikle sektörler-arası metrik kategorilerinde yer alan kavramların TSRS 2’de ne anlama geldiklerinin kısaca açıklanması gerekmektedir. Bu kapsamda;

- Sera gazı emisyonları, Kapsam 1, 2 ve 3 sera gazı emisyonlarından oluşur. Kapsam 1 emisyonları, bir işletmenin sahip olduğu veya kontrol ettiği kaynaklardan ortaya çıkan doğrudan sera gazı emisyonlarıdır. Kapsam 2 emisyonları, işletme tarafından tüketilen satın alınmış veya edinilmiş elektriğin, buharın, ısıtmanın veya soğutmanın üretiminden kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonlarıdır. Kapsam 3 emisyonları ise hem yukarı hem de aşağı yönlü emisyonlar dâhil olmak üzere, işletmenin değer zincirinde ortaya çıkan dolaylı sera gazı emisyonlarıdır ve buna Kapsam 2 sera gazı emisyonları dâhil değildir.
- Sermaye dağıtımı, iklimle ilgili risk ve fırsatlara yönelik dağıtılan sermaye harcaması, finansman veya yatırım miktarını ifade eder.
- İç karbon fiyatı, işletme tarafından; yatırım, üretim ve tüketim modellerindeki değişikliklerin doğuracağı finansal sonuçlar ile potansiyel teknolojik ilerlemenin ve gelecekteki emisyon azaltım maliyetlerinin doğuracağı finansal sonuçları değerlendirmek amacıyla kullanılan fiyattır.
- Ücretlendirme ise iklimle ilgili hususların yönetici ücretlerine dâhil edilip edilmediğine ilişkin bir kavram olup açıklanması gereken bir husustur.

“TSRS 2’nin Sektör Bazlı Uygulanmasına İlişkin Rehber” ise Sürdürülebilirlik Muhasebesi Standartları Kurulu (SASB) tarafından yayımlanmış ve KGK tarafından mevzuatımıza kazandırılmış 68 adet sektöre özgü metriklerin yer aldığı bir rehberlik kaynağıdır.

TSRS 2, işletmenin gelecekteki finansal yeterliliğini etkilemesi beklenen iklimle ilgili risk ve fırsatları açıklamasını zorunlu kılan bir sürdürülebilirlik raporlama standardıdır. Bu standart, işletmelerin iklimle ilgili yönetim, strateji, risk yönetimi ile metrik ve hedeflerini şeffaf bir şekilde ortaya koymasını sağlar. Amaç, genel amaçlı finansal rapor kullanıcılarının işletmenin iklim değişikliği karşısındaki dayanıklılığını ve uzun vadeli değer yaratma kapasitesini anlayabilmesidir.

1.3.4 TSRS Uygulama Kapsamı

TSRS’lerin uygulama kapsamı ve eşik değerler 29 Aralık 2023 tarihli ve 32414 sayılı Resmî Gazete’de (Mükerrer) yayımlanan 21634 sayılı ve 18 Aralık 2024 tarihli ve 32756 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan 28294 sayılı Kurul Kararları ile belirlenmiştir. İlgili Kurul Kararlarında aşağıdaki şirketler sayılmıştır:

a) 6362 sayılı Kanun uyarınca Sermaye Piyasası Kurulunun düzenleme ve denetimine tabi şirketlerden;

- Yatırım kuruluşları,
- Kolektif yatırım kuruluşları,
- İpotek finansmanı kuruluşları,
- Merkezi takas kuruluşları,
- Merkezî saklama kuruluşları,
- Veri depolama kuruluşları,
- Payları Borsa İstanbul A.Ş.'nin Yakın İzleme Pazarı'nda ve nitelikli yatırımcılara satılmak üzere Girişim Sermayesi Pazarı'nda işlem gören ortaklıklar hariç olmak üzere Borsa pazarlarında işlem gören ortaklıklar.

b) 5411 sayılı Bankacılık Kanunu uyarınca Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumunun düzenleme ve denetimine tabi işletmelerden;

- Bankalar,
- Derecelendirme kuruluşları,
- Finansal holding şirketleri,
- Finansal kiralama şirketleri,
- Faktoring şirketleri,
- Finansman şirketleri,
- Varlık yönetim şirketleri,
- Finansal holding şirketlerinde ve bankalarda 5411 sayılı Kanunda tanımlandığı şekliyle nitelikli paya sahip olan şirketler,
- Tasarruf finansman şirketleri

c) 5684 sayılı Sigortacılık Kanunu ile 4632 sayılı Bireysel Emeklilik Tasarruf ve Yatırım Sistemi Kanunu kapsamında faaliyet göstermekte olan sigorta, reasürans ve emeklilik şirketleri.

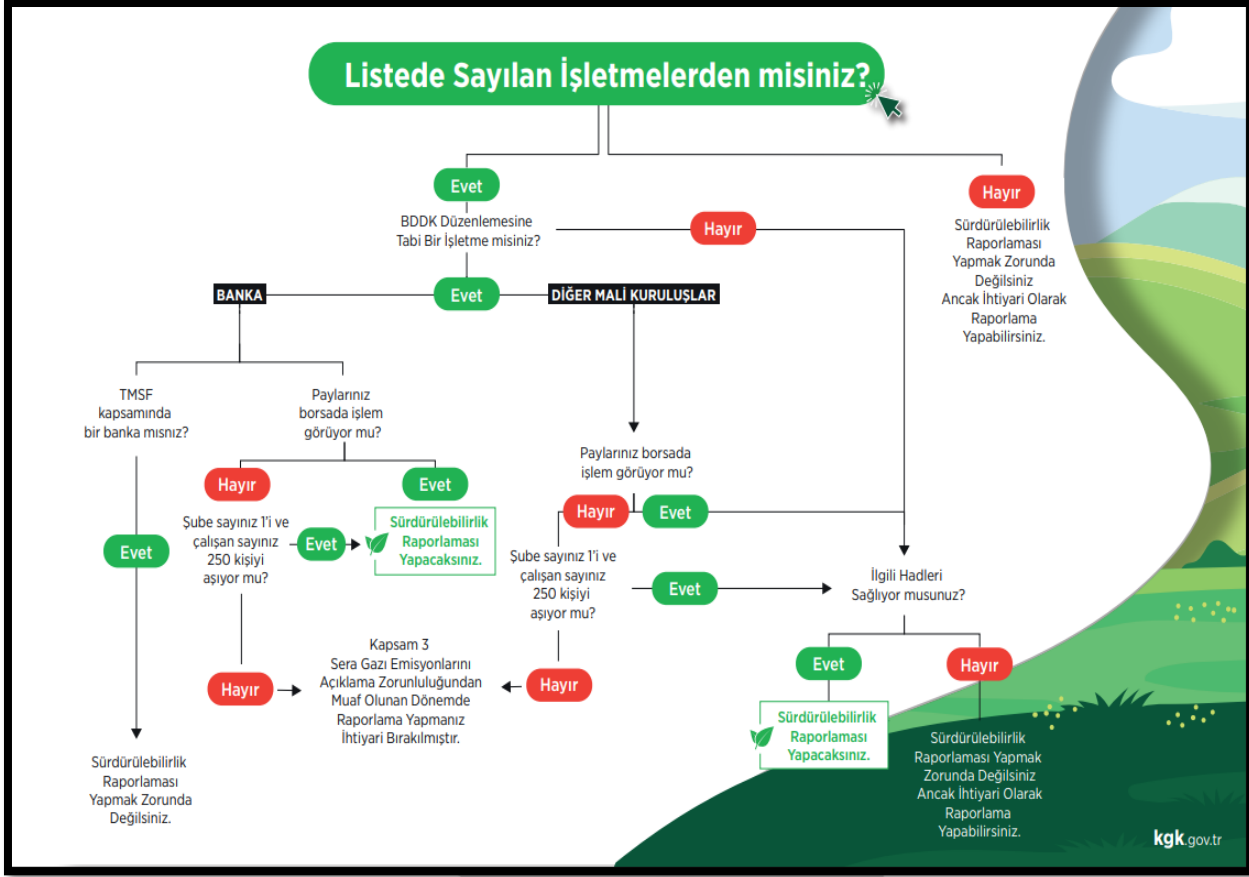
ç) Borsa İstanbul Piyasalarında faaliyet göstermesine izin verilen; yetkili müesseseler, kıymetli madenler aracı kurumları, kıymetli maden üretimi veya ticaretiyle iştigal eden şirketler.

Belirlenen eşik değerle ise şu şekildedir:

- Aktif toplamı 500 Milyon Türk Lirası
- Yıllık net satış hasılatı 1 Milyar Türk Lirası
- Çalışan sayısı 250 kişi

Bu ölçütlerden en az ikisinin eşik değerlerini art arda iki raporlama döneminde aşan işletmeler zorunlu uygulama kapsamına dâhildir. Borsa İstanbul A.Ş.'de payları işlem görenler haricinde, bir önceki yıl sonu itibarıyla şube sayısı 1'i ve çalışan sayısı 250'yi aşan bankalar herhangi bir eşik değere tabi olmadan uygulama kapsamındadır. TMSF bünyesinde yer alan bankalar ise uygulama kapsamı dışındadır.

TSRS uygulama kapsamında olup olunmadığına ilişkin KGK tarafından hazırlanan karar ağacı yukarıdakileri özetler niteliktedir:



Şekil 2: Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS) Uygulama Kapsamına İlişkin Karar Ağacı

1.3.5 Sonuç: TSRS'ler ve Beklenen Etkiler:

Kurumsal sürdürülebilirlik raporlaması, günümüzde yatırımcılar ve diğer paydaşlar için işletmelerin şeffaflık ve ÇSY performansının temel göstergelerinden biri haline gelmiştir. Finansal olmayan konuların, işletmelerin değer oluşturma kapasitesini ve finansal yapılarını doğrudan etkilediği görülmekte; bu nedenle sürdürülebilirlik raporları, işletmenin itibarı, inovasyon gücü ve kârlılığı açısından stratejik önem taşımaktadır.

TSRS'ler, işletmelerin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlarını, finansal önemlilik ilkesi çerçevesinde açıklamasını amaçlar. Böylece, sürdürülebilirlikle ilgili bilgilerin, yatırımcılar ve diğer finansal rapor kullanıcıları açısından karar alma sürecinde kullanılabilir ve karşılaştırılabilir olmasını hedefler. TSRS uyumlu sürdürülebilirlik

raporları, işletmelerin strateji, iş modeli ve değer yaratma yeteneklerinin raporlanmasını amaçlar. Böylece, piyasa aktörleri yalnızca işletmenin geçmiş performansını değil, aynı zamanda geleceğe yönelik projeksiyonunu da değerlendirebilir.

Uluslararası standartlarla uyumlu bir sürdürülebilirlik raporlaması, özellikle Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı gibi düzenlemeler bağlamında sınırda karbon düzenlemesi (CBAM) gibi mekanizmalara tabi olabilecek sektörlerde faaliyet gösteren işletmeler için stratejik bir avantaj yaratır. Ayrıca, TSRS'lerin sürdürülebilirlikle ilgili konuların işletmenin finansallarına olan etkisinin raporlanmasını gerektirmesi, işletmenin çevresel veya sosyal konulardaki risklerini sadece etik bir sorumluluk olarak değil, doğrudan finansal performansını etkileyebilecek unsurlar olarak ele aldığını gösterir.

TSRS'lere uyum süreci, işletmelerin kendi faaliyetlerindeki iklimle ve diğer sürdürülebilirlik konularıyla ilgili risk ve fırsatları sistematik biçimde belirlemelerine, ölçmelerine ve yönetmelerine olanak tanır. Bu durum iç kontrol sistemlerinin gelişmesini, uzun vadeli stratejik planlamanın daha bütüncül yapılmasını ve finansal kaynaklara erişimin kolaylaşmasını sağlar.

TSRS'ler işletmelerin yalnızca cari dönemde karşılaştığı riskleri değil, gelecek dönemlerde karşılaşılabileceği risklerin raporlanmasını öngörür. Bu yönüyle TSRS'ler yalnızca tarihi finansal bilgilerin değil, gelecek döneme ait beklenen finansal etkilerin de raporlanmasını gerektirmektedir. Buradaki amaç sürdürülebilirlik konularıyla finansal tablolar arasındaki bağlantıyı kurmaktır. Burada basit bir örnek vermekte fayda vardır. Tarım ilacı üreten A işletmesinin ürünlerinde kullandığı bir bileşenden dolayı devletin bu ürünün üretimini yasaklaması sonucu işletme üretimini durdurma kararı almıştır. Bu durumda A işletmesi mevcut düzenleyici risk sebebiyle finansal tablolarında değer düşüklüğü zararı yansıtacaktır. Bu, cari dönemde karşılaşılabilecek risklerin açıklanmasına ilişkin örnek teşkil etmektedir. Gelecekte beklenen finansal etkilerin açıklanmasına ilişkin ise şu örnek verilebilir: B işletmesinin dizel yakıtlı araç filosunu 3 yıl içerisinde elektrikli araçlarla değiştirme planının olduğu varsayımıyla bu geçiş planının işletmenin gelecekteki finansal durumunu nasıl etkileyeceğinin, bu plan için ne kadar yatırım harcamasının yapılacağını, nakit akışlarının nasıl değişeceğini açıklanması gerekecektir. İşletme bu açıklamaları yaparken kendi muhakemesiyle belirleyeceği zaman dilimleriyle açıklaması gerekmektedir. Son olarak bu noktada, özellikle sayısal tahminlerin belirlenmesinin çok zor olması veya ölçümde aşırı belirsizlik olması durumunda TSRS'ler sayısal bilgilerin açıklanmasını zorunlu tutmamakla birlikte bu bilgilerin neden verilemediğinin ve söz konusu finansal etkilere ilişkin nitel bilgilerin açıklanmasını zorunlu kılmaktadır.

TSRS'lere uygun olarak hazırlanacak sürdürülebilirlik raporları sermaye piyasalarının daha güvenilir, hesap verebilir ve sürdürülebilirlik odaklı hale gelmesinde önemli rol oynayacaktır. ÇSY konularıyla ilgili risk ve fırsatların,

işletmenin finansal yeterliliği üzerindeki potansiyel etkilerinin açıklandığı TSRS uyumlu sürdürülebilirlik raporlarının doğru, tam ve güvenilir bilgi sunması, yatırımcıların ve diğer finansal rapor kullanıcılarının sağlıklı kararlar alabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Raporlama sürecinde açıklanan bilgilerin güvenilirliği, söz konusu raporun genel amaçlı finansal rapor kullanıcılarının karar alma sürecindeki geçerliliğini ve piyasa nezdindeki değerini artırır. Bu güvenilirlik düzeyine ise ancak bağımsız bir üçüncü tarafça yürütülen güvence denetimi ile ulaşılabilir; zira bu denetim süreci, açıklamaların doğruluğunu objektif biçimde değerlendirme imkânı sunar.

Güvence denetimi, denetçinin sürdürülebilirlik raporlamasına konu bilgilerin, içinde bulunulan şartlar çerçevesinde önemli yanlışlık içerip içermediği konusunda makul veya sınırlı düzeyde güvence elde etmesini; bu kapsamda denetim konusunun ölçüm veya değerlendirme sonuçlarına ilişkin bulgularını bir güvence raporu aracılığıyla açıklamasını ve ilgili diğer tüm güvence denetim standartlarına uygun zorunlu bildirimleri gerçekleştirmesini amaçlar. Avrupa Birliği ülkeleri olmak üzere birçok ülkede güvence denetimlerinin kademeli biçimde zorunlu hale getirildiği görülmektedir. Bu geçiş sürecinde, ilk aşamada sınırlı güvence sağlanmakta, zamanla ise yerini makul güvence düzeyine bırakacak düzenlemeler yapılmaktadır. Benzer şekilde, KGK'nın almış olduğu Kurul Kararıyla Türkiye'de de sürdürülebilirlik raporlamasına ilişkin güvence denetimlerinin zorunlu hale getirilmesine karar verilmiş olup, uygulamanın sınırlı güvenceyle başlatılması öngörülmüştür.

Sürdürülebilirlik raporlamasında öncü ülkelerden biri olan Türkiye, bu konuda hızlı ve emin adımlarla ilerlemektedir. Bu itibarla KGK uluslararası standartlarla uyumlu, karşılaştırılabilirliği ve şeffaflığı yüksek sürdürülebilirlik raporlama çerçevesi olan TSRS'leri yayımlamıştır. Ayrıca sürdürülebilirlik raporlamasının kalitesine yönelik artan beklentileri karşılamak amacıyla güvence denetimlerini yapacak kişi ve kuruluşlara ilişkin yetkinlik kriterlerinin belirlenmesi ve bu denetimleri üstlenecek bağımsız denetim kuruluşlarının ve bağımsız denetçilerin yetkilendirilmesi sağlanmaktadır. Yine KGK tarafından belirlenen hedefler çerçevesinde ilgili paydaşlar tarafından daha sağlıklı ticari ve iktisadi kararların alınması amacıyla dijital raporlamaya yönelik altyapı oluşturulacak ve sürdürülebilirlik raporlamasına yönelik farkındalığı artırmak ve uygulamada kaliteyi yükseltmek amacıyla ilgili kurum ve sivil toplum kuruluşlarıyla iş birliği yapılmaya devam edilecektir.

REFERANSLAR:

Finansal Raporlamaya İlişkin Kavramsal Çerçeve (2018 Sürümü)
<https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Duyurular/v2/Surdurulebilirlik/Duyuru/KAPSAM.pdf>

Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurulunun 27 Aralık 2023 tarihli ve 21634 Sayılı Kurul Kararı
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/12/20231229M1-10.pdf>

Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurulunun 16 Aralık 2024 tarihli ve 28294 Sayılı Kurul Kararı
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/12/20241218-6.pdf>

Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurulunun 25 Haziran 2025 tarihli ve 33130 Sayılı Kurul Kararı
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/07/20250716-3.pdf>

Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler'e İlişkin Karar Gerekçeleri

https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Duyurular/v2/Surdurulebilirlik/RaporlamaStandarti/TSRS%201_Karar%20Gerek%C3%A7eleri.pdf

T.C. Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (2023). Soru ve Cevaplarla Sürdürülebilirlik Raporlaması

https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Sustainability/Soru_ve_Cevaplarla_Surdurulebilirlik_Raporlamasi_30_05_2023-.pdf

TSRS 1 Sürdürülebilirlikle İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler Standardı
[https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Duyurular/v2/Surdurulebilirlik/RaporlamaStandarti/TSRS%201\(1\).pdf](https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Duyurular/v2/Surdurulebilirlik/RaporlamaStandarti/TSRS%201(1).pdf)

TSRS 2 İklimle İlgili Açıklamalar Standardı

https://www.kgk.gov.tr/Portalv2Uploads/files/Duyurular/v2/Surdurulebilirlik/RaporlamaStandarti/TSRS_2.pdf

1.4 MRV Altyapısı: İzleme, Raporlama, Doğrulama Sistemleri

1.4.1 MRV Sistemlerinin Teorik Temelleri

1.4.2 MRV Kavramının Tanımı Ve Bileşenleri

MRV; Monitoring (İzleme), Reporting (Raporlama) ve Verification (Doğrulama) kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Bu sistem, özellikle sera gazı emisyonlarının ölçümü ve iklim politikalarının takibi konusunda hem ulusal hem de uluslararası düzeyde kritik öneme sahiptir.

MRV sisteminin üç temel bileşeni şu şekilde tanımlanır:

İzleme (Monitoring): Emisyonlar, enerji kullanımı, azaltım projeleri veya uyum eylemleri gibi unsurların belirli göstergeler üzerinden sürekli veya periyodik olarak ölçülmesi, hesaplanması ve kaydedilmesidir.

Raporlama (Reporting): İzleme verilerinin, önceden tanımlanmış format ve zaman çizelgelerine uygun olarak sistematik biçimde düzenlenmesi ve ilgili kurumlara veya uluslararası platformlara sunulmasıdır.

Doğrulama (Verification): Raporlanan verilerin, bağımsız bir üçüncü taraf veya yetkili kurumlar tarafından geçerliliğinin ve güvenilirliğinin denetlenmesidir.

Bu üç bileşen, birlikte çalıştığında, iklimle ilgili politika ve projelerin etkili şekilde izlenmesini, şeffaf bir şekilde değerlendirilmesini ve ulusal katkı beyanlarının (NDC) uygulanabilirliğini mümkün kılar.

1.4.3 Yasal ve Politik Bağlamda MRV'nin Rolü

MRV sistemleri yalnızca teknik izleme mekanizmaları değildir; aynı zamanda uluslararası yükümlülüklerin karşılanması, karbon piyasalarına katılım, iklim finansmanına erişim ve politika geri beslemesi açısından kritik bir yönetim aracıdır.

Paris Anlaşması ve Şeffaflık Çerçevesi: Paris Anlaşması ile birlikte, ülkelerin sundukları Ulusal Katkı Beyanlarının (NDC) uygulanması için güçlü ve karşılaştırılabilir MRV altyapılarına sahip olması zorunlu hale gelmiştir. Anlaşmanın şeffaflık çerçevesi, ülkelerin her iki yılda bir "iklim eylem raporu" sunmasını şart koşar.

Türkiye'nin Konumu: Türkiye, Paris Anlaşması'nı 2021 yılında onaylamış ve bu kapsamda ulusal MRV kapasitesini geliştirme sürecine hız vermiştir. Özellikle Ulusal Sera Gazı Envanteri Sistemi, İklim Değişikliği Eylem Planları (İDEP) ve Enerji Verimliliği İzleme Sistemleri bu gelişimin temel yapı taşlarını oluşturur.

AB Mevzuatı ile Uyum: Avrupa Yeşil Mutabakatı ve AB İklim Yasası kapsamında, Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), Karbon Sınırdaki Düzenleme Mekanizması (CBAM) gibi araçlar MRV sistemlerinin varlığını ve güvenilirliğini ön koşul haline getirmiştir. Türkiye'nin bu yapılarla uyumlu hale gelmesi, hem dış ticaret ilişkileri hem de yeşil finansmana erişim açısından büyük önem taşımaktadır.

Politika Geliştirme: MRV sistemleri, sadece uygulama sonuçlarını izlemekle kalmaz; aynı zamanda bu sonuçları veri temelli analiz ederek, iklim politikalarının revizyonu ve yeni stratejilerin tasarımı için kanıta dayalı bir zemin oluşturur.

1.4.4 Mevcut Uygulamalar ve Örnekler

MRV sistemlerinin dünya genelinde farklı şekillerde uygulanıyor olması, ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadelede kurumsal kapasitelerine, yasal altyapılarına ve uluslararası bağlayıcılık düzeylerine göre şekillenmektedir. Bu bölümde Avrupa Birliği, Türkiye ve diğer bazı ülkelerdeki örnek uygulamalar incelenmektedir.

1.4.5 Avrupa Birliği'ndeki MRV Uygulamaları

Avrupa Birliği (AB), iklim politikalarında MRV sistemlerini zorunlu ve standartlaştırılmış bir yapı olarak uzun süredir uygulamaktadır. Özellikle AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU-ETS), bu alandaki en kapsamlı MRV mekanizmalarından biridir. 2005 yılında başlatılan sistem, aşağıdaki yapılar üzerine kuruludur:

Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Tüzüğü (MRR - Monitoring and Reporting Regulation): Tüm tesisler, yıllık emisyonlarını belirli metodolojilere göre izlemek ve AB Komisyonu'na raporlamakla yükümlüdür.

Doğrulama ve Akreditasyon Tüzüğü (AVR - Accreditation and Verification Regulation): Raporlar, akredite edilmiş bağımsız doğrulayıcı kuruluşlar tarafından kontrol edilerek geçerlilik kazanır.

CBAM (Karbon Sınırdaki Düzenleme Mekanizması): MRV sistemlerinin yalnızca AB içi değil, dış ticaret yoluyla ithal edilen mallar için de geçerli olması gerektiğini ortaya koyan, uluslararası etkili bir uygulamadır.

AB üyesi ülkeler ayrıca ulusal düzeyde SECAP (Sustainable Energy and Climate Action Plans) planları kapsamında belediyelere özgü MRV sistemlerini de kurumsallaştırmaktadır. Covenant of Mayors in Europe girişimi, bu konuda iyi örnekler sunmaktadır.

1.4.6 Türkiye'de MRV Uygulamaları

Türkiye'de MRV yapıları, özellikle sera gazı envanterleri ve iklim eylem planlarının izlenmesi süreçlerinde gelişmektedir. Ancak bu yapı henüz AB seviyesinde standartlaşmış değildir. Mevcut uygulamalar şunlardır:

Ulusal Sera Gazı Envanteri: TÜİK tarafından her yıl hazırlanan ve IPCC metodolojisiyle uyumlu olarak yayımlanan emisyon verileri, Türkiye'nin temel MRV çıktılarından.

İklim Değişikliği Eylem Planları (İDEP): Yerel ölçekte hazırlanan İDEP belgeleri, sınırlı ölçekte de olsa izleme ve raporlama araçları içermeye başlamıştır.

Enerji Verimliliği MRV Uygulamaları: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı olarak bazı sanayi tesislerinde enerji verimliliği yatırımları için MRV benzeri doğrulama süreçleri uygulanmaktadır.

SECAP Pilot Uygulamaları: Türkiye Belediyeler Birliği ve çeşitli belediyeler tarafından başlatılan pilot SECAP uygulamaları ile sera gazı envanteri hazırlanması ve izleme göstergeleri oluşturulmuştur.

Buna rağmen, doğrulama süreçlerinin bağımsız kurumsal yapılarla yürütülmesi henüz gelişim aşamasındadır. Doğrulayıcı kuruluşların akreditasyonu, özel sektörün MRV sistemlerine entegrasyonu gibi alanlarda gelişim fırsatları mevcuttur.

1.4.7 Diğer Ülke Örnekleri

istemlerini iklim politikalarının kalbinde konumlandırmış ve bu yapıları hem ulusal hem sektörel düzeyde yaygınlaştırmıştır. Öne çıkan bazı örnekler:

Güney Kore: Emisyon ticaret sistemine paralel olarak geliştirilen kapsamlı MRV altyapısı, her tesisten alınan verilerin merkezi bir dijital platformda toplanmasını sağlamaktadır. Doğrulayıcılar bağımsız akreditasyon ajansları tarafından denetlenmektedir.

Şili: UNDP iş birliğiyle geliştirilen Şili MRV Platformu, belediyelerin ve özel sektörün emisyon azaltım projelerini şeffaf şekilde izlemesine imkân tanımaktadır.

Hindistan: Performansa Dayalı Enerji Verimliliği MRV sistemi (PAT Scheme) ile büyük sanayi kuruluşları, izleme ve doğrulama süreçleri sonunda karbon kredisi kazanabilmektedir.

ABD: Environmental Protection Agency (EPA) tarafından yürütülen Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP), yıllık raporlama zorunluluğu olan sektörlerle yönelik kapsamlı bir MRV sistemidir.

1.4.8 MRV Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar

MRV sistemleri, iklim politikalarının şeffaflık, hesap verebilirlik ve etki değerlendirme kapasitelerini artırmak açısından hayati önemde olsa da, bu sistemlerin etkin şekilde uygulanması çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar genellikle teknik altyapı eksiklikleri, kurumsal koordinasyon yetersizlikleri ve sürdürülebilir finansman kaynaklarının sınırlılığı gibi başlıklarda toplanabilir.

1.4.8.1 Teknik Zorluklar

- **Veri Kalitesi ve Uyumsuzluğu:** Farklı kaynaklardan gelen verilerin format, kapsam ve güncellik bakımından uyumsuz olması; MRV sistemlerinin analiz kabiliyetini zayıflatmaktadır. Özellikle sera gazı emisyonu, enerji tüketimi ve atık verileri çoğu zaman bütüncül bir yapı içinde sunulmamaktadır.
- **Standartlaşma Eksikliği:** Ölçüm yöntemlerinin ve raporlama çerçevelerinin farklı kurumlar ve yerel yönetimler arasında standardize edilmemiş olması, verilerin karşılaştırılabilirliğini ve doğrulanabilirliğini azaltmaktadır.
- **Dijitalleşme Düzeyi:** MRV sistemlerinin büyük bölümü hâlâ manuel veya yarı dijital altyapılara dayanmaktadır. Gerçek zamanlı veri akışı sağlayan IoT destekli sistemlerin ve açık veri platformlarının eksikliği hissedilmektedir.
- **Yetkin İnsan Kaynağı:** Teknik yeterliliği olan veri yöneticileri, istatistikçiler ve doğrulayıcı uzman sayısı sınırlıdır. Belediyelerde bu alanda görevli personel yetersizliği yaygındır.

1.4.8.2 Kurumsal ve Yönetişim Zorlukları

- **Kurumsal Koordinasyon Eksikliği:** MRV sistemlerinin başarısı, enerji, çevre, ulaşım, sanayi gibi çok sayıda kurumun veri paylaşımı ve koordinasyonuna bağlıdır. Bu kurumlar arasında yeterli iletişim ve veri paylaşım protokollerinin olmaması uygulamayı zorlaştırmaktadır.
- **Yetki Dağınıklığı:** MRV'ye dair görev ve sorumlulukların kurumsal yapı içinde netleştirilmemesi, uygulamada çakışmalara veya boşluklara yol açmaktadır.
- **Yasal Zorunlulukların Zayıflığı:** Türkiye'de birçok MRV uygulaması rehberler veya pilot projelerle sınırlı kalmakta, bağlayıcı mevzuat eksikliği nedeniyle yaygınlaşma göstermemektedir.
- **Politika Sahiplenme Eksikliği:** Üst düzey yöneticilerin MRV'yi sadece teknik bir raporlama aracı olarak görmesi, bu sistemlerin stratejik politika geliştirme süreçlerine entegre edilmesini engellemektedir.

1.4.8.3 Finansal Zorluklar

- Sabit Bütçe Kaynaklarının Yetersizliği: MRV sistemlerinin kurulumu, işletilmesi ve doğrulama süreçlerinin sürdürülebilir şekilde yürütülebilmesi için gerekli finansal kaynaklar çoğu kamu kurumunda bulunmamaktadır.
- Proje Bazlı Finansman Bağımlılığı: MRV çalışmaları çoğu zaman dış fonlarla (örneğin AB projeleri, UNDP, GEF hibeleri) yürütülmektedir. Bu durum uzun vadeli yapısal dönüşüm yerine geçici çözümler üretmektedir.
- Doğrulama Maliyetleri: Bağımsız doğrulama hizmetlerinin yüksek maliyetli olması, özellikle küçük belediyeler veya özel sektör KOBİ'leri için MRV sistemlerine katılımı zorlaştırmaktadır.
- Dijital Altyapı Yatırımları: Sensörler, yazılımlar, bulut tabanlı veri merkezleri gibi teknolojik altyapıların maliyeti, MRV sistemlerinin kurumsallaşmasını sınırlayan başlıca faktörlerden biridir.

1.4.9 Geleceğe Yönelik Stratejiler

MRV sistemlerinin sürdürülebilir ve etkili şekilde uygulanabilmesi için sadece mevcut sorunları çözmek değil; aynı zamanda geleceği şekillendirecek stratejik adımlar atmak gerekmektedir. Bu bölümde, dijital dönüşümden finansmana, uluslararası işbirliklerinden hukuki altyapıya kadar MRV sistemlerinin gelecekteki güçlenme alanları ele alınmaktadır.

1.4.10 Dijitalleşme ve İnovasyon

- Akıllı sensörler, IoT (Nesnelerin İnterneti) ve bulut tabanlı veri yönetim sistemleri, MRV uygulamalarının otomatik, gerçek zamanlı ve düşük hata payıyla yürütülmesini mümkün kılmaktadır.
- Yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları ile veri kalitesinin artırılması, anomali tespiti ve doğrulama süreçlerinde otomatize çözümler geliştirilmesi mümkündür.
- Dijital ikiz modeller, özellikle büyük sanayi tesisleri ve şehir düzeyinde karbon ayak izinin simülasyonu açısından gelecekte MRV'nin ayrılmaz bir parçası olacaktır.
- Açık kaynak tabanlı yazılımların ve blokzincir teknolojilerinin doğrulama süreçlerinde kullanılması, veri güvenliği ve şeffaflık açısından fırsatlar sunmaktadır.

1.4.11 Kapasite Geliştirme

- MRV süreçlerini yürütecek teknik personelin eğitimi, yerel yönetimlerde ve özel sektörde uzman havuzu oluşturulması, sistemin başarısı için ön koşuldur.
- Eğitim modülleri, sertifika programları ve uzaktan eğitim platformları, yetkinliğin yaygınlaştırılmasında etkili araçlardır.
- Belediyeler, organize sanayi bölgeleri ve STK'lar arasında bilgi ve deneyim paylaşımına dayalı bölgesel kapasite geliştirme ağları kurulmalıdır.

1.4.12 Uluslararası İşbirliği

- AB Yeşil Mutabakatı, UNFCCC Şeffaflık Çerçevesi ve COP kararları kapsamında uluslararası MRV standartlarına uyum, hem dış politika hem de iklim finansmanı açısından stratejiktir.

- Türkiye'nin SECAP, Covenant of Mayors, LIFE, Horizon Europe ve GEF destekli projelere daha fazla entegre olması; MRV uygulamalarında ileri örneklerle karşılıklı öğrenmeyi kolaylaştıracaktır.
- Twinning ve TAİEX programları, kamu kurumlarının AB'deki muadil kuruluşlarla işbirliği kurarak MRV kapasitesini geliştirmesi için uygun zemin sağlama

1.4.13 Finansal Sürdürülebilirlik

- MRV sistemlerinin sadece proje bazlı hibelerle değil, ulusal bütçe kaynakları ve düzenli finansman mekanizmaları ile desteklenmesi gerekmektedir.
- Karbon vergisi, emisyon ticareti sistemi gibi piyasa temelli mekanizmalar, MRV sistemlerini fonlamada hem doğrudan hem dolaylı kaynak sağlayabilir.
- Yeşil finansman, sürdürülebilir tahviller ve çevresel-sosyal-yönetişim (ESG) endeksleri ile entegre MRV altyapıları, özel sektör için de teşvik edici olabilir.
-

1.4.14 Politik ve Hukuki Çerçevenin Güçlendirilmesi

- Türkiye'de MRV sistemleri için bağlayıcı mevzuat eksikliği, sistemlerin kurumsallaşmasının önündeki başlıca engellerdendir. Bu nedenle:
 - MRV uygulamaları için yasal zorunluluk getirilmesi,
 - Doğrulayıcı kuruluşların akreditasyon sisteminin kurulması,
 - Belediyeler için standart MRV formatlarının tanımlanması gerekmektedir.
- Politika yapıcılarının MRV'yi yalnızca teknik bir işlem olarak değil, stratejik yönetim ve etki değerlendirme aracı olarak sahiplenmeleri gerekmektedir.
- Tüm bu adımlar, Türkiye'nin hem Paris Anlaşması yükümlülüklerini yerine getirmesi hem de AB ile olan çevresel entegrasyonunu derinleştirmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

1. **UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)**. (2018). *Handbook on Measurement, Reporting and Verification for Developing Country Parties*. Bonn, Almanya. <https://unfccc.int>
2. **European Commission**. (2021). *Regulation on the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions (MRR)*. Official Journal of the European Union. <https://ec.europa.eu/clima>
3. **European Commission**. (2023). *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) – Practical Guidance for Importers*. <https://taxation-customs.ec.europa.eu>
4. **TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**. (2024). *Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu*. Ankara. <https://www.tuik.gov.tr>
5. **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**. (2022). *İklim Değişikliği Eylem Planı Rehberi (İDEP)*. Ankara.

6. **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2023). *Enerji Verimliliği İzleme ve Raporlama Kılavuzu*. Ankara.
<https://enerji.gov.tr>
7. **OECD.** (2020). *MRV Systems in Climate Policy: Overview and Best Practices*. OECD Environment Working Papers, No. 167.
<https://www.oecd.org>
8. **Greenhouse Gas Protocol.** (2015). *Corporate Standard for GHG Accounting and Reporting*. World Resources Institute & WBCSD.
<https://ghgprotocol.org>
9. **World Bank.** (2021). *MRV in Emerging Economies: Pathways to Implementation*. Washington, D.C.
10. **Covenant of Mayors Europe.** (2023). *Monitoring and Reporting Guidelines for SECAPs*. Brussels.
<https://eu-mayors.ec.europa.eu>
11. **UNDP & Government of Chile.** (2020). *Chile's MRV Platform for Climate Action*.
<https://www.climateactiontransparency.org>
12. **Republic of Korea Ministry of Environment.** (2022). *K-ETS MRV Guidelines and Best Practices*.
13. **Environmental Protection Agency (EPA).** (2023). *Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP)*.
<https://www.epa.gov/ghgreporting>



2. Esg & Dijital Dönüşüm Entegrasyonu

2.1 ESG ve Dijital Dönüşüm Kavramlarının Kesişimi

2.1.1 Neden ESG × Dijital Dönüşüm?

Günümüz iş dünyasında ESG (çevresel, sosyal ve yönetim) faktörleri ile dijital dönüşümün birlikte ele alınması, kurumsal sürdürülebilirlik ve rekabet üstünlüğü açısından stratejik bir zorunluluk haline gelmektedir. ESG uygulamaları, kaynak verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek, riskleri azaltmak ve paydaş güvenini güçlendirmek suretiyle uzun vadeli değer yaratımına hizmet etmektedir. Buna paralel olarak dijital dönüşüm; büyük veri analitiği, Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojilerin yönetim süreçlerine entegre edilmesiyle, operasyonel verimlilik ve yenilikçi iş modeli üretiminde kaldıraç etkisi yaratmaktadır. Bu iki alanın kesişiminde oluşan sinerji, hem ESG performansının iyileştirilmesini hem de kurumsal dönüşümün hızlandırılmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 1 : ESG Bileşenlerinin Dijital ile Entegrasyonu

2.1.1.1 ESG, Dijital Dönüşüm ve Yeşil İnovasyonun Rolü

Qing ve Jin (2023) tarafından yürütülen çalışma, Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) uygulamalarının şirketlerin kaynaklarını daha etkin kullanmalarına olanak tanıyarak sürdürülebilir bir rekabet avantajı sağladığını ortaya koymaktadır. Araştırma, dijital dönüşümün yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda yönetim süreçlerini dönüştüren ve yeni iş modellerinin geliştirilmesini kolaylaştıran stratejik bir unsur olduğunu vurgulamaktadır. ESG uygulamalarıyla entegre edildiğinde dijital dönüşüm, kurumsal sürdürülebilirlik üzerinde çarpan etkisi yaratmakta ve şirketlerin uzun vadeli değer üretme kapasitesini güçlendirmektedir.

Çalışmada ayrıca yeşil inovasyonun moderatör rolü üzerinde durulmaktadır. Büyük veri analitiği, Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim ve yapay zekâ gibi dijital teknolojiler, değer yaratma mantığını köklü bir şekilde değiştirerek enerji verimliliğini artırmakta, karbon emisyonlarını azaltmakta ve çevresel performansı desteklemektedir. Bu yönüyle yeşil inovasyon, dijitalleşme ve ESG uygulamaları arasında kritik bir köprü işlevi görmektedir.

Bununla birlikte, dijitalleşmenin sağladığı avantajlar her zaman kısa vadede görünür hale gelmemektedir. İlk yatırım maliyetlerinin yüksekliği, organizasyonel adaptasyon süreçlerinin karmaşıklığı, veri yönetimi ve siber güvenlik gibi faktörler, ESG kazanımlarının hemen ölçülmesini zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle, dijital dönüşümden beklenen faydaların ortaya çıkabilmesi için şu yapısal koşulların güçlendirilmesi gerekmektedir:

- Ölçülebilir hedefler: ESG performans göstergelerinin net ve somut olarak tanımlanması, şirketlerin ilerlemesini şeffaf şekilde takip etmeyi mümkün kılar.
- Şeffaf raporlama: Paydaşların güvenini artırmak için düzenli ve karşılaştırılabilir ESG raporlamalarının yapılması önem taşır.
- Kurumsal yönetim: Bağımsız denetim mekanizmaları ve etkin gözetim süreçleri, ESG ve dijital dönüşüm stratejilerinin güvenilirliğini pekiştirir.

2.1.1.2 Türkiye Bağlamı: 2053 Net Sıfır Hedefi ve Yeşil Mutabakat

Türkiye, 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi kapsamında düşük karbonlu kalkınma yol haritasını benimsemiş ve bu doğrultuda Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021) ile kritik adımlar atmıştır. Bu strateji, karbon emisyonlarının azaltılması, döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaştırılması ve dijitalleşmenin sanayi politikalarıyla bütünleşmesi üzerine inşa edilmiştir.

Bu bağlamda:

- Yeşil inovasyon, Türkiye'nin sanayide düşük karbon teknolojilerine geçişinde temel bir araçtır. Özellikle enerji, ulaşım, imalat ve tarım sektörlerinde dijitalleşme ile entegre edilen yeşil inovasyon uygulamaları, emisyon azaltımında kritik rol oynamaktadır.
- Dijital dönüşüm, enerji verimliliği ve karbon ayak izi hesaplamalarında şeffaflık sağlamak için kullanılmakta; şirketler, dijital raporlama ve izleme sistemleriyle hem ulusal hem de uluslararası yükümlülüklerle uyum sağlamaktadır.
- ESG kriterleri, Türkiye'de Borsa İstanbul Sürdürülebilirlik Endeksi ve SPK'nın sürdürülebilirlik raporlama çerçevesi aracılığıyla kurumsal yönetim anlayışına giderek daha fazla entegre edilmektedir.

Sonuç olarak, ESG, dijital dönüşüm ve yeşil inovasyonun birlikte ele alınması yalnızca küresel sürdürülebilirlik trendleriyle uyum sağlamak için değil, aynı zamanda Türkiye'nin 2053 Net Sıfır vizyonuna ulaşması için de kritik bir stratejik gereklilik haline gelmiştir.

2.1.2 Enerji/Kamu Hizmetlerinde Dijitalleşmenin Performansa Etkisi

Wang ve Xia (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışma, özellikle **enerji** ve **kamu hizmetleri** sektörlerinde dijital dönüşümün işletme performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Araştırma bulguları, dijital teknolojilerin süreç optimizasyonu yoluyla verimliliği artırdığını, maliyetleri düşürdüğünü ve aynı zamanda iç kontrol ile inovasyon süreçlerini sistematik olarak güçlendirdiğini ortaya koymaktadır.

Dijitalleşme yalnızca operasyonel performansı değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerini de doğrudan etkilemektedir. Çalışmada, karbon emisyon ticareti sistemleri ve bölgesel çevresel düzenlemeler gibi politika çerçeveleri ile dijital teknolojilerin etkileşim içinde olduğu ve bu sinerjinin sürdürülebilirlik hedeflerine ilerleyişi hızlandırabildiği vurgulanmaktadır. Örneğin; dijital veri toplama ve analiz sistemleri, karbon emisyonlarının ölçülmesini ve raporlanmasını kolaylaştırarak, şirketlerin çevresel regülasyonlara daha etkin uyum sağlamasına imkân tanımaktadır.

Bununla birlikte, çalışma dijitalleşmenin ESG ile entegrasyonu bağlamında **uzun vadeli etkilerin henüz yeterince tartışılmadığını** da belirtmektedir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) açısından şu sınırlılıklar öne çıkmaktadır:

- **Dijital adaptasyon kapasitesi:** KOBİ'lerin gelişmiş dijital çözümleri hızlı şekilde benimseme konusunda büyük ölçekli firmalara kıyasla daha yavaş hareket edebilmeleri.
- **Sermaye erişimi:** Gerekli yatırımlar için finansman kaynaklarına ulaşmada yaşanan güçlükler.
- **Nitelikli insan kaynağı:** Dijitalleşme ve ESG süreçlerini birlikte yürütebilecek uzman sayısının sınırlı olması.

Dolayısıyla, dijital dönüşümün ESG performansına kalıcı katkılar sağlayabilmesi için yalnızca teknolojik yatırımların yapılması yeterli değildir. Bunun yanında, **kurumsal yapıların eşzamanlı biçimde güçlendirilmesi** gerekmektedir. Bu kapsamda özellikle şu unsurlar öne çıkmaktadır:

- **İç kontrol mekanizmaları:** Kurum içi yönetim süreçlerinin dijital sistemlerle uyumlu hale getirilmesi.
- **Veri kalitesi:** ESG raporlamasında kullanılan verilerin güvenilir, şeffaf ve karşılaştırılabilir olması.
- **Siber güvenlik:** Dijitalleşmenin getirdiği risklere karşı güvenlik altyapısının güçlendirilmesi.

Sonuç olarak, dijital dönüşüm enerji ve kamu hizmetleri sektöründe verimlilik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu fırsatların uzun vadede kalıcı kazanımlara dönüşebilmesi için dijital teknolojilerin, ESG kriterleriyle uyumlu **kurumsal yönetim yapıları** içerisinde ele alınması kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

2.1.3 Dijital Dönüşüm, Kazanç Yönetimi ve ESG

Wang ve Hou (2024), Çinli halka açık işletmelerde dijital dönüşüm (DT) ve kazanç yönetimi dinamiklerinin ESG performansı üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Çalışmada, ESG performansının finansal göstergelerin ötesinde işletmelerin uzun vadeli gelişim kapasitesini yansıttığı vurgulanmakta; buna karşın yalnızca %57 oranında A düzeyi değerlendirme elde edilmiş olması, gelişim alanlarına işaret etmektedir. Dijital dönüşümün; bilgi şeffaflığını artırarak, süreçleri standartlaştırarak ve denetim izlerini güçlendirerek ESG sonuçlarını iyileştirebildiği ileri sürülmektedir. Ancak, yönetim sistemleri ile dijital yetkinliklerin uyumsuzluğu durumunda maliyet artışları ve etkinlik kayıpları görülebileceği, bu nedenle dijital yatırımların yönetim yapıları ve kurumsal kapasite ile uyumlu tasarlanması gerektiği vurgulanmaktadır.

2.1.4 Dijital Dönüşüm ve Yeşil İnovasyon Kalitesi

Huang ve Lau (2024) tarafından sunulan ampirik bulgular, dijital dönüşümün işletmelerin yeşil inovasyon kalitesini yükseltebildiğini göstermektedir. Yapay zekâ ve blokzincir gibi teknolojilerin finansmana erişimi kolaylaştırarak finansal kısıtları hafiflettiği; piyasa etkinliğinin artması ve işlem maliyetlerinin azalması yoluyla yenilik kapasitesinin güçlendirilebildiği ifade edilmektedir. Öte yandan, dijital dönüşümün beraberinde getirebildiği arttırılmış enerji tüketimi, teknoloji koordinasyonu ve piyasa düzenlemeleri ile uyum ihtiyaçları, yeşil inovasyonun önünde potansiyel engeller olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, dijital projelerin Sürdürülebilir BT (Green IT) ilkeleriyle yürütülmesi ve yaşam döngüsü perspektifinin (donanım ömrü, veri merkezi verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı vb.) kurumsal politikalara entegre edilmesi önerilmektedir.

2.1.5 Devlet Mülkiyetindeki İşletmelerde ESG'ye Etkiler

Jin ve Wu (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışma, Çin'deki devlet mülkiyetindeki işletmelerin (State-Owned Enterprises – SOE) dijital dönüşüm süreçlerini ve bunun ESG performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde

analiz etmektedir. Araştırma, özellikle dinamik yeteneklerin aracılık rolü ve kurumsal ortamın moderatör etkisi üzerinden dijitalleşme ile ESG performansı arasındaki ilişkiyi değerlendirmektedir.

Bulgular, dijitalleşmenin yalnızca operasyonel süreçleri iyileştirmekle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda kurumsal yönetim faktörleri aracılığıyla sürdürülebilirliği güçlendirdiğini göstermektedir. Özellikle:

- Yönetim kurulu bağımsızlığı, karar alma süreçlerinde şeffaflık ve hesap verebilirlik düzeyini artırarak ESG performansına doğrudan katkı sağlamaktadır.
- Sahiplik yapısı, dijital dönüşümle birlikte daha esnek ve etkin hale gelerek sürdürülebilirlik odaklı stratejilerin benimsenmesini kolaylaştırmaktadır.
- Yeşil inovasyon, dijital teknolojilerin yönlendirmesiyle desteklenmekte ve bu sayede çevresel performansın yükselmesine katkıda bulunmaktadır.

Çalışmada ayrıca, dijital finans ve özellikle kapsayıcı dijital finans uygulamalarının, kirlilik yoğun sektörlerde bile yeşil teknoloji yatırımlarını ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik edici bir etki yarattığı ortaya konulmaktadır. Dijital finansal araçlar, şirketlerin düşük maliyetli ve hızlı sermaye kaynaklarına erişimini kolaylaştırarak çevre dostu yatırımların yapılmasına imkân tanımaktadır.

2.1.6 Türkiye Perspektifi

Türkiye’de de benzer bir tartışma Kamu İktisadi Teşebbüsleri (KİT’ler) ve enerji, ulaştırma, altyapı gibi stratejik sektörlerde faaliyet gösteren devlet mülkiyetindeki işletmeler açısından oldukça önemlidir. Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi, kamuya ait işletmelerin yalnızca ekonomik büyüme odaklı değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumluluk temelli dönüşüm stratejileri benimsemelerini zorunlu kılmaktadır.

- Özellikle enerji ve ulaşım sektöründe faaliyet gösteren KİT’ler, dijital teknolojiler aracılığıyla karbon izleme, enerji verimliliği, akıllı şebekeler ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi alanlarda ESG performansını yükseltebilir.
- Dijital finans uygulamaları ve sürdürülebilir yatırım mekanizmaları (örneğin yeşil tahviller), Türkiye’de kamu işletmelerinin finansman kısıtlarını aşarak yeşil projeleri daha hızlı hayata geçirmelerini sağlayabilir.
- Yeşil inovasyonun, Türkiye’de kamu sektöründe Ar-Ge yatırımları ve teknoloji geliştirme programlarıyla desteklenmesi, hem ulusal hem de bölgesel ölçekte sürdürülebilirlik kapasitesini artıracaktır.

Bu bağlamda, dijital dönüşümün Türkiye’deki kamu işletmeleri için stratejik bir kaldıraç olduğu söylenebilir. Ancak, kurumsal yönetim reformları, bağımsız denetim mekanizmaları, şeffaf raporlama standartları ve ESG entegrasyonuna yönelik kurumsal kapasite artırımı yapılmadıkça bu dönüşümün kalıcı ve ölçülebilir etkiler yaratması zor olacaktır.

2.1.7 Sonuç

Devlet mülkiyetindeki işletmelerde dijital dönüşüm, ESG performansını artırıcı güçlü bir katalizör işlevi görmektedir. Çin ve Türkiye örnekleri karşılaştırıldığında, her iki ülke için de ortak sonuç, dijitalleşmenin yalnızca operasyonel verimlilik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, sosyal sorumluluk ve yönetim kalitesi açısından kritik bir dönüşüm zemini sunduğudur. Türkiye’nin 2053 Net Sıfır hedeflerine ulaşabilmesi için KİT’lerin dijital teknolojiler ve

yeşil inovasyonla uyumlu bir ESG stratejisi geliştirmesi, hem ulusal hem de küresel ölçekte rekabet avantajı yaratacaktır.

Boyut	Çin (SOE)	Türkiye (KİT)
Yönetişim	Yönetim kurulu bağımsızlığı ve sahiplik KİT'lerde yönetim reformları ve bağımsız denetim yapısının ESG performansına etkisi mekanizmalarının güçlendirilmesi ihtiyacı öne araştırmalarda detaylı incelenmektedir. çıkmaktadır.	
Yeşil İnovasyon	Dijitalleşme ile yeşil teknoloji Enerji, ulaşım ve altyapı sektörlerinde Ar-Ge odaklı yeşil yatırımlarının artması ve emisyon inovasyon programları ile emisyon azaltımı azaltımının teşvik edilmesi.	hedeflenmektedir.
Dijital Finans	Kapsayıcı dijital finans uygulamaları ile Yeşil tahvil ve sürdürülebilir finans araçlarının KİT sürdürülebilir yatırımların projelerine entegre edilmesi henüz başlangıç kolaylaştırılması.	aşamasındadır.
Sektörel Odak	Kirlilik yoğun sektörlerde bile dijitalleşme Enerji verimliliği, akıllı şebekeler, yenilenebilir enerji sayesinde sürdürülebilir uygulamaların entegrasyonu ve dijital karbon izleme sistemleri öne artırılması.	çıkmaktadır.
Stratejik Hedefler	ESG performansının uzun vadeli kurumsal 2053 Net Sıfır hedefi doğrultusunda KİT'lerin ESG rekabet gücünü artırma aracı olarak stratejilerini ulusal iklim politikalarıyla uyumlu hale görülmesi.	getirme ihtiyacı.

Tablo 1: Çin ve Türkiye'de Devlet Mülkiyetindeki İşletmelerde (SOE/KİT) Dijitalleşme ve ESG Yaklaşımlarının Karşılaştırılması (Jin ve Wu (2024); Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2021, 2053 Net Sıfır Stratejisi).

2.1.8 Ortak Bulgular ve Eleştirel Değerlendirme

Toplam resim itibarıyla literatür, ESG ile dijital dönüşümün birbirini tamamlayan iki kaldıraç olduğunu göstermektedir. ESG; şeffaflık, etik ve risk yönetimi ekseninde kurumsal güven ve paydaş meşruiyeti üretmekte; dijital dönüşüm ise bu ilkelerin ölçeklenmesini ve hızlanmasını mümkün kılmaktadır. Başarı; yalnızca teknoloji yatırımı ile değil, yönetim kalitesi, veri yönetimi, iç kontrol, insan kaynağı kapasitesi ve değişim yönetimi gibi tamamlayıcı unsurların eşzamanlı güçlendirilmesine bağlıdır. Aksi halde, yüksek uygulama maliyetleri, organizasyonel uyum sorunları ve arttırılmış enerji tüketimi gibi sonuçlar, beklenen ESG kazanımlarını sınırlandırabilmektedir. Dolayısıyla, ölçülebilir KPI/OKR'ler, bağımsız denetim, ESG komiteleri ve entegrasyon odaklı veri mimarisi gibi unsurların sistematik biçimde devreye alınması gerekmektedir.

2.1.9 Uygulama Yol Haritası (Öneri)

Uygulama yol haritası kapsamında ilk olarak **çevresel, sosyal ve yönetim verilerinin yönetimi ve mimarisi** güçlendirilmelidir. Bu doğrultuda kurumsal veri sözlüğü hazırlanmalı, sahiplik ve sorumluluk matrisleri tanımlanmalı, denetim izi ve kalite kontrolleri düzenli bir şekilde işletilmelidir. **Teknoloji ile sürdürülebilirlik uyum tasarımı** aşamasında, dijital projeler enerji verimliliği yüksek altyapılar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve donanımların yaşam döngüsü yönetimi dikkate alınarak geliştirilmelidir. Bunun yanında, **çevresel, sosyal ve yönetim raporlama platformları ve entegrasyonları**, bulut tabanlı sistemler ve nesnelerin interneti uygulamaları sayesinde gerçek zamanlı ölçüm yapılmasına ve verilerin otomatik olarak toplanmasına imkân tanıyacak şekilde tasarlanmalıdır.

Bu süreçte **risk ve maliyet yönetimi** de kritik önemdedir. Dijital yatırım kararları, iş gerekçesi, toplam sahip olma maliyeti ve enerji ile karbon etkileri birlikte değerlendirilmelidir. **Yönetim ve organizasyon** boyutunda, yönetim kurulu düzeyinde özel bir sürdürülebilirlik komitesi oluşturulmalı; icra tarafında ise farklı birimlerin ortak çalışabileceği yapılar kurulmalı ve sorumluluk alanları netleştirilmelidir. Ayrıca, **paydaşlar ve tedarik zinciri yönetimi** kapsamında, tedarikçilere yönelik sürdürülebilirlik veri gereksinimleri açıkça belirlenmeli ve dijital kanıt yükleme sistemleri kullanılabilir hale getirilmelidir.

Tüm bu adımların etkili biçimde ilerleyebilmesi için **kurumsal kapasite gelişimi** desteklenmeli; veri yönetimi, analitik beceriler ve sürdürülebilirlik konularına yönelik eğitim programları düzenli ve sürekli bir hale getirilmelidir. Son aşamada ise **pilot uygulama ve ölçeklendirme döngüsü** izlenmeli; küçük ölçekli projelerle başarılar ve etkiler test edildikten sonra, olumlu sonuç veren uygulamalar kurum geneline kademeli olarak yaygınlaştırılmalıdır.

2.1.10 ESG Performansının Dijital Araçlarla Takibi:

2.1.11 Giriş

ESG (çevresel, sosyal ve yönetim) performansının dijital araçlarla izlenmesi, günümüz iş dünyasında giderek artan bir önem taşımaktadır. Küresel ölçekte şirketlerin sürdürülebilirlik hedefleri, yalnızca finansal performans göstergeleriyle değil; aynı zamanda çevresel etkiler, sosyal sorumluluk uygulamaları ve kurumsal yönetim standartları ile de değerlendirilmektedir. Bu noktada, dijital teknolojiler aracılığıyla ESG performansının şeffaf, sürekli ve karşılaştırılabilir biçimde izlenebilmesi, şirketlerin rekabet gücü ve paydaş güveni açısından kritik hale gelmektedir. ESG kavramının bileşenlerini ve dijital dönüşüm ile ilişkisini ele alan dört temel çalışma (Ivascu et al., 2022; Park et al., 2022; Xia et al., 2023; Qing ve Jin, 2023; Wang ve Hou, 2024) incelenmektedir. Her bir çalışma, ESG'nin farklı boyutlarına odaklanmakta; finansal performans, CSR ile ilişkiler, raporlama süreçleri ve dijital dönüşümün etkileri üzerinden değerlendirmeler sunmaktadır.

2.1.12 Finansal Performans Ölçütleri ve ESG İlişkisi

Ivascu ve çalışma arkadaşları (2022), kurumsal sürdürülebilirlik, çevre yönetimi ve kurumsal finansal performans arasındaki ilişkileri analiz etmek amacıyla VAR (Vector Autoregression) ve Granger nedensellik testlerini kullanmıştır. Çalışmada, muhasebe temelli finansal performans ölçütlerinin piyasa temelli göstergelere kıyasla uzun vadeli davranışları daha sağlıklı yansıttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu yaklaşım, ESG performansının daha güvenilir biçimde izlenebilmesi için muhasebe verilerinin önemini ortaya koymaktadır. Bulgular, şirket yönetimlerinin kaynakların etkin kullanımını teşvik ederek ESG faaliyetlerine yönlendirmesinin, uzun vadeli kurumsal performansı artırdığına işaret etmektedir. Ayrıca, ESG uygulamalarının sürdürülebilir kalkınmaya katkı sunduğu ve şirketlerin rekabet seviyesini güçlendirdiği gösterilmektedir. Eleştirel açıdan bakıldığında, çalışma ESG performansını finansal temelli veriler üzerinden değerlendirerek önemli katkılar sunmaktadır. Ancak dijital teknolojilerin bu süreçlere nasıl entegre edilebileceği, özellikle de muhasebe verilerinin otomasyon, yapay zekâ veya büyük veri analitiği ile işlenmesi konusunda daha derin bir tartışma yapılmamaktadır. Bu da literatürde doldurulması gereken bir boşluk olarak değerlendirilmektedir.

2.1.13 ESG'nin kurumsal Sorumluluk ile İlişkisi

Park ve çalışma arkadaşları (2022), çevresel, sosyal ve yönetim temelli yaklaşımların zaman içindeki eğilimlerini ve bunların duygusal değerlerini inceleyerek, ESG kavramının iş dünyası için giderek daha kritik bir çerçeve sunduğunu ortaya koymaktadır. Araştırmada, ESG'nin sadece çevre, sosyal alan ve yönetim boyutlarını kapsayan bir ölçüm sistemi değil, aynı zamanda şirket değerinin değerlendirilmesinde kullanılan bütünsel bir performans göstergesi olduğu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, ESG'nin özellikle yatırımcı kararlarında, risklerin ve fırsatların daha net analiz edilmesine imkân tanıyan bir yapı sunduğu belirtilmektedir.

Kurumsal Sosyal Sorumluluk kavramı ise tarihsel olarak tüm paydaşları çalışanlar, müşteriler, toplum ve çevre – dikkate alarak daha genel ve gönüllülük esaslı bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Ancak ESG, Kurumsal Sosyal Sorumluluk'tan evrilerek, ölçülebilir göstergeler ve yatırımcı odaklı raporlama süreçleri ile daha sistematik bir çerçeve sunmaktadır. Bu farklılaşma, Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile de uyumlu bir yapı oluşturmaktadır. ESG yaklaşımı, yalnızca sosyal ve çevresel sorumlulukları raporlamayı değil, aynı zamanda yatırımcıların uzun vadeli stratejik kararlarında kullanılabilecek ölçülebilir ve karşılaştırılabilir veriler sağlamayı amaçlamaktadır.

Bununla birlikte, Park ve arkadaşlarının çalışması, ESG performansının dijital araçlar aracılığıyla nasıl takip edileceği konusunda sınırlı kalmaktadır. Çalışmada, Sürdürülebilirlik Muhasebesi Standartları Kurulu (SASB) ve iklimle ilgili Finansal Beyanlar Görev Gücü (TCFD) gibi uluslararası raporlama standartlarına değinilmekle birlikte, bu standartların dijital raporlama yazılımları, büyük veri analitiği platformları veya blokzincir tabanlı sistemlerle entegrasyonuna dair somut örnekler sunulmamaktadır. Oysa dijital teknolojilerin sağladığı olanaklar, ESG göstergelerinin daha şeffaf, gerçek zamanlı ve güvenilir bir biçimde takip edilmesini mümkün kılmaktadır.

Örneğin, blokzincir teknolojisi ile şirketlerin çevresel ve sosyal performansına dair veriler merkeziyetsiz bir yapıda saklanabilir ve böylece manipülasyon riskleri azaltılabilir. Aynı şekilde, nesnelerin interneti sensörleri ile enerji tüketimi, karbon salımları ya da iş sağlığı göstergeleri anlık olarak ölçülerek doğrudan raporlama sistemlerine aktarılabilir. Ancak bu tür teknolojik uygulamaların yaygınlaşabilmesi için hem şirketlerin hem de düzenleyici kurumların gerekli dijital altyapıyı kurması ve uluslararası standartlarla uyumlu hale getirmesi gerekmektedir.

Türkiye’de de ESG ile Kurumsal Sosyal Sorumluluk arasındaki farkın daha görünür hale geldiği söylenebilir. Borsa İstanbul tarafından yayımlanan **Sürdürülebilirlik Endeksi**, şirketlerin performanslarını yalnızca sosyal sorumluluk faaliyetleri üzerinden değil, aynı zamanda ölçülebilir ESG kriterleri üzerinden değerlendirmektedir. Sermaye Piyasası Kurulu’nun (SPK) yayımladığı **sürdürülebilirlik raporlama standartları** ise, dijital dönüşüm ve uluslararası uyum çerçevesinde şirketlerin yatırımcıya yönelik şeffaf ve karşılaştırılabilir veri sunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu gelişmeler, Türkiye’de ESG’nin salt bir sorumluluk yaklaşımı olmaktan çıkarak, yatırımcı güveni, finansal istikrar ve küresel rekabet gücü açısından belirleyici bir araç haline geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, ESG’nin Kurumsal Sosyal Sorumluluk’tan farklılaşarak yatırımcı odaklı ve ölçülebilir bir çerçeveye dönüşmesi, küresel olduğu kadar Türkiye açısından da kritik bir gelişmedir. Bu dönüşümün etkili biçimde ilerlemesi için, dijital raporlama araçlarının, veri platformlarının ve blokzincir teknolojilerinin daha sistematik bir şekilde sürece entegre edilmesi; aynı zamanda ulusal düzenleyici kurumların bu teknolojilerin yaygınlaşmasını destekleyecek politikaları geliştirmesi gerekmektedir.

2.1.14 ESG Raporlarının Dinamik Analizi

Xia ve çalışma arkadaşları (2023), ESG raporlarının dinamik analizini gerçekleştirerek, bu raporların yatırımcıların karar alma süreçlerindeki önemini ortaya koymaktadır. Bulgulara göre, ESG raporları şirketlerin etik standartlara uyum düzeylerini göstererek paydaşlara risk yönetimi, firma performansı ve fırsatların değerlendirilmesi açısından kritik bilgiler sunmaktadır. Özellikle kurumsal yatırımcılar için ESG raporları, yatırım kararlarını şekillendiren başlıca araçlardan biri haline gelmektedir. Bu raporların şeffaflık ve hesap verebilirlik sağlaması, sektörel ve bölgesel kıyaslamalara imkân tanınması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca şirketlerin bu raporlar aracılığıyla yatırımcı güveni kazandığı ve sürdürülebilirlik odaklı stratejilerini güçlendirdiği vurgulanmaktadır. Dijital teknolojilerin ESG raporlamasına doğrudan entegrasyonu ele alınmamasına rağmen büyük veri analitiği, yapay zekâ algoritmaları ve otomasyon araçları kullanılarak ESG raporlarının gerçek zamanlı, dinamik ve sürekli güncellenen sistemlere dönüştürülmesi mümkün olabilmektedir. Bu açıdan, çalışma önemli bir temel sunmakla birlikte dijital araçların rolünü yeterince detaylandırmamaktadır.

2.1.15 Dijitalleşme ve ESG Performansı

Wang ve Hou (2024), Çinli halka açık işletmeler üzerinde yaptıkları araştırmada, dijital dönüşümün ESG performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, ESG performansının işletmelerin uzun vadeli gelişim kapasitelerini finansal göstergelerden daha iyi yansıttığı vurgulanmaktadır. Bulgular, dijital teknolojilerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, dijitalleşmenin beraberinde getirdiği yönetim maliyetleri, organizasyonel uyum sorunları ve veri yönetimi zorlukları, ESG performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle, teknolojik altyapı ile stratejik yönetim arasındaki uyumsuzluk, dijital yatırımların beklenen katkılarını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, dijital dönüşümün ESG performansına pozitif katkı sağlayabilmesi için yalnızca teknoloji yatırımı değil; aynı zamanda kurumsal adaptasyon süreçleri, yönetim mekanizmaları ve iç kontrol sistemlerinin güçlendirilmesi gerekmektedir.

2.1.16 Eleştirel Sentez

İncelenen çalışmalar, ESG performansının dijital araçlarla izlenmesinin kurumsal sürdürülebilirlik açısından kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Muhasebe temelli göstergeler uzun vadeli davranışları açıklamada önemli bir avantaj sunarken (Ivascu et al., 2022), ESG’nin CSR’den farklılaşarak yatırımcı odaklı ve ölçülebilir bir yapıya kavuştuğu görülmektedir (Park et al., 2022). ESG raporlarının yatırım kararları üzerindeki etkisi açıkça ortaya

konulmakta (Xia et al., 2023), dijital dönüşüm ve yeşil inovasyonun ESG performansını güçlendirdiği belirtilmektedir (Qing ve Jin, 2023; Wang ve Hou, 2024). Ancak literatürde önemli boşluklar da bulunmaktadır. Özellikle ESG performansının dijital araçlarla gerçek zamanlı, dinamik ve sektörel karşılaştırmaya uygun biçimde nasıl izleneceğine dair yeterince ampirik kanıt bulunmamaktadır. Çalışmalar, kavramsal ve teorik düzeyde önemli katkılar sunmakla birlikte, dijital teknolojilerin entegrasyonuna dair uygulama örnekleri sınırlıdır.

2.1.17 Gelecek Araştırmalar için Öneriler

Gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar açısından, çevresel, sosyal ve yönetim performansının daha etkin izlenebilmesi için **gerçek zamanlı takip sistemlerinin** geliştirilmesi kritik önemdedir. Bu kapsamda, nesnelerin interneti tabanlı sensörler, karbon salımını izlemeye yönelik yazılımlar ve otomatik raporlama araçlarının saha uygulamaları yaygınlaştırılmalıdır. Böylelikle, şirketlerin çevresel performansı anlık veriler üzerinden ölçülebilir ve sürdürülebilirlik raporlamasında şeffaflık güçlendirilebilir.

Bunun yanında, **uluslararası raporlama standartlarının dijital platformlarla entegrasyonu** da üzerinde durulması gereken bir diğer önceliktir. Sürdürülebilirlik Muhasebesi Standartları Kurulu, İklimle İlgili Finansal Beyanlar Görev Gücü ve Küresel Raporlama Girişimi gibi çerçevelerin dijital raporlama altyapıları ile uyumlu hale getirilmesi, farklı sektörlerde karşılaştırmalı analizler yapılmasını mümkün kılacaktır.

Literatür incelendiğinde, araştırmaların büyük ölçüde büyük ölçekli şirketlere odaklandığı görülmektedir. Oysa **küçük ve orta ölçekli işletmelerin** dijitalleşme ve sürdürülebilirlik süreçlerine entegrasyonu üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Bu alandaki araştırmalar, KOBİ'lerin sermaye, insan kaynağı ve dijital altyapı kısıtlarını dikkate alarak daha kapsayıcı bir yaklaşım sunabilir.

Ayrıca, **maliyet-fayda analizlerinin** derinleştirilmesi, dijital dönüşüm yatırımlarının hem kısa vadeli hem de uzun vadeli çevresel, sosyal ve yönetim getirilerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu tür analizler, sürdürülebilirlik ekonomisi bağlamında hem işletmelere hem de politika yapıcılara yol gösterici olacaktır.

Son olarak, dijital teknolojilerin **yeşil inovasyonu teşvik etme kapasitesi** daha fazla vaka çalışmasıyla incelenmelidir. Yenilikçi teknolojilerin enerji verimliliği, emisyon azaltımı ve sürdürülebilir ürün geliştirme süreçlerinde nasıl bir rol oynadığına dair bulgular, sürdürülebilirlik politikalarının uygulanabilirliğini güçlendirecektir.

2.1.18 Veri Odaklı ESG Uygulamaları: Örnek Yazılımlar ve Platformlar

2.1.18.1 Giriş

Veri odaklı ESG uygulamaları, günümüzde sürdürülebilirlik, kurumsal yönetim ve yatırımcı güveni açısından stratejik bir önem taşımaktadır. Dijitalleşme sürecinde, ESG stratejilerinin teknoloji ile entegrasyonu, şirketlerin uzun vadeli performansını izleme, raporlama ve yönetme biçimlerini dönüştürmektedir. Bu bağlamda literatürde yer alan çeşitli çalışmalar, ESG stratejilerinin evrimini, veri yönetimi yaklaşımlarını ve dijital platformların bu süreçlerdeki rolünü ortaya koymaktadır.

2.1.18.2 ESG Stratejileri ve Finansal Performans

Ivascu, Domil, Sarfraz, Bogdan, Burca ve Pavel (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma, çevresel, sosyal ve yönetim stratejilerinin kurumsal finansal performans üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Araştırmada, muhasebe temelli finansal performans ölçütlerinin, piyasa temelli göstergelere kıyasla şirketlerin uzun vadeli davranışlarını ve sürdürülebilirlik kapasitelerini daha iyi yansıttığı ortaya konulmaktadır. Bu bulgu, finansal performans analizlerinde yalnızca piyasa göstergelerine bağlı kalınmaması gerektiğini, daha derinlemesine muhasebe verilerinin de dikkate alınmasının önem taşıdığını göstermektedir.

Çalışmada özellikle üst yönetimin çevresel, sosyal ve yönetim uygulamalarındaki rolü vurgulanmakta, yönetim desteğinin bu stratejilerin başarısında kritik bir faktör olduğu belirtilmektedir. Üst düzey yöneticilerin kararlılığı ve vizyoner yaklaşımları, çevresel ve sosyal faaliyetlerin kurumsal stratejilere entegre edilmesini kolaylaştırmakta, bu da hem sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamak hem de şirketlerin rekabetçiliğini artırmaktadır.

Araştırmada kullanılan ekonometrik yöntemler, özellikle Vektör Otoregresyon (VAR) modeli ve Granger nedensellik testleri, çevresel, sosyal ve yönetim uygulamalarının finansal performans üzerindeki etkilerini zaman serileri bağlamında analiz etmek için güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, yatırımların ve faaliyetlerin yalnızca kısa vadeli etkilerini değil, uzun vadeli sonuçlarını da ortaya koymakta ve stratejik karar alma süreçlerine bilimsel bir temel sağlamaktadır. Bulgular, kaynakların etkin kullanımının ve çevresel, sosyal ve yönetim yatırımlarına yönelmenin, kurumsal performansı uzun vadede güçlendirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, söz konusu araştırmanın ağırlıklı olarak geleneksel finansal göstergelere odaklandığı görülmektedir. Çalışmada veri odaklı yazılımların, dijital raporlama platformlarının veya yapay zekâ destekli çözümlerin rolüne değinilmemektedir. Oysa günümüzde büyük veri analitiği, nesnelerin interneti ve yapay zekâ tabanlı yazılımlar, çevresel, sosyal ve yönetim performansının gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve raporlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu teknolojilerin sürece dâhil edilmesi, hem yatırımcıların güvenilir bilgiye erişimini kolaylaştıracak hem de işletmelerin sürdürülebilirlik stratejilerini daha şeffaf, ölçülebilir ve etkin bir biçimde hayata geçirmesine katkıda bulunacaktır.

Türkiye bağlamında bakıldığında, çevresel, sosyal ve yönetim stratejilerinin finansal performans üzerindeki etkisi giderek daha görünür hale gelmektedir. Özellikle bankacılık sektöründe yeşil finansman ve sürdürülebilir kredi politikaları ön plana çıkmaktadır. Bankalar, kredi tahsis süreçlerinde artık yalnızca geleneksel finansal göstergeleri değil, aynı zamanda şirketlerin çevresel ve sosyal performanslarını da dikkate almaktadır. Bu yaklaşım, hem yatırımcı güvenini artırmakta hem de Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda sürdürülebilir kalkınmayı desteklemektedir.

Sermaye Piyasası Kurulu tarafından yayımlanan sürdürülebilirlik raporlama standartları da, şirketlerin yatırımcıya şeffaf ve karşılaştırılabilir veri sunmasını zorunlu kılarak finansal performans ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin daha somut biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, Borsa İstanbul'un Sürdürülebilirlik Endeksi kapsamında şirketlerin performanslarının ESG kriterlerine göre ölçülmesi, yatırımcıların karar süreçlerinde bu verilerin giderek daha fazla kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, çevresel, sosyal ve yönetim stratejilerinin finansal performansla ilişkisini değerlendiren çalışmaların dijital dönüşüm unsurları ve Türkiye'deki düzenleyici çerçeve ile zenginleştirilmesi, yalnızca teorik analizlerin ötesine geçilmesini sağlayacak, aynı zamanda kurumsal düzeyde uygulanabilir politika ve stratejilerin geliştirilmesine de güçlü bir zemin oluşturacaktır.

2.1.18.3 Finansal Kurumlarda ESG Verilerinin Yönetimi ve Yapay Zekâ

Jun Xu'nun (2024) "AI in ESG for Financial Institutions: An Industrial Survey" başlıklı çalışmasında, finansal kurumlarda ESG verilerinin toplanması ve analizinde yapay zekânın rolü incelenmektedir. Çalışmada, ESG verilerinin farklı kaynaklardan (açık kaynak yayınlar, müşteri belgeleri, dış sağlayıcılar) toplanarak erişilebilir platformlarda depolanmasının kritik önemde olduğu vurgulanmaktadır. Çalışma, veri entegrasyonu ve yönetiminde yapay zekânın merkezi rolüne dikkat çekmektedir. Büyük veri setlerinin birleştirilmesi, analitik süreçlerin kolaylaştırılması ve ESG göstergelerinin karşılaştırılabilir hale getirilmesi, yapay zekâ algoritmalarıyla mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, veri sınıflandırması ve standardizasyonu için kapsamlı bir ESG veri taksonomisi oluşturulmasının, sürdürülebilirlik raporlamasında şeffaflığı ve güvenilirliği artıracığı belirtilmektedir. Çalışma, organizasyonlarda ESG veri yöneticisinin atanmasının ve çok fonksiyonlu yönetim kurullarının oluşturulmasının, ESG veri yönetiminin etkinliğini güçlendireceğini savunmaktadır. Böylece, veri kalitesi korunmakta ve yapay zekâ temelli analizlerin güvenilirliği artırılmaktadır.

2.1.18.4 ESG Derecelendirme

Lee ve çalışma arkadaşlarının (2024) ortaya koyduğu "ESG2PreEM: Automated ESG Grade Assessment Framework Using Pre-Trained Ensemble Models" başlıklı araştırma, çevresel, sosyal ve yönetim derecelendirmelerinde veri odaklı yaklaşımların yükselen önemini vurgulamaktadır. Çalışmada, önceden eğitilmiş topluluk modellerinin kullanımıyla, geleneksel olarak zaman alıcı ve insan yorumuna bağlı olan derecelendirme süreçlerinin otomatikleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu yöntem sayesinde, gelişmiş algoritmalar ve makine öğrenimi teknikleri aracılığıyla verilerin toplanması, sınıflandırılması ve analiz edilmesi daha sistematik hale getirilmekte; böylece değerlendirmelerin hem hızının hem de doğruluğunun artırılması mümkün olmaktadır.

Söz konusu çerçeve, yatırımcıların karar alma süreçlerinde daha güvenilir ve karşılaştırılabilir ESG verilerine erişimini sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle küresel ölçekte giderek artan sürdürülebilir yatırım talebi dikkate alındığında, hızlı ve güvenilir derecelendirme mekanizmalarının yatırımcı güvenini artırmada kritik rol oynadığı söylenebilir. Bununla birlikte, modelin başarısı yalnızca kullanılan algoritmalara değil, aynı zamanda veri kalitesine ve standartlaşma düzeyine de bağlıdır. ESG verilerindeki heterojenlik, farklı raporlama standartlarının birbiriyle uyumsuzluğu ve şirketlerin şeffaflık konusundaki eksiklikleri, algoritmaların performansını sınırlayan önemli engeller olarak öne çıkmaktadır.

Buna ek olarak, makine öğrenimi modellerinin genellikle "kara kutu" olarak tanımlanan düşük yorumlanabilirliği, yatırımcıların ve düzenleyici kurumların bu sistemlere duyduğu güveni zayıflatabilmektedir. Yatırımcıların yalnızca sonuçlara değil, aynı zamanda bu sonuçların nasıl elde edildiğine dair açıklamalara da ihtiyaç duyması, yorumlanabilir yapay zekâ çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, şeffaflık ve standartlaşma, veri odaklı çevresel, sosyal ve yönetim uygulamalarının etkinliğini artırmak ve yatırım ekosisteminde kabul görmesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, Borsa İstanbul'un Sürdürülebilirlik Endeksi uygulaması, şirketlerin çevresel, sosyal ve yönetim performanslarının belirli kriterlere göre değerlendirildiği bir derecelendirme mekanizması olarak öne çıkmaktadır. Bu endeks, yatırımcıların yalnızca finansal verilerle değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik göstergeleriyle de karar almasına olanak tanımaktadır. Ancak, Türkiye'de şirketlerin çevresel, sosyal ve yönetim verilerinin şeffaflık düzeyi ve raporlama kalitesi arasında önemli farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde veri standartlarının yetersizliği, derecelendirme süreçlerinde homojenliğin sağlanmasını zorlaştırmaktadır.

Bu noktada, dijitalleşme ve veri odaklı yaklaşımların Türkiye'deki derecelendirme sistemine entegre edilmesi, raporlamanın daha güvenilir ve karşılaştırılabilir olmasına katkı sağlayacaktır. Blokzincir tabanlı veri paylaşım platformları, otomatik raporlama yazılımları ve yapay zekâ tabanlı analiz araçları, hem yerli hem de yabancı yatırımcıların güvenini artıracak güçlü araçlar olarak kullanılabilir. Böylece, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefleri doğrultusunda, sürdürülebilirlik performansının yalnızca ölçülmesi değil, aynı zamanda şeffaf ve denetlenebilir biçimde paydaşlara aktarılması da mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, veri odaklı derecelendirme çerçeveleri, sürdürülebilir yatırım kararlarını destekleyici güçlü araçlar sunma potansiyeline sahiptir. Ancak bunların güvenilir ve kapsayıcı hale gelebilmesi için, hem küresel hem de Türkiye özelinde standart raporlama yapılarının güçlendirilmesi, veri şeffaflığının artırılması ve algoritmaların daha anlaşılır hale getirilmesi gerekmektedir. Böylece, çevresel, sosyal ve yönetim performansının yatırım kararlarında daha etkin bir rol oynaması sağlanabilecektir.

2.1.18.5 Genel Değerlendirme

İncelenen çalışmalar, veri odaklı ESG uygulamalarının sürdürülebilirlik raporlaması, risk değerlendirmesi ve yatırımcı güveni açısından giderek daha büyük bir önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Ivescu et al. (2022), ESG stratejilerinin kurumsal finansal performansa olan etkisini muhasebe temelli göstergeler üzerinden açıklarken; Xia et al. (2023), ESG raporlarının dinamik analizine odaklanarak içeriklerin stratejik yönetimdeki rolünü vurgulamaktadır. Xu (2024), finansal kurumlarda yapay zekâ destekli veri yönetiminin gerekliliğine işaret ederken; Lee et al. (2024), otomatik ESG derecelendirme modellerinin hız ve doğruluk avantajlarını ön plana çıkarmaktadır. Bu literatür, ESG performansının artık yalnızca raporlamaya dayalı bir süreç değil; veri odaklı yazılımlar, platformlar ve yapay zekâ teknolojileriyle desteklenen dinamik bir yönetim aracı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, veri standardizasyonu, şeffaflık ve yorumlanabilirlik eksiklikleri, bu uygulamaların etkinliğini sınırlandırabilmektedir.

2.1.18.6 Sonuç ve Gelecek Araştırmalar için Öneriler

Çevresel, sosyal ve yönetim odaklı çalışmaların gelecek araştırma gündeminde öne çıkan temel başlıklardan biri veri standardizasyonudur. ESG verilerinin küresel ölçekte kıyaslanabilirliğini sağlamak için ortak taksonomiler, uyumlaştırılmış göstergeler ve uluslararası kabul gören standartların geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu sayede farklı ülkelerde ve sektörlerde üretilen verilerin daha bütüncül bir biçimde karşılaştırılması mümkün olacaktır.

Bunun yanında, yapay zekâ entegrasyonu, ESG performansının gerçek zamanlı izlenmesi ve raporlanmasında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Yapay zekâ temelli platformların saha çalışmalarıyla test edilmesi, bu teknolojilerin uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini artıracaktır. Özellikle büyük veri ve otomatik raporlama altyapılarının geliştirilmesi, karar alma süreçlerinin hızını ve etkinliğini yükseltebilir.

Platform bazlı çözümler de geleceğin araştırma alanları arasında yer almaktadır. ESG performansını ölçmeye yönelik gösterge panelleri ve yazılım çözümlerinin farklı sektörler arasında karşılaştırmalı olarak incelenmesi, bu uygulamaların ölçeklenebilirliği ve esnekliği hakkında önemli içgörüler sunabilir. Ancak, bu tür teknolojik çözümlerin yalnızca sonuç üretmesi yeterli değildir; aynı zamanda şeffaflık ve yorumlanabilirlik boyutlarının da güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, makine öğrenimi modellerinin karar süreçlerini açıklayan yöntemlerin geliştirilmesi, yatırımcı güvenini artırmada kritik bir adım olacaktır.

Son olarak, küçük ve orta ölçekli işletmelerin bu süreçteki rolü üzerinde daha fazla durulmalıdır. Günümüzde literatür büyük ölçüde büyük ölçekli işletmelere odaklanırken, küçük ve orta ölçekli işletmelerde veri odaklı çevresel, sosyal ve yönetim uygulamalarının benimsenme düzeyleri yeterince ele alınmamaktadır. Oysa bu işletmelerin adaptasyon kapasiteleri, sermaye erişimleri ve insan kaynağı sınırlılıkları dikkate alındığında, araştırmaların bu alanlara yönelmesi hem yerel ekonomilerin hem de küresel sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesi açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

2.1.19 Dijital ESG Raporlama ve Yapay Zekâ Destekli Analitik

2.1.19.1 Giriş

Dijital ESG raporlaması ve yapay zekâ (YZ) destekli analitik, günümüz iş dünyasında sürdürülebilirlik yönetimi açısından stratejik öneme sahip alanlar arasında yer almaktadır. ESG'nin çevresel, sosyal ve yönetim boyutları, dijital teknolojilerin sunduğu veri odaklı çözümlerle birleştğinde, şirketlerin şeffaflık, hesap verebilirlik ve risk yönetimi süreçlerinde önemli bir dönüşüm yaşanmaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar, bu iki alanın kesişiminde oluşan fırsatları, uygulama zorluklarını ve araştırma boşluklarını sistematik biçimde incelemektedir.

2.1.19.2 Yapay Zekâ Destekli Eğitim ve Sürdürülebilirlik Boyutu

Mallik ve Gangopadhyay'ın (2023) çalışması, yapay zekâ destekli eğitim araştırmalarını inceleyerek proaktif ve reaktif yaklaşımların eğitim sistemlerinde nasıl konumlandığını ortaya koymaktadır. Proaktif yaklaşımlar, mevcut eğitim sorunlarını çözmek için yapay zekâ teknolojilerinin kullanımına odaklanırken; reaktif yaklaşımlar mevcut durumları analiz ederek buna uygun çözüm önerileri geliştirmektedir. Bu iki yönlü çerçeve, yapay zekânın eğitim alanındaki katkısını sistematik biçimde değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Araştırmada, özellikle eğitimde eşitlik ve erişim sorunlarının yapay zekâ uygulamaları aracılığıyla giderilebileceği, bu sayede Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne doğrudan katkı sağlanabileceği vurgulanmaktadır. Yapay zekâ tabanlı çözümler, farklı veri setleri ve algoritmalar üzerinden eğitim sorunlarına alternatif çözümler üretmekte, bireysel öğrenme deneyimlerini kişiselleştirmekte ve öğretim süreçlerini daha kapsayıcı hale getirmektedir. Bununla birlikte, yapay zekânın yalnızca teknik gelişmeler bağlamında değil, toplumsal etkileri ve uzun vadeli sonuçları üzerinden de incelenmesi gerektiği ortaya konulmaktadır.

Türkiye bağlamında ise, özellikle pandemi döneminde uzaktan eğitim uygulamalarıyla birlikte dijitalleşmenin ve yapay zekâ tabanlı çözümlerin önemi daha görünür hale gelmiştir. Milli Eğitim Bakanlığı tarafından yürütülen EBA (Eğitim Bilişim Ağı) gibi dijital platformlar, milyonlarca öğrenciye erişim sağlamış olsa da, bölgesel ve sosyoekonomik farklılıklar nedeniyle eşit erişim konusunda önemli sorunlar yaşanmıştır. Bu noktada, yapay zekâ tabanlı uygulamaların eğitimde fırsat eşitliği yaratacak biçimde tasarlanması kritik bir ihtiyaçtır. Ayrıca Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefleri göz önünde bulundurulduğunda, yapay zekânın eğitim alanında sürdürülebilirlik temelli içerikler geliştirmek için kullanılması, çevre bilinci ve iklim değişikliği farkındalığını artırmada stratejik bir araç haline gelebilir.

Sonuç olarak, yapay zekâ destekli eğitim modelleri hem küresel hem de Türkiye özelinde yalnızca pedagojik bir yenilik değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet eden bir dönüşüm aracı olarak görülmelidir.

2.1.19.3 ESG Raporlarının Dinamik Analizi ve Homojenleşme Eğilimi

Xia, Sun, Cai ve Zeng (2023) tarafından yürütülen çalışma, kurumsal ESG raporlarının dinamik analizini yaparak teknoloji sektöründeki eğilimleri incelemektedir. Çalışma, ESG raporlamasında homojenleşme eğiliminin arttığını ve şirketlerin raporlama pratiklerini giderek belirli normlara uyumlu hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, raporlarda standartlaşmayı teşvik etse de, yenilikçi ve farklılaşmış yaklaşımların azalmasına yol açabilmektedir. Yapay zekâ destekli analitik tekniklerin ESG raporlarının değerlendirilmesine entegre edilmesinin, daha tutarlı ve sistematik sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, raporların içerik analizi yoluyla ESG perspektiflerinin evrimsel eğilimleri haritalandırılmakta; böylece stratejik karar alma süreçlerine veri odaklı katkılar sağlanmaktadır. Homojenleşmenin uzun vadede yaratıcılığı sınırlayabileceği ve ESG raporlarının özgün katkılar sunma kapasitesini azaltabileceği ifade edilmektedir. Yapay zekâ uygulamalarının yalnızca mevcut kalıpları desteklemekle kalmayıp, yeni ESG konularının ve stratejilerinin ortaya çıkarılmasında da kullanılmasının gerekli olduğu belirtilmektedir.

2.1.19.4 Finans Sektöründe Yapay Zekâ ve ESG Entegrasyonu

Xu (2024) tarafından gerçekleştirilen endüstriyel anket çalışması, finans sektöründe ESG girişimlerine yapay zekânın entegrasyonunu ele almaktadır. Çalışmada, büyük veri analitiği, otomasyon ve öngörücü modellerin, finansal kurumların ESG performansını izleme, raporlama ve risk yönetimi süreçlerinde etkin şekilde kullanılmakta olduğu gösterilmektedir. Yazar, veri kalitesi, model sağlamlığı, etik ilkeler ve şeffaflık konularının, yapay zekâ tabanlı ESG uygulamalarının güvenilirliği açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, düzenleyici gerekliliklerin ve paydaş farkındalığının artmasıyla, finansal kurumların ESG kriterlerini benimseme zorunluluğunun daha da güçlendiği belirtilmektedir. Ayrıca, yapay zekânın ESG alanındaki dönüştürücü rolü, veri güvenliği ve algoritmik adalet gibi konuların halen önemli sınırlılıklar oluşturduğunu göstermektedir.

2.1.19.5 Yapay Zekâ ve Sürdürülebilir Kalkınma

Năstăsă, Dumitra ve Grigorescu'nun (2024) çalışması, yapay zekânın sürdürülebilir kalkınma üzerindeki etkilerini kapsamlı bir biçimde ele almaktadır. Çalışmada dikkat çekilen en önemli noktalardan biri, literatürde yapay zekânın çoğunlukla olumlu yönleriyle ele alınmasıdır. Bu durum, teknolojinin sunduğu fırsatları öne çıkarırken, potansiyel risklerin göz ardı edilmesine yol açabilmektedir. Özellikle sosyal sürdürülebilirlik hedefleri açısından yapay zekânın bazı olumsuz sonuçlar doğurabileceği belirtilmektedir. Veri gizliliği, güvenlik açıkları, algoritmik önyargıların güçlenmesi ve mevcut eşitsizliklerin derinleşmesi gibi konular, yapay zekâ uygulamalarının taşıdığı riskler arasında öne çıkmaktadır.

Buna ek olarak, mevcut araştırmaların büyük ölçüde literatür taramaları, anketler ve vaka analizleri gibi geleneksel yöntemlere dayandığı; metin madenciliği, konu modelleme ve makine öğrenimi gibi ileri tekniklerin sınırlı ölçüde kullanıldığı görülmektedir. Bu metodolojik daralma, yapay zekânın sürdürülebilir kalkınma üzerindeki çok boyutlu etkilerini anlamada yetersiz kalmakta ve daha geniş, disiplinler arası araştırma yaklaşımlarına duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Türkiye özelinde ise, 2021 yılında Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayımlanan Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi, yapay zekânın ekonomik büyüme, verimlilik ve toplumsal fayda açısından kritik bir dönüşüm aracı olduğunu vurgulamaktadır. Stratejide, yapay zekâ tabanlı uygulamaların sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak geliştirilmesi, enerji verimliliği, çevre yönetimi ve akıllı şehirler gibi alanlarda etkin bir biçimde kullanılması öngörülmektedir. Bununla birlikte, Türkiye'de yapay zekânın sürdürülebilir kalkınma ile entegrasyonunda veri gizliliği, etik ilkeler ve nitelikli insan kaynağı eksikliği gibi zorlukların da bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla,

Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefleriyle paralel şekilde, yapay zekâ uygulamalarının çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları kapsayan daha bütüncül bir çerçevede ele alınması gerekmektedir

2.1.19.6 Eleştirel Sentez

İncelenen çalışmaların tamamı, dijital ESG raporlaması ve yapay zekâ destekli analitik arasındaki güçlü bağlantıları ortaya koymaktadır. Mallik ve Gangopadhyay (2023) eğitim bağlamında yapay zekânın sürdürülebilirlik hedeflerine katkısını tartışırken; Xia et al. (2023) ESG raporlarının homojenleşme eğilimine dikkat çekmekte; Qing ve Jin (2023) yapay zekâ ile yeşil inovasyonun rolünü öne çıkarmakta; Xu (2024) finans sektöründe veri kalitesi ve etik boyutlara odaklanmakta; Năstăsă et al. (2024) ise yapay zekânın sürdürülebilir kalkınmadaki potansiyel risklerini değerlendirmektedir.

Genel olarak literatür, yapay zekâ tabanlı dijital raporlama ve analitiğin, ESG süreçlerinin şeffaflığını, izlenebilirliğini ve etkinliğini artırdığı sonucuna ulaşmaktadır. Bununla birlikte, etik kaygılar, veri standardizasyonu eksikliği ve uzun vadeli ampirik kanıtların yetersizliği, bu alanın en önemli sınırlılıklarını oluşturmaktadır.

2.1.19.7 Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Yapay zekâ ve çevresel, sosyal ve yönetim temelli uygulamaların entegrasyonu üzerine gelecek araştırmalar için birkaç önemli yönelim öne çıkmaktadır. Öncelikle, bu alandaki uzun vadeli etkileri daha net biçimde ortaya koyabilmek için boylamsal ve ampirik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Mevcut araştırmalar genellikle kısa vadeli bulgulara dayandığından, sürdürülebilirlik üzerindeki kalıcı etkilerin görünür hale getirilmesi ancak uzun vadeli veri setleriyle mümkün olacaktır. İkinci olarak, metodolojik çeşitliliğin artırılması büyük önem taşımaktadır. Makine öğrenimi, metin madenciliği ve doğal dil işleme gibi ileri analitik yöntemlerin daha yaygın kullanımı, ESG raporlamalarının doğruluk ve şeffaflığını güçlendirecektir.

Ayrıca, yapay zekâ tabanlı uygulamaların güvenilirliğini sağlamak amacıyla veri güvenliği, şeffaflık ve algoritmik adalet gibi etik çerçevelerin oluşturulması gereklidir. Bu standartların küresel ölçekte uyumlu hale getirilmesi, yatırımcı güveni ve düzenleyici otoritelerin kabulü açısından kritik bir rol oynayacaktır. Diğer yandan, yapay zekâ destekli dijital dönüşümün yeşil inovasyonu nasıl tetiklediği vaka çalışmalarıyla analiz edilmeli, özellikle enerji verimliliği ve emisyon azaltımı gibi çevresel faydaların hangi mekanizmalar üzerinden ortaya çıktığı detaylandırılmalıdır.

Türkiye açısından bakıldığında, bu öneriler stratejik bir önem taşımaktadır. 2053 net sıfır hedefleri ve Yeşil Mutabakat uyum süreci çerçevesinde, yapay zekâ tabanlı ESG raporlamalarının eğitim, finans, üretim ve enerji gibi sektörlerde karşılaştırmalı olarak incelenmesi, hem akademik literatüre katkı sağlayacak hem de politika yapımcılar için yol gösterici olacaktır. Böylelikle Türkiye, dijital dönüşüm ve sürdürülebilirlik ekseninde daha güçlü bir uluslararası konum elde edebilecektir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021; Năstăsă, Dumitra ve Grigorescu, 2024).

2.1.19.8 Sonuç

Dijital ESG raporlaması ve yapay zekâ destekli analitik alanlarındaki literatür, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada bu teknolojilerin hem potansiyel katkılarını hem de sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Yapay zekâ, eğitimden finansa kadar geniş bir yelpazede ESG süreçlerine değer katmakta; ancak etik, şeffaflık ve veri güvenliği konularındaki riskler halen çözülmesi gereken kritik alanlar olarak varlığını sürdürmektedir. Gelecek çalışmaların,

bu boşlukları doldurarak daha bütüncül ve sorumlu bir yapay zekâ destekli ESG yönetimi çerçevesi geliştirmesi beklenmektedir.

2.1.20 Dijital Dönüşümün Kurumsal Sürdürülebilirlik Hedeflerine Etkisi

2.1.20.1 Giriş

Dijital dönüşüm, günümüzde işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Dijital teknolojilerin iş modelleri, üretim süreçleri, tedarik zinciri ve yönetim yapıları üzerindeki dönüştürücü etkisi, şirketlerin çevresel ve sosyal sorumluluklarını yerine getirme biçimlerini yeniden şekillendirmektedir. Bu bağlamda literatürde, dijital dönüşüm ile kurumsal sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi farklı açılardan ele alan pek çok çalışma bulunmaktadır.

2.1.20.2 Dijitalleşme ve Yeşil İnovasyon Kalitesi

Huang ve Lau (2024), dijital dönüşümün işletmelerin yeşil yenilik kapasiteleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, dijitalleşmenin finansal kısıtlamaları hafiflettiği, işletmelerin daha iyi finansal hizmetlere erişimini kolaylaştırdığı ve yeşil inovasyon yatırımlarını teşvik ettiği ortaya konulmaktadır. Bununla birlikte, dijital dönüşümün karmaşık piyasa düzenlemeleri ve yoğun rekabet ortamı gibi zorluklar barındırdığına da dikkat çekilmektedir. Dijital teknolojilerin bilgi akışını hızlandırarak, firmaların yeşil inovasyon süreçlerinde kaliteyi artırabileceği belirtilmiştir. Ancak bu süreçte enerji tüketiminin geçici olarak artabileceği, kaynak kullanımında beklenmedik yükler doğabileceği ifade edilmektedir. Dolayısıyla, dijital dönüşümün sürdürülebilirlik hedeflerine katkısının, ancak etkin düzenlemeler ve politika desteği ile kalıcı hale getirilebileceği belirtilmektedir.

2.1.20.3 Dijital Platformlar ve Kurumsal Sosyal Sorumluluk

Wang ve diğerleri (2024), dijital platformların kurumsal sosyal sorumluluk üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Çalışma, özellikle dijital finansman olanaklarının, küçük ve orta ölçekli işletmelerin finansman kısıtlamalarını hafiflettiğini göstermektedir. Ayrıca, dijital teknolojilerin çevresel sorumluluk davranışlarını teşvik ederek şirketlerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmalarına katkı sağladığı ortaya konulmaktadır. Çalışma, dijital platformların çevresel bilgi açıklamalarını artırdığı, iklim değişikliği risklerinin daha etkin yönetilmesini sağladığı ve kurumsal sürdürülebilirliği desteklediği vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, bölgesel farklılıkların ve sektörler arası farklı düzenleyici çerçevelerin bu etkileri değiştirdiği ifade edilmektedir. Eleştirel olarak, makale dijital platformların olumlu katkılarını detaylandırmakta, ancak veri güvenliği, erişim eşitsizlikleri ve maliyetler gibi sınırlılıkları daha az ele almaktadır.

2.1.20.4 Hizmet Odaklı Dönüşüm ve Döngüsel Ekonomi

Luo ve Liu (2024), dijital dönüşümün döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir ürün geliştirme üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve büyük veri teknolojilerinin ürün takibi, atık azaltma, kaynak verimliliğini artırma ve enerji tüketimini optimize etme süreçlerinde önemli katkılar sunduğu ortaya konulmaktadır. Dijital teknolojilerin kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada temel araçlar olduğu aynı zamanda müşteri memnuniyetini artırarak yeni iş modelleri oluşturduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, dijital dönüşümün ters U şeklinde bir etki yaratabileceği ve belirli bir seviyeden sonra çevresel faydaların azalabileceği belirtilmektedir. Bu bulgu, dijital dönüşüm yatırımlarının etkinlik düzeylerinin dikkatle ölçülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.1.20.5 Eleştirel Sentez

İncelenen çalışmalar, dijital dönüşümün kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki rolünü çok boyutlu biçimde ortaya koymaktadır. Qing ve Jin (2023), ESG ve dijital dönüşümün bütünleşik katkılarını vurgularken; Huang ve Lau (2024), yeşil inovasyon kalitesini artırıcı etkileri ele almaktadır. Wang ve diğerleri (2024), dijital platformların sosyal sorumluluk üzerindeki rolünü analiz ederken; Luo ve Liu (2024), döngüsel ekonomi bağlamında dijital teknolojilerin katkılarını değerlendirmektedir. Sun ve diğerleri (2024) ise düzenleyici çerçevelerin etkisine dikkat çekmektedir. Ancak literatür, dijital dönüşümün sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirirken, teknolojik altyapı eşitsizlikleri, adaptasyon maliyetleri ve kültürel direnç gibi kritik sınırlılıkları yeterince ele almamaktadır. Ayrıca, dijital dönüşümün uzun vadeli etkileri konusunda boylamsal araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.20.6 Gelecek Araştırmalar için Öneriler

Dijital dönüşümün sürdürülebilirlik hedefleri üzerindeki etkilerini daha kapsamlı biçimde ortaya koymak için gelecek araştırmalarda bir dizi kritik odak alanı öne çıkmaktadır. Öncelikle, boylamsal araştırmalarla dijital dönüşümün uzun vadeli etkilerinin izlenmesi gerekmektedir. Bu sayede dijitalleşmenin sürdürülebilir kalkınmaya katkısının yalnızca kısa vadeli performans göstergeleri üzerinden değil, yıllara yayılan veri setleri aracılığıyla değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra, bölgesel ve sektörel karşılaştırmalar yapılarak dijital dönüşümün çevresel, sosyal ve yönetim performansına farklı sektörlerde nasıl yansıdığı kıyaslanmalı; özellikle enerji, üretim, finans ve kamu hizmetleri alanlarında karşılaştırmalı analizler yapılmalıdır.

Dijitalleşme yatırımlarının çevresel ve ekonomik getirilerinin ölçülmesi amacıyla maliyet-fayda analizlerinin yaygınlaştırılması da önemli bir gerekliliktir. Bu analizler, yatırım kararlarının sadece ekonomik değil aynı zamanda karbon azaltımı ve enerji verimliliği gibi çevresel etkilerle birlikte değerlendirilmesine imkân tanıyacaktır. Ayrıca, farklı ülkelerdeki heterojen düzenlemelerin dijital dönüşüm süreçleri üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde daha uyumlu bir düzenleyici çerçevenin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Son olarak, dijital dönüşümün başarısı yalnızca teknoloji yatırımlarına değil, aynı zamanda kurumsal kültürün dönüşümüne bağlıdır. Yönetimsel uyum, çalışanların eğitimi ve dijital beceri geliştirme programları bu sürecin en kritik unsurlarını oluşturmaktadır. Türkiye bağlamında ise, 2053 net sıfır hedefleri ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'na uyum süreci göz önüne alındığında, dijital dönüşümün kurumsal sürdürülebilirlikle bütünleşmesi için bu alanlarda yapılacak araştırmalar stratejik bir önem taşımaktadır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021; Wang ve Xia, 2023).

2.1.20.7 Sonuç

Dijital dönüşüm, işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında giderek daha stratejik bir araç haline gelmektedir. Yapay zekâ, büyük veri, IoT ve dijital platformlar aracılığıyla çevresel sorumluluklar güçlendirilmekte; yeşil inovasyon teşvik edilmekte; döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği desteklenmektedir. Ancak, bu süreç yalnızca teknolojik gelişmelere değil, aynı zamanda etik, toplumsal ve düzenleyici faktörlere de bağlıdır.

Sonuç olarak, dijital dönüşümün sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi, teknoloji yatırımlarıyla sınırlı olmayıp, kurumsal kültür, düzenleyici uyum ve yönetim stratejileri ile birlikte ele alınmalıdır. Gelecek araştırmaların, dijital dönüşüm ile sürdürülebilirlik arasındaki çok boyutlu ilişkiyi daha derinlemesine analiz etmesi, bu alandaki literatürün gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır.

2.1.21 ESG Risklerinin Dijital Olarak İzlenmesi ve Yönetilmesi

2.1.21.1 Giriş

ESG risklerinin dijital olarak izlenmesi ve yönetilmesi, günümüz işletmeleri için hem rekabet avantajı hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Çevresel, sosyal ve yönetim faktörlerinin giderek daha fazla önem kazandığı küresel iş dünyasında, dijital teknolojilerin bu risklerin tespiti, ölçülmesi ve yönetiminde nasıl kullanılabileceği üzerine yoğunlaşan literatür gün geçtikçe genişlemektedir.

2.1.21.2 Dijitalleşme, Paydaşlar ve ESG Performansı

Wang ve Hou (2024) tarafından Çin'de halka açık işletmeler üzerinde gerçekleştirilen araştırma, dijital dönüşümün ve kazanç yönetiminin çevresel, sosyal ve yönetim performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemektedir. Bulgular, hem içsel hem de dışsal faktörlerin bu performansı şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Dışsal faktörler arasında özellikle hükümet politikaları, kredi kuruluşlarının yaklaşımı, medya etkisi ve tüketici talepleri ön plana çıkmaktadır. Örneğin, bankaların çevresel, sosyal ve yönetim kriterlerine güçlü uyum sağlayan şirketlere daha kolay finansman sağlaması, bu şirketlerin sürdürülebilirlik odaklı davranışlarını teşvik etmektedir. Medyanın şirketlerin sürdürülebilirlik performansına dair eleştirileri veya olumlu yansımaları da kurumsal itibarı doğrudan etkilemektedir.

İçsel faktörler açısından ise, yönetim kadrosunun özellikleri belirleyici bir rol oynamaktadır. Yöneticilerin deneyimleri, stratejik vizyonları ve hatta kişisel özellikleri çevresel, sosyal ve yönetim performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle kadın yönetim kurulu üyelerinin sosyal ve çevresel konulara daha fazla önem verdiği, bu durumun kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerini güçlendirdiği belirtilmektedir. Bu bulgu, yönetim yapısında çeşitliliğin ve kapsayıcılığın, çevresel ve sosyal performansın gelişimi için stratejik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

Araştırma, dijitalleşmenin özellikle yönetim ve sosyal boyutlarda olumlu etkiler yarattığını vurgulamaktadır. Dijital teknolojiler sayesinde şeffaflık artmakta, paydaşlarla iletişim güçlenmekte ve sosyal sorumluluk projelerinin etkisi daha geniş kitlelere ulaşmaktadır. Bununla birlikte, çevresel performans üzerindeki etkilerin daha karmaşık ve uzun vadeli olduğu, özellikle karbon emisyonlarının azaltımı ve enerji verimliliği gibi alanlarda dijital dönüşümün faydalarının zaman içerisinde ortaya çıktığı görülmektedir.

Türkiye bağlamında da benzer dinamikler dikkat çekmektedir. Dijitalleşmenin, özellikle 2053 net sıfır hedefleri doğrultusunda sürdürülebilirlik politikalarının uygulanmasında kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Finans kuruluşlarının yeşil yatırımları önceliklendirmesi, tüketici farkındalığının artması ve medyanın iklim krizi ile sürdürülebilirlik konularına yoğunlaşması, Türkiye'deki şirketlerin çevresel, sosyal ve yönetim performansını doğrudan etkilemektedir. Ancak, KOBİ'lerin dijital adaptasyon kapasitesi, sermaye erişimi ve kurumsal yönetim yapılarındaki eksiklikler, dijitalleşmenin etkilerini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, hem büyük ölçekli işletmelerin hem de KOBİ'lerin dijital dönüşüm yolculuklarını destekleyecek ulusal politikaların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Wang ve Hou, 2024).

2.1.21.3 Yapay Zekâ ve Finansal Kurumlarda ESG Yönetimi

Xu (2024), finansal kurumlarda yapay zekânın ESG süreçlerine entegrasyonunu inceleyen kapsamlı bir endüstriyel anket sunmaktadır. Çalışmada, ESG verilerinin merkezi bir platform aracılığıyla toplanmasının ve erişilebilir hale getirilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Çalışma, gerçek zamanlı ESG görünürlüğüne yatırımçı kararlarını doğrudan etkilediğini ve daha bilinçli portföy yönetimini mümkün kıldığını ifade etmektedir. Bulut tabanlı çözümler,

otomatik raporlama araçları ve makine öğrenimi algoritmaları sayesinde ESG verilerinin işlenmesi kolaylaşmakta ve risk yönetimi daha proaktif hale gelmektedir. Ancak, çalışmada veri kalitesi, siber güvenlik ve algoritmik önyargılar gibi temel zorluklara dikkat çekilmektedir. Bu unsurlar, dijital ESG risk yönetiminde güvenilirlik ve etkinlik açısından kritik sınırlılıklar oluşturmaktadır.

2.1.21.4 Dijital Platformlar ve Kurumsal Sorumluluk Uygulamaları

Wang ve çalışma arkadaşları (2024), dijital platformların kurumsal sosyal sorumluluk uygulamaları üzerindeki rolünü incelemekte ve özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin finansman kısıtlarını hafifletmede dijital teknolojilerin sağladığı katkıyı ön plana çıkarmaktadır. Çalışma, dijital finansman modellerinin iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmada ve çevresel, sosyal ve yönetim performansını güçlendirmede önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir.

Blokzincir teknolojisi, büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi dijital araçların, şirketlerin çevresel davranışlarını daha sorumlu hale getirdiği ve sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kapsamını genişlettiği vurgulanmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde işletmeler, hem paydaş beklentilerine daha şeffaf biçimde yanıt verebilmekte hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu stratejiler geliştirebilmektedir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin, dijital teknolojiler aracılığıyla daha kolay finansmana erişebilmesi ve sürdürülebilirlik odaklı yatırımlar yapabilmesi, kurumsal sosyal sorumluluk uygulamalarının yaygınlaştırılmasında kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, araştırmada kullanılan yöntemlerin sınırlılıkları ve farklı sektörlerdeki örneklem çeşitlilikleri, bulguların tüm işletmeler için genelleştirilebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, dijital platformların kurumsal sosyal sorumluluk üzerindeki etkilerini daha geniş ve çeşitlendirilmiş veri setleriyle inceleyen, uzun vadeli ve karşılaştırmalı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Wang ve diğerleri, 2024).

2.1.21.5 Eleştirel Sentez

İncelenen çalışmalar, ESG risklerinin dijital olarak izlenmesi ve yönetilmesi konusunda geniş bir perspektif sunmaktadır. Xia et al. (2023), dinamik analiz yöntemleriyle ESG raporlarının evrimini ortaya koyarken; Qing ve Jin (2023), dijital dönüşüm ve yapay zekânın sürdürülebilirliğe katkısını vurgulamaktadır. Wang ve Hou (2024), dışsal ve içsel faktörlerin rolünü detaylandırmakta; Xu (2024), finansal kurumlar için yapay zekâ tabanlı veri yönetimini ön plana çıkarmakta; Wang et al. (2024) ise dijital platformların CSR üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Bu çalışmaların ortak bulgusu, dijital teknolojilerin ESG risklerini daha etkin biçimde izleme ve yönetme kapasitesi sunduğudur. Ancak, veri güvenliği, standartlaşma eksiklikleri, adaptasyon maliyetleri ve algoritmik önyargılar gibi kritik sorunlar, bu süreçlerin başarısını sınırlamaktadır.

2.1.21.6 Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Dijital dönüşümün çevresel, sosyal ve yönetim riskleri üzerindeki etkilerini daha kapsamlı biçimde anlayabilmek için gelecek araştırmalarda çeşitli boyutlara odaklanılması gerekmektedir. Öncelikle, boylamsal araştırmalar yoluyla dijital dönüşümün sürdürülebilirlik riskleri üzerindeki uzun vadeli etkilerinin ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmalar, yalnızca kısa vadeli performans sonuçlarını değil, yıllara yayılan eğilimleri de ortaya koyarak daha güvenilir bir analiz imkânı sunacaktır. Ayrıca, sektörler arası karşılaştırmalar yapılarak, farklı sektörlerde çevresel, sosyal ve yönetim risklerinin dijital ortamda nasıl izlendiği ve bu izleme süreçlerindeki farklılıkların neler olduğu detaylı biçimde analiz edilmelidir.

Dijital platformların yaygınlaşmasıyla birlikte, etik ve hukuki çerçevelerin oluşturulması da kritik bir ihtiyaçtır. Uluslararası standartların geliştirilmesi, dijital sürdürülebilirlik platformlarının etik ve sorumlu kullanımını güvence altına alacaktır. Bunun yanı sıra, veri kalitesi ve siber güvenlik alanında yeni metodolojiler ve teknolojilerin geliştirilmesi, elde edilen verilerin doğruluğunu artıracak ve hassas bilgilerin korunmasını sağlayacaktır.

Son olarak, yapay zekâ tabanlı analizlerin giderek daha fazla kullanılmasıyla birlikte algoritmik adalet konusu önem kazanmaktadır. Şeffaflık ve hesap verebilirliğin artırılması, hem yatırımcı güvenini hem de düzenleyici kurumların denetim kapasitesini güçlendirecektir. Tüm bu boyutların birlikte ele alınması, dijital dönüşümün sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde ilerlemesine katkı sağlayacaktır (Wang ve Hou, 2024; Xu, 2024).

2.1.21.7 Sonuç

ESG risklerinin dijital olarak izlenmesi ve yönetilmesi, şirketlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Dijital dönüşüm ve yapay zekâ uygulamaları, ESG performansının şeffaflığını artırmakta, risklerin daha etkin yönetilmesine olanak tanımakta ve paydaş güvenini güçlendirmektedir. Bununla birlikte, veri kalitesi, güvenlik ve uyum sorunları çözülmediği sürece bu sistemlerin etkinliği sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, gelecekte yapılacak araştırmaların hem teknik hem de yönetim boyutlarını kapsayarak, dijital ESG risk yönetiminin bütüncül bir çerçevede ele alınmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

2.1.22 Politika Önerileri: ESG ve Dijitalleşmenin Entegre Edilmesi

2.1.22.1 Dijital Vatandaşlık ve Eğitim Boyutu

Zehra Altınay Gazi'nin (2016) çalışması, dijital vatandaşlık kavramının eğitim sistemleri üzerindeki dönüştürücü etkisini vurgulamaktadır. Dijital vatandaşlık, yalnızca teknoloji kullanımını değil, aynı zamanda sorumluluk, etik, saygı ve empati gibi değerlerin eğitim yoluyla kazandırılmasını da içermektedir. Eğitim sistemlerine entegre edilen dijital vatandaşlık uygulamaları, uzun vadede çevreye duyarlı, sosyal sorumluluk bilincine sahip ve dijital dönüşüm süreçlerini sürdürülebilirlik bağlamında okuyabilen bireyler yetiştirmeye katkı sağlamaktadır. Bu kaspamda politika yapıcılar için önemli olan nokta, dijital vatandaşlık eğitimlerinin okul öncesinden yükseköğretime kadar tüm kademelere yaygınlaştırılmasıdır. Dijital vatandaşlık derslerinin müfredata zorunlu ders olarak eklenmesi, kültürel farkındalığı ve kuşaklar arası empatiyi artırma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, dijital vatandaşlık eğitimleri yoluyla geliştirilen bireysel bilinç, kurumsal ESG uygulamalarının toplumsal düzeyde daha güçlü bir taban bulmasına olanak tanımaktadır.

2.1.22.2 Dijitalleşmenin Sürdürülebilir Kalkınma Üzerindeki Etkileri

Milica Jovanović ve arkadaşlarının (2018) çalışması, dijitalleşmenin sürdürülebilir kalkınma üzerindeki etkilerini, özellikle Avrupa Birliği'nin Dijital Ekonomi ve Toplum Endeksi üzerinden incelemektedir. Dijitalleşme, ekonomik büyümeyi hızlandırmakta, kamu hizmetlerini daha etkin hale getirmekte ve toplumların yenilikçilik kapasitesini artırmaktadır. Ancak bu süreç, aynı zamanda dijital bölünme sorununu da beraberinde getirmektedir. Gelişmiş ülkeler dijital altyapılarını hızla yenilerken, gelişmekte olan ülkelerde bu dönüşüm daha yavaş ilerlemekte ve eşitsizlikleri derinleştirebilmektedir. Politika boyutunda, dijitalleşmenin sürdürülebilir kalkınma ile entegrasyonu için dijital erişim hakkı temel bir insan hakkı olarak tanımlanmalıdır. Bu doğrultuda, kırsal bölgelerde internet altyapısının güçlendirilmesi, dijital okuryazarlık eğitimlerinin yaygınlaştırılması ve kapsayıcı finansal teknolojilerin desteklenmesi kritik önemdedir. Böylece dijitalleşmenin yarattığı faydalar yalnızca büyük kentlerde veya belirli sosyal gruplarda değil, toplumun tüm kesimlerinde hissedilebilir hale gelecektir.

2.1.22.3 Yeşil Bilgi Teknolojileri ve Dijital Yönetişim

Rivas-Asanza ve arkadaşlarının (2018) çalışması, yeşil bilgi ve iletişim teknolojilerinin sürdürülebilirlik uygulamalarındaki rolünü ortaya koymaktadır. Çalışma, özellikle IoT cihazları, akıllı enerji sistemleri ve bulut tabanlı çözümler sayesinde enerji verimliliğinin artırılabilirliğini ve çevresel etkilerin azaltılabilirliğini vurgulamaktadır. Yeşil BT uygulamaları, karbon emisyonlarının düşürülmesi, atık yönetiminin dijitalleştirilmesi ve kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından kritik katkılar sağlamaktadır. Politika düzeyinde, COBIT 5 gibi yönetim modellerinin benimsenmesi, dijital altyapıların sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirilmesi için gerekli görülmektedir. Ayrıca, Avrupa Birliği'nin EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) ve ISO 14001 gibi çevresel yönetim standartlarının dijital platformlara entegrasyonu, hem şeffaflığı artırmakta hem de ESG raporlamasının güvenilirliğini güçlendirmektedir. Türkiye bağlamında ise, yeşil BT politikalarının henüz erken aşamada olduğu görülmekte, ancak sıfır atık girişimleri ve enerji verimliliği stratejileriyle bu sürecin hızlanabileceği değerlendirilmektedir.

2.1.22.4 Yeşil İnovasyonun Rolü ve ESG-Dijitalleşme Sinerjisi

Qing ve Jin'in (2023) çalışması, ESG ve dijital dönüşümün entegrasyonunda yeşil inovasyonun kilit rol oynadığını göstermektedir. Dijital teknolojiler, yeşil inovasyonun hızlanmasına katkıda bulunmakta, örneğin akıllı üretim sistemleri enerji tüketimini azaltmakta, blockchain tabanlı tedarik zinciri çözümleri şeffaflığı artırmaktadır. Bu sinerji, şirketlerin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda finansal performanslarını da iyileştirmektedir. Ancak dijitalleşmenin beraberinde getirdiği yüksek yatırım maliyetleri, uyum zorlukları ve düzenleyici belirsizlikler, bu sürecin başarıyla uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, politika önerileri yalnızca teknolojik entegrasyonu teşvik etmekle sınırlı kalmamalı; aynı zamanda yeşil Ar-Ge yatırımlarına vergi indirimleri, finansman kolaylıkları ve kamu-özel iş birlikleri gibi destekleyici mekanizmalar geliştirilmelidir.

2.1.22.5 Politika Boyutunda Çapraz Sonuçlar

ESG ve dijitalleşmenin entegrasyonu üzerine yapılan tüm çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde, politika tasarımlarının bütüncül bir bakış açısı ile ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Eğitim, kültürel dönüşüm, dijital erişim eşitliği, yeşil BT ve yeşil inovasyon gibi farklı boyutların birlikte değerlendirilmesi, politika yapıcılar için kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı bu entegrasyonun somut bir örneği olarak öne çıkmaktadır. Türkiye özelinde ise, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ve Sıfır Atık Projesi, ESG ve dijitalleşmenin entegrasyonuna yönelik politikaların güçlendirilmesine hizmet eden önemli girişimlerdir. Ancak, bu politikaların daha etkin olması için yerel yönetimlerin, özel sektörün ve sivil toplumun aktif katılımını sağlayacak mekanizmaların kurulması gerekmektedir.

2.1.22.6 Sonuç ve Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Sonuç olarak, ESG ve dijitalleşmenin entegrasyonu, politika önerileri açısından çok boyutlu bir alan sunmaktadır. Eğitim politikaları, dijital vatandaşlığın gelişimini desteklemekte; dijitalleşme politikaları, sürdürülebilir kalkınmayı hızlandırmakta; yeşil BT uygulamaları, enerji ve kaynak verimliliğini artırmakta; yeşil inovasyon ise uzun vadeli rekabet gücü sağlamaktadır. Ancak bu süreçte karşılaşılan dijital bölünme, yüksek maliyetler, düzenleyici belirsizlikler ve toplumsal uyum sorunları, entegrasyonun önündeki temel engellerdir. Gelecek araştırmaların, bu engelleri aşmaya yönelik politika mekanizmalarını daha somut ve uygulamaya dönük şekilde geliştirmesi gerekmektedir. Ayrıca, farklı sektörlerde ve farklı coğrafyalarda dijitalleşme-ESG entegrasyonunun nasıl

gerçekleştiğini karşılaştırmalı olarak incelemek, politika yapıcılar için daha esnek ve bağlamsal çözümler geliştirme imkânı sunacaktır.

2.2 Yönetim Kurullarında Dijital Sürdürülebilirlik Yetkinliği

2.2.1 Yönetim Kurullarının Dijital Okuryazarlık Düzeyi

Yönetim kurullarının dijital okuryazarlık düzeyi üzerine yapılan literatür incelemesi, bu konunun çok boyutlu ve geniş bir perspektiften ele alınması gerektiğini göstermektedir. İncelemeler; yaşlı bireylerde dijital okuryazarlığın nasıl değerlendirildiği, yönetim kurullarının dijital teknolojiler ve ortaya çıkan risklerle ilgili sorumlulukları, pandemi döneminde dijital yeterliliklerin nasıl dönüştüğü ve yükseköğretimde dijital liderliğin önemi gibi farklı eksenleri kapsamaktadır. Böylece hem bireysel düzeyde hem de kurumsal ve örgütsel bağlamda dijital okuryazarlığın boyutları ortaya konmaktadır.

2.2.1.1 Yaşlı Bireylerde Dijital Okuryazarlık

Soyeon Oh ve arkadaşlarının (2021) "*Measurement of Digital Literacy Among Older Adults: Systematic Review*" başlıklı çalışması, yaşlı bireylerin dijital okuryazarlık seviyelerinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmada Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen Dijital Yeterlilik Çerçevesi (DigComp) temel alınmış ve dijital yeterlilik beş ana alan üzerinden tanımlanmıştır:

- Bilgi ve veri okuryazarlığı: Dijital ortamda bilgi arama, değerlendirme ve kullanma becerisi.
- İletişim ve iş birliği: Çevrimiçi platformlarda etkili iletişim kurma ve dijital iş birliği yürütme.
- Dijital içerik üretimi: Metin, görsel, video veya çoklu ortam içerikleri oluşturma ve düzenleme.
- Güvenlik: Kişisel verilerin, cihazların ve dijital kimliğin korunması.
- Problem çözme: Dijital teknolojileri yeni durumlara uyarlama ve dijital sorunlara çözüm geliştirme.

Araştırma, mevcut ölçüm araçlarının çoğunun bu temel becerileri kapsadığını; fakat yaşlı bireylerin özel ihtiyaç ve engellerine uygun hale getirilmiş araçların çok sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca kültürel ve teknolojik farklılıkların dikkate alınmasının zorunlu olduğu vurgulanmaktadır. Yönetim kurulları açısından bu bulgular, özellikle ileri yaşta olan kurul üyelerinin dijital yeterliliklerini geliştirmek için özel eğitim programları ve uyarlanabilir ölçüm araçlarının geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

2.2.1.2 Yönetim Kurullarının Dijital Teknolojilerle İlgili Sorumlulukları

Turlough Guerin'in (2022) çalışması, yönetim kurullarının yeni teknolojiler karşısındaki sorumluluklarını ve risk yönetiminde üstlenmeleri gereken rolü ortaya koymaktadır. Makale, özellikle yapay zeka, blokzincir ve siber güvenlik gibi alanlarda hızla ortaya çıkan risklerin kurulların gündemine girmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Guerin'e göre kurulların:

- Geleneksel risk yönetimi modellerini yeniden gözden geçirmesi,
- Dijital çağın dinamiklerine uygun veri temelli kurumsal risk yönetim sistemleri geliştirmesi,
- Teknolojik konularda yetkinliğe sahip teknik uzmanların yönetim kurullarına dahil edilmesi

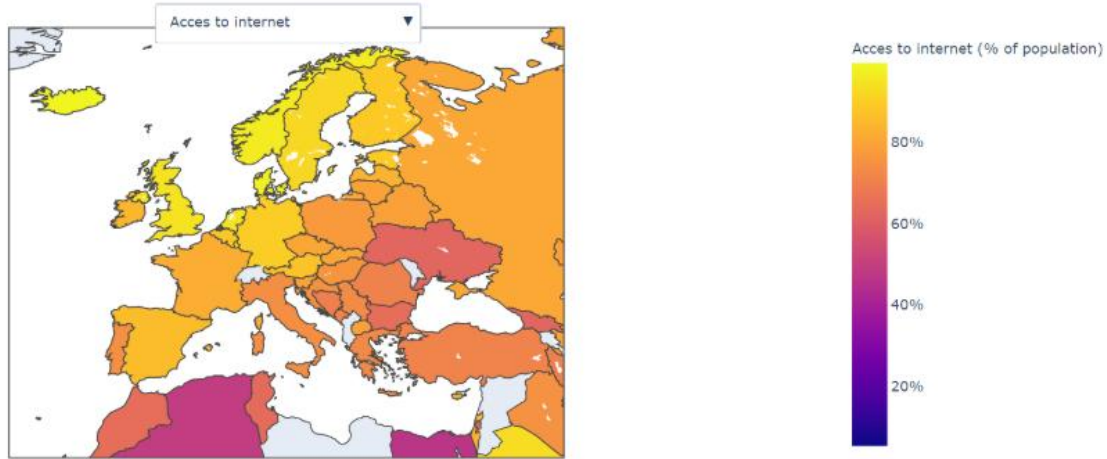
büyük önem taşımaktadır.

Makalenin güçlü yönü, yönetim kurullarının kültür ve teknoloji arasındaki etkileşimi anlamalarının zorunluluğunu net bir biçimde ortaya koymasındır. Bununla birlikte, önerilerin pratikte nasıl hayata geçirileceğine dair somut stratejilerin eksikliği dikkat çekmektedir. Ayrıca teknolojik uzmanların kurullara entegrasyonunun etik, organizasyonel ve karar alma süreçlerine olan etkisi de ayrıntılı biçimde ele alınmamıştır. Bu durum, yönetim kurullarının dijital riskleri etkin biçimde yönetebilmesi için daha fazla araştırma ve uygulama rehberine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

2.2.1.3 Pandemi Sürecinde Dijital Yeterliliklerin Evrimi

COVID-19 pandemisi sırasında, dijital becerilerin gelişimi ve bu süreçte oluşan siber güvenlik farkındalığı farklı araştırmaların odak noktası olmuştur. Pawlicka ve arkadaşlarının (2022) çalışması, pandemi döneminde bireylerin hem profesyonel hem de kişisel yaşamlarında dijital ortamların rolünü daha iyi anladıklarını ortaya koymaktadır. Bu araştırmaya göre dijital yeterlilik, yalnızca teknik bilgi değil; aynı zamanda bireylerin dijital ortamlara yönelik tutumlarını, eleştirel düşünme becerilerini ve bu ortamların sunduğu fırsatları değerlendirme yetilerini de kapsamaktadır. Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından da vurgulandığı üzere dijital yeterlilik, bilgi toplum teknolojilerinin güvenli ve eleştirel kullanımı olarak tanımlanmakta ve **DigComp çerçevesi** üzerinden beş kategori ve 21 spesifik beceriye dayandırılmaktadır.

Pandemi, bireylerin dijital becerilerinin gelişmesine katkı sağlamış olsa da, bu gelişmelerin sürdürülebilirliği ve kurumsal yapılara entegrasyonu konusunda belirsizlikler devam etmektedir. Bu nedenle, becerilerin kurumsal uygulamalara entegre edilmesi, eğitim politikalarıyla desteklenmesi ve sürdürülebilir hale getirilmesi kritik önemdedir.



Şekil 1: COVID-19 sürecinde eğitimde dijitalleşme: Avrupa ülkelerinde öğrencilerin evde bilgisayar erişim oranları.

Görsel, pandemi döneminde dijital eşitsizlikleri ve çevrimiçi öğrenmeye geçişte yaşanan farklılıkları ortaya koymaktadır.

(European Data Portal (data.europa.eu), *Education during COVID-19: Moving towards e-learning* (2020).)

2.2.1.4 Türkiye’de Pandemi Sürecinde Dijital Yeterliliklerin Gelişimi

Türkiye’de pandemi, özellikle **uzaktan eğitim, e-devlet hizmetleri, dijital bankacılık ve e-ticaret** alanlarında dijital yeterliliklerin hızlı bir şekilde artmasına yol açmıştır. Millî Eğitim Bakanlığı tarafından uygulamaya konulan **EBA (Eğitim Bilişim Ağı)** platformu, milyonlarca öğrenci ve öğretmenin uzaktan eğitim sürecine dahil olmasını sağlamış; bu da dijital becerilerin günlük yaşamın bir parçası haline gelmesine katkıda bulunmuştur. Ancak, **kırsal bölgelerde internet erişimi ve cihaz yetersizliği** gibi sorunlar, dijital yeterliliklerde bölgesel ve sosyo-ekonomik eşitsizlikleri daha görünür hale getirmiştir.

Ayrıca, pandemi döneminde kamu kurumları ve özel sektör, **uzaktan çalışma modelleri** ile birlikte dijital araçların kurumsal yönetim süreçlerine entegrasyonunu hızlandırmıştır. Özellikle bankacılık ve finans sektöründe, mobil bankacılık uygulamalarının kullanım oranı artmış; e-ticaret ve dijital ödeme sistemleri günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu süreç, bireylerde siber güvenlik farkındalığının da yükselmesine neden olmuştur. Nitekim **BTK (Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu)**, pandemi süresince artan siber saldırı ve dolandırıcılık vakalarına karşı uyarılar yayınlamış, kullanıcıların güvenli dijital davranış geliştirmeleri için bilgilendirme kampanyaları düzenlemiştir.

Türkiye’de pandemi döneminde dijitalleşmenin hızlanması, aynı zamanda **dijital okuryazarlık ve yaşam boyu öğrenme politikalarının önemini** de gündeme taşımıştır. Yükseköğretim Kurulu (YÖK), üniversitelerde dijital ders içeriklerinin geliştirilmesini ve uzaktan eğitimin kalıcı hale getirilmesini teşvik etmiştir. Bununla birlikte, dijital becerilerin yalnızca kriz dönemlerinde değil, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak kalıcı eğitim programlarına entegre edilmesi gerektiği de ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, Türkiye’de COVID-19 pandemisi, dijital yeterliliklerin hızla gelişmesini sağlamış; ancak aynı zamanda **erişim eşitsizlikleri, altyapı eksiklikleri ve dijital güvenlik riskleri** gibi sorunları da daha görünür hale getirmiştir. Bu nedenle, dijital becerilerin sürdürülebilirliği için ulusal politikaların güçlendirilmesi, bölgesel farklılıkların giderilmesi ve toplumun her kesimine kapsayıcı dijital eğitim olanaklarının sunulması büyük önem taşımaktadır.

2.2.1.5 Yükseköğretimde Dijital Liderliğin Önemi

Ghamrawi ve Tamim’in (2023) araştırması, yükseköğretimde dijital dönüşüm süreçlerinde liderliğin rolünü detaylı şekilde incelemektedir. Bu çalışma, dijital liderlerin şu temel becerilere sahip olması gerektiğini vurgulamaktadır:

- Vizyonerlik: Dijital dönüşümün geleceğine yönelik açık bir vizyon geliştirmek.
- Öğrenme kültürü oluşturma: Kurum içinde sürekli öğrenmeyi ve teknolojik adaptasyonu teşvik etmek.
- Dijital vatandaşlık ve etik farkındalık: Teknoloji kullanımında etik, kapsayıcılık ve sorumluluk bilinci oluşturmak.
- Mesleki mükemmeliyet ve sistemsel iyileştirme: Eğitim ve yönetim süreçlerinde dijital araçları etkin kullanarak kaliteyi artırmak.

Araştırma, etkili dijital liderlerin sürekli öğrenen, teknolojik değişimlere açık ve yenilikçi bilgi arayışında olan bireyler olduğunu göstermektedir. Ancak, bu liderlik becerilerinin nasıl kurumsal stratejilere ve somut eğitim uygulamalarına dönüştürülebileceği konusunda daha fazla öneriye ihtiyaç vardır.

2.2.1.6 Sonuç ve Genel Değerlendirme

Yapılan literatür taraması, yönetim kurullarının dijital okuryazarlık düzeyini artırmak için çok boyutlu bir yaklaşımın gerekli olduğunu göstermektedir:

1. Bireysel düzey: Özellikle yaşlı bireyler için uyarlanmış eğitim ve ölçüm araçları geliştirilmeli.
2. Kurumsal düzey: Yönetim kurulları dijital risk yönetimini stratejik bir öncelik haline getirmeli, teknik uzmanlığı karar süreçlerine entegre etmeli.
3. Toplumsal ve eğitimsel düzey: Dijital liderlik vizyonerlik, etik farkındalık ve öğrenen kültür oluşturma üzerine inşa edilmeli.

Sonuç olarak, dijital okuryazarlık yalnızca bireysel bir beceri değil; aynı zamanda kurumsal kültür, eğitim politikaları ve liderlik yaklaşımlarıyla güçlenen, sürdürülebilir bir kapasite haline gelmelidir. Yönetim kurullarının bu kapasiteyi geliştirmesi, dijital dönüşüm süreçlerinde başarılı olmaları açısından hayati önem taşımaktadır.

2.2.2 Dijital Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yönetmelik Yansımaları

Dijital sürdürülebilirlik, günümüzde işletmelerin çevresel ve ekonomik hedeflerini bir araya getirmede kritik bir araç haline gelmiştir. Literatür, dijital teknolojilerin farklı sektörlerdeki etkilerini; sağlık yönetiminden tedarik zinciri performansına, döngüsel ekonomi uygulamalarından yeşil inovasyona ve hizmet odaklı dönüşüme kadar çok geniş bir yelpazede incelemektedir.

2.2.2.1 Dijital Sağlık Perspektifi

Angerer ve arkadaşlarının (2022) çalışması, dijital sağlık teknolojilerinin sağlık yönetimi üzerindeki etkilerini sistematik biçimde ele almakta ve bu teknolojilerin sağlık sektöründe yarattığı dönüşüm potansiyeline dikkat çekmektedir. Araştırmada üç temel nokta öne çıkarılmaktadır:

- Dijital sağlık uygulamalarının henüz olgunluk seviyesine ulaşmadığı,
- Teknolojik entegrasyonun kurumsal sağlık süreçlerinde devrim yaratma potansiyeline sahip olduğu,
- Sağlık sektöründe teknoloji uzmanları ile yönetim kadrolarının iş birliğinin sürdürülebilir çözümler için zorunlu olduğu,

vurgulanmaktadır. Çalışma ayrıca, e-Sağlık uygulamaları ile büyük veri analitiğinin birleşiminin, sağlık yönetiminde yalnızca operasyonel verimliliği değil, aynı zamanda yönetim ve sürdürülebilirlik açısından da daha bütünsel yaklaşımlar gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

2.2.2.2 Türkiye’de Dijital Sağlık Uygulamaları

Türkiye’de dijital sağlık perspektifi, özellikle Sağlık Bakanlığı tarafından yürütülen Sağlıkta Dijital Dönüşüm Programı kapsamında şekillenmektedir. Bu bağlamda öne çıkan uygulamalar şunlardır:

e-Nabız Kişisel Sağlık Sistemi: Vatandaşların kendi sağlık kayıtlarını görüntüleyebilmesine, laboratuvar sonuçlarını takip edebilmesine ve kronik hastalık süreçlerini yönetebilmesine olanak tanımaktadır. 2022 itibarıyla 80 milyondan fazla vatandaşın sisteme kayıtlı olduğu açıklanmıştır.

Tele-sağlık ve Tele-tıp Uygulamaları: Özellikle pandemi sürecinde hız kazanmış, uzaktan muayene ve reçeteleme sistemleri hayata geçirilmiştir. Ancak bu uygulamaların hukuki altyapısı ve yaygınlaştırılması halen tartışma konusudur.

MHRS (Merkezi Hekim Randevu Sistemi): Dijital sağlık hizmetlerinin en bilinen örneklerinden biridir. Pandemi sırasında sistem üzerinden çevrimiçi randevuların artışı, dijitalleşmenin sağlık hizmetlerine erişimi kolaylaştırdığını göstermiştir.

Büyük Veri ve Yapay Zekâ Çalışmaları: Türkiye’de özellikle kamu hastanelerinde sağlık verilerinin merkezi olarak toplanması, epidemiyolojik analizler ve erken uyarı sistemleri için fırsatlar sunmaktadır. TÜBİTAK ve üniversiteler iş birliğiyle, yapay zekâ tabanlı görüntü işleme ve hasta izleme sistemleri geliştirilmiştir.

2.2.2.3 Dijital Sağlıkta Karşılaşılan Zorluklar

Her ne kadar dijitalleşme sağlık hizmetlerinin verimliliğini artırsa da, Türkiye’de bazı yapısal sorunlar sürmektedir:

Altyapı farklılıkları: Büyükşehirlerde dijital sağlık sistemlerine erişim kolayken, kırsal bölgelerde internet ve cihaz erişimi sınırlıdır.

Dijital yeterlilik eksiklikleri: Hem sağlık çalışanları hem de vatandaşlar arasında dijital okuryazarlık seviyeleri farklılık göstermektedir.

Veri güvenliği ve mahremiyet: Sağlık verilerinin hassas doğası, KVKK (Kişisel Verilerin Korunması Kanunu) çerçevesinde ek düzenlemeler gerektirmektedir.

Entegrasyon sorunları: Özel hastaneler, üniversite hastaneleri ve kamu sağlık kurumları arasında veri entegrasyonu tam anlamıyla sağlanamamıştır.

2.2.2.4 Sürdürülebilirlik Perspektifi

Türkiye’nin dijital sağlık stratejileri, sadece sağlık hizmetlerine erişimi artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilir sağlık yönetimi hedefiyle de ilişkilendirilmektedir. Örneğin:

- Elektronik reçeteler ile kağıt kullanımının azaltılması,
- Uzaktan izleme sistemleri sayesinde hasta transferi ve ulaşım kaynaklı karbon ayak izinin düşürülmesi,
- Büyük veri analitiği ile hastalıkların erken teşhis edilmesi, sağlık harcamalarının optimize edilmesi, gibi etkiler, dijital sağlık sistemlerinin ESG (çevresel, sosyal ve yönetim) boyutuyla da bağlantılı olduğunu göstermektedir.

2.2.2.5 Dijital Dönüşüm, Akıllı Sistemler ve Sürdürülebilir Tedarik Zinciri

Abdul Rehman Khan ve arkadaşlarının (2022) araştırması, dijital dönüşüm, akıllı teknolojiler ve ekosistem inovasyonunun sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkisini incelemektedir.

- Çalışmada RBV (Resource-Based View) ve TOE (Technology-Organization-Environment) modelleri kullanılarak teorik bir çerçeve oluşturulmuştur.
- Dijital teknolojilerin, çevresel performansı artırdığı ve SDG’lere katkı sağladığı ortaya konmuştur.

- Ekosistem inovasyonu (EI) ve sürdürülebilir dijital stratejilerin (SDS), özellikle çevresel belirsizliklerin yoğun olduğu ülkelerde rekabet avantajı sağladığı belirtilmektedir.

Yönetmelik açıdan bu, şeffaflık, koordinasyon ve ESG uyumunun dijital araçlarla güçlendirilmesi anlamına gelmektedir.

2.2.2.6 Döngüsel Ekonomi ve Net-Sıfır Hedefleri

Agrawal ve arkadaşlarının (2023) çalışması, dijital teknolojilerin döngüsel ekonomi (CE) ve net sıfır ekonomi bağlamındaki rolünü incelemiştir. Çalışmada özellikle:

- Yapay zekâ, büyük veri, IoT, siber-fiziksel sistemler ve 3D yazıcı teknolojilerinin kaynak optimizasyonu, üretim süreçlerinin izlenmesi ve atık azaltımına katkıları vurgulanmaktadır.
- Gerçek zamanlı veri analitiği, karar alma mekanizmalarını destekleyerek geri dönüşüm uygulamalarının verimliliğini artırmaktadır.
- Dijital teknolojiler, ürünlerin kullanım ömrünü uzatma, tahmine dayalı bakım ve yeniden kullanım süreçlerinde stratejik avantaj sağlamaktadır.

Ancak bu süreçlerde yüksek maliyetler, veri güvenliği ve gizlilik sorunları kritik engeller olarak öne çıkmaktadır (Agrawal et al., 2023).

2.2.2.7 Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefleri Bağlamında Döngüsel Ekonomi

Türkiye, 2021'de Paris Anlaşması'nı onayladıktan sonra, 2053 yılı için Net Sıfır Emisyon hedefini resmî olarak benimsemiştir. Bu hedef, yalnızca enerji dönüşümünü değil, aynı zamanda döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaştırılmasını da içermektedir.

- Ulusal Stratejiler: Türkiye'nin "Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021)" ve "2053 Net Sıfır Emisyon Stratejisi"nde, döngüsel ekonomi; atık yönetiminden sanayi üretimine kadar geniş bir yelpazede düşük karbonlu kalkınmanın temel araçlarından biri olarak konumlandırılmıştır.
- Sanayi Odaklı Uygulamalar: Organize Sanayi Bölgeleri'nde (OSB'ler) "sıfır atık" ve endüstriyel simbiyoz projeleri, döngüsel ekonomi prensiplerinin sahada uygulanmasına örnek teşkil etmektedir. Bu uygulamalar, hem emisyon azaltımı hem de kaynak verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.
- Enerji ve Atık Kesiti: Türkiye'de belediye atıklarının enerjiye dönüştürülmesi (Waste-to-Energy) projeleri ile endüstride atık ısı geri kazanımı projeleri, hem döngüsel ekonomiyi hem de karbon nötr hedefini destekleyen uygulamalardır.
- Dijitalleşmenin Rolü: Net sıfır hedeflerine giden süreçte, Türkiye'de geliştirilen dijital iklim panelleri, karbon ayak izi hesaplama platformları ve MRV (İzleme, Raporlama, Doğrulama) sistemleri, şirketlerin hem döngüsel ekonomi stratejilerini hem de karbon azaltım yükümlülüklerini takip etmelerinde kritik araçlar haline gelmektedir.

2.2.2.8 Eleştirel Değerlendirme

Türkiye'nin 2053 Net Sıfır yol haritasında dögüsel ekonomiye güçlü bir vurgu yapılmakla birlikte, yüksek maliyetler, teknolojiye erişimde bölgesel eşitsizlikler ve regölasyonlardaki belirsizlikler hâlen uygulama zorlukları olarak varlığını sürdürmektedir. Özellikle KOBİ'lerin finansal ve teknik kapasitelerinin güçlendirilmesi, dögüsel ekonomi ve dijitalleşmenin ulusal düzeyde yaygınlaştırılabilmesi için öncelikli bir ihtiyaçtır.



Şekil 2: Dögüsel Ekonomi (ÇŞİDB Dögüsel Ekonomi Eylem Planı 2024)

2.2.2.9 Yeşil İnovasyon ve Dijital Dönüşüm

Huang ve Lau'nun (2024) çalışması, Çin bağlamında dijital dönüşümün yeşil inovasyon kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmektedir.

- Dijital teknolojilerin işletmelerin yeniden yapılanmasına yol açtığı,
- Çevresel sürdürülebilirliği destekleyen yenilikçi uygulamaları teşvik ettiği,
- Kurumların yeşil gelişim süreçlerini hızlandığı,

ortaya konmuştur. Bununla birlikte, dijital dönüşümün maliyetleri, veri güvenliği riskleri ve gelişmekte olan ülkelerdeki altyapı eksiklikleri, sürecin önündeki en önemli engellerdir.

2.2.2.10 Dijital Hizmet Odaklı Dönüşüm

Luo ve Liu'nun (2024) araştırması, dijital teknolojilerin işletmelerin hizmet odaklı dönüşümü ve sürdürülebilir gelişim süreçleri üzerindeki etkilerini incelemektedir.

- IoT ve büyük veri kullanımı sayesinde ürün yaşam döngüsü boyunca izlenebilirlik artmıştır.
- Bu durum sürdürülebilir ürün geliştirme, kaynak verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.
- Çalışma, dijital dönüşümün ekonomik performans üzerindeki etkisinin olumlu, çevresel performans üzerindeki etkisinin ise ters U ilişkisi sergilediğini göstermektedir.

Yani dijitalleşme başlangıçta çevresel fayda sağlasa da, uzun vadede enerji tüketimi ve dijital altyapının çevresel maliyetleri bu faydayı azaltabilmektedir.

Buna rağmen, dijital hizmet odaklı dönüşüm müşteri memnuniyetini artırmakta, maliyetleri düşürmekte ve müşteri sadakatini güçlendirmektedir.

2.2.2.11 Sonuç ve Yönetmelik Yansımalar

- Dijital sağlık: Teknoloji entegrasyonu, yönetim uygulamalarıyla birlikte düşünülmeli.
- Tedarik zinciri: Dijitalleşme ve akıllı sistemler, sürdürülebilir büyüme için kritik.
- Döngüsel ekonomi: Net-sıfır hedeflerine ulaşmada dijital teknolojiler, kaynak optimizasyonu ve atık azaltımı için stratejik araç.
- Yeşil inovasyon: Dijitalleşme çevresel performansı artırırken, güvenlik ve maliyet gibi riskler göz ardı edilmemeli.
- Hizmet odaklı dönüşüm: Dijitalleşme, müşteri memnuniyetini artırırken, çevresel etkilerin uzun vadede izlenmesi gerekli.

Sonuç olarak, dijital sürdürülebilirlik kavramı yönetmelik bir zorunluluk haline gelmiştir. İşletmelerin, dijital teknolojileri sadece verimlilik aracı değil; aynı zamanda sürdürülebilirlik ve stratejik yönetim bileşeni olarak görmesi gerekmektedir.

2.2.3 Karar Alma Süreçlerinde Veri ve Teknolojinin Rolü

Veri ve teknolojinin karar alma süreçlerindeki rolü, işletmelerin stratejik ve operasyonel kararlarını şekillendiren kritik bir faktör haline gelmiştir. Bu literatür incelemesi; veri bilimi, yapay zeka, derin öğrenme ve büyük veri analitiğinin karar alma süreçlerine katkılarını ve sınırlarını değerlendirmektedir.

2.2.3.1 Veri Bilimi ve Dijital Pazarlama

Ramon Saura'nın (2020) sistematik literatür incelemesi, veri bilimi ve veri yönetiminin dijital pazarlamadaki uygulamalarına odaklanmaktadır. Araştırma, yöntemler, kullanım alanları, performans metrikleri ve gelecek araştırma yönelimlerini sınıflandırmaktadır.

- Veri bilimi, istatistiksel analiz ve veri madenciliği sayesinde kararların daha ölçülebilir hale gelmesini sağlar.
- Dijital pazarlamada, müşteri davranışlarının analizi ve performans ölçümleri için veri bilimi kritik rol oynar.

Çalışma, uygulama odaklı araştırmaların yoğunluğunu vurgularken, uzun vadeli etkilerin değerlendirilmesinde teorik boşluklara da dikkat çekmektedir.

2.2.3.2 Derin Öğrenme ile Artırılmış Karar Alma

Raj Shrestha, Krishna ve von Krogh'un (2020) araştırması, derin öğrenme algoritmalarının karar süreçlerine etkisini incelemekte ve "Derin Öğrenme ile Artırılmış Karar Alma (DLADM)" kavramını ortaya koymaktadır.

- Çalışma, DL'nin çalışanların bilgi işleme kapasitesini artırarak daha yaratıcı ve analitik kararları desteklediğini göstermektedir.
- Görsel tanıma ve duygu analizi gibi uygulamalar, karar destek sistemlerine somut örnekler sunmaktadır.

Ancak algoritmaların karmaşıklığı, şeffaflık eksikliği, etik kaygılar ve önyargı riski; bu teknolojilerin kurumsal süreçlere entegrasyonunda zorluklar yaratmaktadır.

2.2.3.3 Büyük Veri Analitiği Yetkinlikleri

Richly'nin (2022) çalışması, büyük veri analitiğinin karar alma süreçlerindeki önemini sistematik bir şekilde ele almaktadır.

- Büyük veri, bulut bilişim ve iş zekâsı araçları; kurumların çeviklik, yenilikçilik ve rekabet avantajını güçlendirmektedir.
- Karar alma süreçlerinde, veri odaklı yaklaşımlar belirsizlikleri azaltmakta ve daha bilinçli stratejik kararlar alınmasını sağlamaktadır.
- Ancak etkin kullanım için, yalnızca teknoloji değil; aynı zamanda insan kaynağı yetkinlikleri de geliştirilmelidir.

2.2.3.4 Karar Destek Sistemleri (DSS) ve Veri Analitiği

Tedeschi (2022), yapay zekâ ve veri analitiğinin hayvan bilimleri bağlamında sürdürülebilir gelişime katkısını ele almaktadır. Tarihsel gelişim çerçevesinde:

- 1960'lardan bu yana DSS kullanımı vardır ancak veri ve hesaplama kapasitesindeki sınırlılıklar başlangıçta başarıyı kısıtlamıştır.
- Modern çağda büyük veri, istatistiksel çıkarımlar ve dijital cihazlar DSS'in etkinliğini artırmıştır.

Karar destek sistemleri artık sadece teknolojik araçlar değil, aynı zamanda organizasyonel ve insan faktörlerini bütünleştiren yapılar haline gelmiştir.

2.2.3.5 Finansal Teknolojilerde Büyük Veri

Mhlanga (2024), büyük verinin fintech alanındaki rolünü incelemektedir.

- Anlık veri analizi, riskleri önceden tespit etmeyi ve hataları minimize etmeyi sağlamaktadır.
- Kişiselleştirilmiş finansal ürünler ve hizmetler, müşteri memnuniyetini artırırken finansal kapsayıcılığı da genişletmektedir.
- Blockchain ve yapay zekâ entegrasyonu, güvenliği artırmakta ancak veri güvenliği ve gizlilik risklerini beraberinde getirmektedir.

2.2.3.6 Sonuç ve Yönetmelik Yansımalar

- Veri bilimi, dijital pazarlamada stratejik kararların ölçülebilir ve veri odaklı alınmasını sağlar.

- Derin öğrenme, karar süreçlerinde bilgi işleme kapasitesini artırarak hız ve doğruluk kazandırır; ancak etik ve şeffaflık konuları önemlidir.
- Büyük veri analitiği, rekabet avantajı yaratır ve dijital dönüşümde kritik rol oynar.
- Karar destek sistemleri, teknolojik altyapının yanında insan faktörleriyle desteklenmelidir.
- Fintech uygulamaları, büyük veri sayesinde müşteri odaklı ürünler ve risk yönetimi çözümleri sunar.

Sonuç olarak, karar alma süreçlerinde veri ve teknolojinin entegrasyonu, daha hızlı, güvenilir ve müşteri odaklı kararların önünü açmaktadır. Ancak, bu süreçlerin etkin olabilmesi için:

- Veri altyapısının güçlendirilmesi,
- Çalışanların eğitilmesi,
- Etik çerçevelerin oluşturulması, gerekmektedir.

2.2.4 Yönetim Kurulu Üyeleri için ESG & Dijitalleşme Eğitim Modülleri

Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) ilkeleri ile dijitalleşme, günümüz iş dünyasında yönetim kurulu üyeleri için yalnızca stratejik karar alma süreçlerinin değil, aynı zamanda uzun vadeli sürdürülebilirlik vizyonunun da merkezinde yer almaktadır. Literatür, çevresel yönelim, kurumsal sosyal sorumluluk uygulamaları, sürdürülebilirlik raporlaması ve ESG yatırımlarının şirketlerin performansları üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde ele almaktadır. Bu bulgular, yönetim kurullarına yönelik eğitim modüllerinin geliştirilmesinde önemli bir referans çerçevesi sunmaktadır.

Türkiye’de ise Sermaye Piyasası Kurulu’nun (SPK) 2022 yılında yayımladığı Sürdürülebilirlik İlkeleri Uyum Çerçevesi ve 2053 Net Sıfır Hedefi doğrultusunda, yönetim kurullarının ESG alanındaki farkındalık ve yetkinliklerinin artırılması kritik önem taşımaktadır. Özellikle halka açık şirketler için sürdürülebilirlik raporlaması artık yalnızca gönüllülük esasına dayalı bir uygulama değil, kurumsal şeffaflığın ve yatırımcı güveninin temel göstergelerinden biri haline gelmiştir.

2.2.4.1 Çevresel Yönelim ve Karbon Stratejisi

Moussa ve diğerlerinin (2020) çalışması, ABD şirketlerinde yönetim kurullarının çevresel yöneliminin doğrudan karbon performansını artırdığını, karbon stratejisinin ise bu ilişkide aracılık rolü oynadığını ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, yönetim kurulu eğitim modüllerinde şu unsurlar öne çıkarılmalıdır:

- Karbon Ayak İzi ve Net Sıfır Hedefleri: Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Vizyonu kapsamında, yönetim kurulu üyelerine karbon azaltım yol haritaları, enerji verimliliği projeleri ve yenilenebilir enerji yatırımlarının stratejik önemi aktarılmalıdır.
- İklim Senaryoları ve Risk Yönetimi: Farklı iklim senaryolarına göre şirketlerin risk profilleri, tedarik zinciri kırılganlıkları ve finansal etkileri incelenmelidir.
- Pratik Modül Önerileri: Karbon piyasaları (Emisyon Ticaret Sistemi), AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ve Türkiye’nin ETS taslağına dair uygulamalı vaka çalışmaları yapılmalıdır.

2.2.4.2 Kurumsal Sosyal Sorumluluk, Yönetişim ve Yönetim Kurulu Çeşitliliği

Béji ve diğerlerinin (2021) araştırması, kurumsal sosyal sorumluluk ile yönetim arasındaki ilişkinin bilişsel bir bakış açısıyla ele alınması gerektiğini ve yönetim kurullarında çeşitliliğin kurumsal davranışları doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Türkiye bağlamında bu modül şu konulara odaklanmalıdır:

- **Çeşitlilik ve Katılım:** Kadınların, farklı yaş gruplarının, farklı disiplinlerden gelen profesyonellerin yönetim kurullarında yer alması şirketlerin etik karar alma süreçlerini güçlendirir. BIST bünyesindeki şirketlerde kadın yönetim kurulu üyelerinin oranı hâlen sınırlıdır; bu oranı artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmelidir.
- **Kurumsal Etik ve Şeffaflık:** Yolsuzlukla mücadele, şeffaf raporlama, çıkar çatışmalarının önlenmesi gibi konularda yönetim kurulu üyeleri için etik farkındalık programları hazırlanmalıdır.
- **Paydaş İlişkileri:** Çeşitliliğin yalnızca içsel yönetimle değil, dış paydaşlarla kurulan güven ilişkisiyle de bağlantılı olduğu vurgulanmalıdır.

2.2.4.3 Dijitalleşme ve Yönetim Kurullarında Yeni Yetkinlikler

Dijital dönüşüm, yönetim kurullarının **veri odaklı karar alma** süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. ESG'nin dijitalleşme ile entegrasyonu, yalnızca raporlamanın kolaylaşmasını değil, aynı zamanda gerçek zamanlı risk izleme ve fırsat analizlerini de mümkün kılmaktadır.

Eğitim modüllerine şu başlıklar entegre edilmelidir:

- **Dijital Raporlama Sistemleri:** Avrupa Birliği'nde yürürlüğe giren **Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (CSRD)** ve Türkiye'deki SPK uyum çerçevesi bağlamında, dijital raporlama altyapılarının nasıl kullanılacağı anlatılmalıdır.
- **Yapay Zekâ ve Veri Analitiği:** ESG risklerinin öngörülmesinde, tedarik zinciri şeffaflığının sağlanmasında ve çevresel verilerin analizi süreçlerinde yapay zekânın rolü uygulamalı örneklerle gösterilmelidir.
- **Siber Güvenlik ve Veri Gizliliği:** Dijitalleşmenin getirdiği en büyük risklerden biri olan veri güvenliği, yönetim kurullarının gündeminde yer almalıdır.

2.2.4.4 Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefleri ile Uyumlu Eğitim İçerikleri

Türkiye'nin net sıfır vizyonu kapsamında yönetim kurulu eğitim modülleri, yalnızca küresel trendleri değil, ülkeye özgü ihtiyaçları da dikkate almalıdır.

- **Yeşil Finansman ve Sürdürülebilir Yatırımlar:** Türkiye'de yeşil tahvil, sürdürülebilir sukuk ve iklim odaklı finansman modelleri giderek artmaktadır. Yönetim kurulu üyelerine bu finansal araçlar tanıtılmalıdır.
- **Sektörel Dönüşüm:** Enerji, çimento, demir-çelik ve ulaştırma sektörlerinde net sıfır hedeflerine uyumlu stratejiler incelenmelidir.
- **Ulusal Düzenlemeler:** Türkiye'nin ETS hazırlıkları, 7552 sayılı İklim Kanunu ve Sıfır Atık Yönetmeliği gibi mevzuatlar eğitim içeriklerine entegre edilmelidir.

2.2.4.5 Sonuç ve Yönetmel Yansımalar

Literatür, yönetim kurulu üyeleri için Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) ile dijitalleşme odaklı eğitim modüllerinin yalnızca bilgi aktarımı değil, aynı zamanda stratejik yönlendirme ve kurumsal dönüşüm süreçlerini destekleyici bir yapıda olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede eğitim programlarının içeriğinde öne çıkan unsurlar şunlardır:

- Çevresel Stratejiler: Karbon performansının artırılması, enerji verimliliği yatırımları ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefi ile uyumlu iklim stratejilerinin geliştirilmesi. Bu sayede, yönetim kurulu üyeleri iklim risklerini finansal ve operasyonel risklerle birlikte değerlendirebilecek bilgiye sahip olmalıdır.
- Kurumsal Sosyal Sorumluluk: Etik davranış ilkeleri, toplumsal sorumluluk, şeffaflık ve yönetim kurullarında çeşitlilik (cinsiyet, yaş, mesleki geçmiş) konuları. Özellikle kadınların ve farklı disiplinlerden gelen profesyonellerin yönetim kurullarında daha fazla yer alması, karar alma süreçlerinin kapsayıcılığını artırmaktadır.
- ESG Raporlaması: Finansal olmayan raporlamanın yatırımcı güveni, piyasa itibarı ve uzun vadeli değer yaratımı üzerindeki etkileri. Avrupa Birliği'nde yürürlüğe giren Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (CSRD) ve SPK'nın Sürdürülebilirlik İlkeleri Uyum Çerçevesi, Türkiye'deki şirketlerin raporlama yükümlülüklerini daha da önemli hale getirmektedir.
- ESG Yatırımları: Yönetim kurullarının yatırım kararlarında ESG kriterlerini dikkate alması, yeşil finansman araçlarının (yeşil tahviller, sürdürülebilir krediler, karbon piyasaları) şirket stratejilerine entegre edilmesi. Bu, hem finansal sürdürülebilirliği hem de paydaş güvenini güçlendirmektedir.
- Dijitalleşme: ESG raporlamasında büyük veri, yapay zekâ ve dijital izleme araçlarının entegrasyonu. Gerçek zamanlı veri analitiği, risk haritalaması ve dijital panolar (dashboard) üzerinden ESG performansının takip edilmesi yönetim kurulu için stratejik avantaj sağlamaktadır.

Bu bulgular, yönetim kurulu eğitim modüllerinin sadece teorik bilgi aktarımıyla sınırlı kalmaması gerektiğini göstermektedir. Eğitimler, uygulamaya dönük vaka analizleri, dijital araçlarla desteklenmiş simülasyonlar ve sektör bazlı örneklerle zenginleştirilmelidir. Ayrıca, Türkiye'nin ulusal hedefleri (2053 Net Sıfır, Yeşil Mutabakat'a uyum, Emisyon Ticaret Sistemi hazırlıkları) ile küresel düzenlemeler (CBAM, CSRD, Paris Anlaşması) birlikte ele alınarak, yönetim kurulu üyelerinin hem ulusal hem de uluslararası bağlamda stratejik uyum sağlayabilmeleri amaçlanmalıdır.

Sonuç olarak, bu tür kapsamlı eğitim programları yönetim kurullarını yalnızca pasif bilgi tüketicisi değil, aynı zamanda kurumsal sürdürülebilirlik dönüşümünün aktif liderleri haline getirmektedir.

2.2.5 Liderlik ve Dijital Dönüşüm: Sorumluluklar ve Etkiler

Dijital dönüşüm, günümüz kurumlarında yalnızca teknolojik altyapının güncellenmesi değil, aynı zamanda liderlik biçimlerinin yeniden tanımlanmasını da zorunlu kılmaktadır. Hızla değişen piyasa koşulları, küresel rekabet ve artan dijitalleşme; liderlerden vizyonerlik, esneklik, inovasyon odaklılık ve dijital okuryazarlık talep etmektedir.

Literatürde, dijital liderliğin yalnızca teknoloji bilgisine sahip olmakla sınırlı olmadığı; aynı zamanda kurum kültürünü dönüştürmek, öğrenme ekosistemini güçlendirmek ve çalışanların inovatif potansiyelini açığa çıkarmak gibi sorumluluklar içerdiği görülmektedir (Ghamrawi & Tamim, 2023; Brunner et al., 2023; Gao & Gao, 2024).

2.2.5.1 Yükseköğretimde Dijital Liderlik

Ghamrawi & Tamim (2023), yükseköğretim kurumlarının teknolojik değişimlere direnç gösterdiğini ve toplumsal/piyasa beklentilerine yeterince uyum sağlayamadığını vurgulamaktadır.

- Başarılı bir dijital dönüşüm için liderlerin vizyoner, öğrenmeye açık, yenilikçi ve dijital vatandaşlığı destekleyen bireyler olması gerektiği öne çıkmaktadır.
- Tablet gibi mobil teknolojilerin yaygın kullanıldığı büyük ölçekli girişimlerde başarı, doğrudan liderlerin yenilikçi yaklaşımları ile bağlantılıdır.
- Bu çerçevede, liderler yalnızca teknolojiyi değil, aynı zamanda kurum kültürü ve eğitim politikalarını dönüştürmeyi de üstlenmelidir.

2.2.5.2 Dijital Liderlik ve Stratejik Değişim

Brunner, Schuster & Lehmann (2023), dijital liderliğin teknoloji odaklı değişimi yönetmedeki olumlu etkilerini incelemektedir. Ancak dijital liderliğin kavramsal tanımının hâlâ tam olarak netleşmediği, farklı disiplinlerde farklı yorumlandığı vurgulanmaktadır.

- Dijital liderlik, geleneksel liderlik becerileri (karar alma, iletişim, vizyon oluşturma) ile dijital çağın gereksinimlerini (hız, yenilik, esneklik) birleştirmelidir.
- Stratejik başarı, liderlerin bu iki boyutu entegre etmesine bağlıdır.
- Kavramsal farklılıklar, uygulamada belirsizlik yaratmakta ve liderlerin hangi yetkinliklere öncelik vermeleri gerektiğini muğlak bırakmaktadır.

Dolayısıyla, dijital liderliğin daha tutarlı ve ortak bir çerçeveye kavuşturulması, kurumların dijital dönüşüm stratejilerinin başarısı için kritik görülmektedir.

2.2.5.3 Çalışanların Yenilikçi Davranışlarını Teşvik Etmek

Gao & Gao (2024), dijital liderliğin çalışanların yenilikçi davranışlarını nasıl teşvik ettiğini incelemektedir.

- Dönüşümcü liderlik: Takipçileri kolektif amaçlara yöneltir, inovasyon motivasyonu sağlar.
- İşlemci liderlik: Ödül-ceza mekanizmalarıyla belirli davranışları yönlendirir.
- Otantik liderlik: Güven, şeffaflık ve bağlılık üzerinden inovasyonu güçlendirir.

Dijital liderlik, bu liderlik biçimlerini dijital bilgi ve deneyimlerle harmanlayarak çalışanların dijital değişime uyumunu kolaylaştırır.

Ayrıca, sanal liderlik ve e-liderlik kavramları, coğrafi olarak dağınık ve uzaktan çalışan ekipleri yönetmede kritik araçlar olarak öne çıkmaktadır. Liderlerin bu bağlamda, dijital yetkinliklerin yanı sıra psikolojik destek, motivasyon ve birlik duygusu oluşturma becerilerini de geliştirmeleri gerekmektedir.

2.2.5.4 Sonuç ve Yönetmelik Yansımalar

- Literatür, dijital dönüşümün liderlikten bağımsız düşünülemeyeceğini net bir biçimde ortaya koymaktadır:

- Vizyoner Liderlik: Dijital dönüşüm için yol haritası çizer, kurum kültürünü dönüştürür.
- Stratejik Yönetim: Geleneksel ve dijital liderlik becerilerini bütünleştirerek hızla değişen koşullara uyum sağlar.
- Çalışanların Yenilikçiliği: Dijital liderlik, inovatif davranışları teşvik eder ve yetenek gelişimini destekler.
- Çeşitli Liderlik Stilleri: Dönüşümcü, işlemci ve otantik yaklaşımlar, dijital bağlamda esnek biçimde kullanılmalıdır.
- Sanal Liderlik: Uzaktan çalışma ve küresel işbirliği ortamlarında liderlerin etkinliğini artırır.

Sonuç olarak, dijital liderlik yalnızca teknoloji kullanımı değil, aynı zamanda bir kültür, vizyon ve strateji meselesidir. Kurumların başarılı dijital dönüşüm geçirebilmeleri için liderlerin hem dijital yetkinliklere hem de güçlü insani becerilere sahip olmaları şarttır.

2.2.6 En İyi Uygulamalar: AB ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü’den Örnekler

Avrupa Birliği (AB) ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) çerçevesinde geliştirilen en iyi uygulamaların incelenmesi, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında önleyici hizmetlerin etkinliğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Walters ve arkadaşları (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma, AB’de önleyici hizmetlerin güncel durumunu ortaya koymakta ve uygulamadaki boşlukları gözler önüne sermektedir. Araştırma, İSG alanında önleyici hizmetlerin genellikle sistematik ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olmadığını, aynı zamanda nitelikli uygulayıcıların varlığına dair güvenilir verilerin sınırlı olduğunu belirtmektedir.

Çerçeve Direktifi’nin işçilere eşit sağlık ve güvenlik hizmeti sunma hedefi, aradan geçen yıllara rağmen tam anlamıyla karşılanamamış; önleyici hizmetlere erişimde kayda değer ilerleme sağlanamamıştır. Bu durum, devlet kaynaklarının geri çekilmesi, sanayi yapısındaki dönüşüm ve büyük sanayi kuruluşlarının azalmasıyla daha da belirgin hale gelmiştir. Bu bağlamda, önleyici hizmetlerin bağımsız işletmeler olarak rekabetçi bir piyasada faaliyet göstermesi, hizmetlerin kalitesini ve kapsamını olumsuz etkilemiş, iş sağlığı ve güvenliği politikalarının uygulanmasında önemli boşluklara yol açmıştır.

2.2.6.1 AB’de Önleyici Hizmetlerin Mevcut Durumu

“Prevention services for occupational safety and health in the European Union: Anachronisms or supports for better practice?” başlıklı çalışma (Walters et al., 2022), AB’de iş sağlığı ve güvenliği için önleyici hizmetlerin mevcut durumunu ve gelişim potansiyelini detaylı bir biçimde incelemektedir. Araştırma, İSG kültürünün zaman içinde dalgalar halinde geliştiğini ve yeni uygulamaların eski uygulamaları tamamen ortadan kaldırmak yerine, onlarla birlikte varlığını sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Bu durum, önleyici hizmetlerin dönüşümünde süreklilik ve değişimin birlikte işlediğini göstermektedir.

Çalışma, başarılı önleyici hizmetlerin yalnızca uyum mekanizmalarını desteklemekle kalmadığını, aynı zamanda daha iyi uygulamaların yaygınlaştırılmasına katkı sağladığını vurgulamaktadır. Ancak, bu hizmetlerin çoğu zaman iyi entegre edilmediği, sistematik bir yapıya kavuşturulmadığı ve sürdürülebilirlik açısından zayıf kaldığı eleştirisi yapılmaktadır. Bu zayıflık, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde (KOBİ’lerde) çalışanların İSG hizmetlerine erişimini kısıtlayan bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

2.2.6.2 Çerçeve Direktifi ve Yavaş İlerleme

Çalışmada özellikle Çerçeve Direktifi'nin kabulünden bu yana önleyici hizmetlere erişimde ilerlemenin sınırlı kaldığı vurgulanmaktadır. AB genelinde işçilere eşit sağlık ve güvenlik hizmeti sağlama hedefi, uygulamada tam anlamıyla gerçekleşmemiştir. Bu yavaş ilerlemenin başlıca nedenleri şunlardır:

- Devlet kaynaklarının geri çekilmesi: Kamu desteğinin azalması, hizmetlerin finansal sürdürülebilirliğini zayıflatmıştır.
- Sanayi yapısındaki değişim: Büyük sanayi kuruluşlarının azalmasıyla, önleyici hizmet talebi parçalı hale gelmiştir.
- Piyasa temelli model: Önleyici hizmetlerin bağımsız işletmeler olarak rekabetçi bir piyasada faaliyet göstermesi, kalite ve kapsayıcılık açısından risk yaratmıştır.

Bu faktörler, İSG hizmetlerinin bütüncül ve adil bir şekilde sunulmasını engellemiş ve Çerçeve Direktifi'nin temel hedeflerinin gerisinde kalınmasına neden olmuştur.

2.2.6.3 Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü Perspektifi ve Uygulama Sorunları

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development / Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) çerçevesinde yapılan değerlendirmeler, Avrupa Birliği (AB) bulgularıyla büyük ölçüde paralellik göstermektedir. OECD, üye ülkeler arasında ekonomik kalkınmayı, sosyal refahı ve sürdürülebilir politikaları teşvik etmeyi amaçlayan bir uluslararası kuruluş olarak, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) hizmetlerinin yaygınlaştırılması ve kalite standartlarının belirlenmesinde de önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, yapılan incelemeler, önleyici İSG hizmetlerinin piyasa dinamikleri içinde bağımsız işletmeler olarak konumlanmasının, hizmetlerde kalite dengesizliklerine yol açtığını ortaya koymaktadır.

Walters ve arkadaşlarının (2022) da vurguladığı üzere, devlet desteğinin geri çekilmesi yalnızca hizmetlerin kısa vadeli sürdürülebilirliğini zayıflatmakla kalmamakta, aynı zamanda bu hizmetlerin uzun vadede stratejik olarak geliştirilmesini de olumsuz etkilemektedir. Devletin çekildiği alanlarda piyasa aktörlerinin hâkimiyet kurması, hizmetlerin standartlarını düşürmekte ve işverenlerin maliyet odaklı tercihleri nedeniyle çalışanların güvenliği ikinci plana itilme riski taşımaktadır.

Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) ile esnek çalışma biçimlerinin yaygın olduğu sektörlerde işçilerin önleyici hizmetlere erişimi daha da sınırlı kalmaktadır. KOBİ'lerin düşük finansal kapasitesi, dijital çözümlere yatırım yapma veya kapsamlı İSG hizmeti alma konusunda dezavantaj yaratmaktadır. Bu durum, AB ve OECD (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) ülkelerinde İSG alanında eşitlik ilkesinin hayata geçirilmesini zorlaştırmakta, çalışanların korunmasında önemli boşluklar yaratmaktadır.

Ayrıca, OECD'nin raporlarında sıklıkla belirtildiği gibi, önleyici hizmetlerdeki bu dengesizlikler sadece iş güvenliği standartlarını değil, aynı zamanda işgücü piyasasının verimliliğini ve ülkelerin rekabet gücünü de olumsuz etkilemektedir. Dijitalleşme ile desteklenmeyen, parçalı ve düşük kaliteli hizmetler, uzun vadede sağlık harcamalarının artmasına ve iş kazalarının sıklığının yükselmesine yol açabilmektedir.

Dolayısıyla, hem AB hem de OECD düzeyinde önerilen politika çerçeveleri, devlet desteğinin tamamen geri çekilmesi yerine, hibrit bir modelin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu model, kamu otoritesinin finansal ve düzenleyici desteğini sürdürürken, piyasa aktörlerinin de yenilikçi dijital çözümler ve veriye dayalı İSG hizmetleri

geliştirmesini teşvik etmektedir. Böylece, hem hizmet kalitesi korunmakta hem de çalışanların eşit erişimi güvence altına alınmaktadır.

2.2.6.4 Piyasa Mekanizmalarının Sınırları

Walters ve diğerleri (2022), önleyici hizmetlerin etkinliği için piyasada daha başarılı bir mekanizmanın kurulması gerektiğini öne sürmektedir. Ancak piyasa temelli yaklaşımın kendi sınırları da vardır:

- Hizmetlerin maliyet odaklı sunulması, uzun vadeli önleyici stratejileri zayıflatmaktadır.
- Rekabet ortamı, özellikle küçük ölçekli hizmet sağlayıcıların sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.
- Piyasa başarısızlığı durumunda, işçilerin sağlık ve güvenliği riske girmektedir.

Dolayısıyla, önleyici hizmetlerin yalnızca piyasa mekanizmalarına bırakılması yerine, devlet politikaları, düzenleyici çerçeveler ve sosyal tarafların işbirliğiyle desteklenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

2.2.6.5 Sonuç ve Değerlendirme

AB ve OECD'deki en iyi uygulamalar, iş sağlığı ve güvenliği alanında önleyici hizmetlerin etkinliğini artırmak için sistematik, entegre ve sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. Walters ve arkadaşlarının (2022) çalışması, önleyici hizmetlerin mevcut yapısındaki boşlukları ve zorlukları detaylı bir biçimde ortaya koyarak şu noktaların altını çizmektedir:

- İSG önleyici hizmetlerin, uyum ve iyi uygulama süreçlerini desteklemesi kritik bir gerekliliktir.
- Çerçeve Direktifi'nin temel hedeflerine rağmen, önleyici hizmetlere erişimde yavaş ve sınırlı ilerleme kaydedilmiştir.
- Devlet desteklerinin azalması ve sanayi yapısındaki dönüşüm, önleyici hizmetlerin bağımsız işletmelere dönüşmesine yol açmış; bu da etkinliği olumsuz etkilemiştir.
- Hizmetlerin sürdürülebilirliği için piyasa mekanizmalarının tek başına yeterli olmadığı, devlet politikaları ve sosyal tarafların işbirliği ile güçlendirilmesi gerektiği açıktır.

Sonuç olarak, iş sağlığı ve güvenliği alanında sürdürülebilir gelişim için, AB ve OECD çerçevesinde önleyici hizmetlerin sistematik, entegre ve kapsayıcı biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu, yalnızca işçilerin sağlığını korumakla kalmayacak, aynı zamanda uzun vadede daha güvenli, daha verimli ve daha eşitlikçi bir çalışma ortamının oluşmasına katkı sağlayacaktır.

2.2.7 Kurumsal Yönetişimde Dijital Yetkinlik Ölçütleri

Dijitalleşme, kurumsal yönetişimin en kritik bileşenlerinden biri haline gelmiş ve yönetim kurullarının karar alma süreçlerini köklü biçimde dönüştürmüştür. Günümüzde organizasyonların sadece finansal performansı değil, aynı zamanda siber güvenlik, dijital ekonomi, eğitimde dijital yeterlilikler ve dijital liderlik kapasitesi de yönetim etkinliğinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde, dijital yetkinliklerin kurumsal yönetişimde üç temel işlevi öne çıkmaktadır:

1. Risk yönetimi: Siber tehditlerin öngörülmesi, değerlendirilmesi ve yönetilmesi.
2. Stratejik uyum: Dijital ekonominin sunduğu fırsatların kurumsal stratejiye entegre edilmesi.
3. İnsan kaynağı ve liderlik: Dijital yeterliliklerin hem çalışanlar hem de liderler düzeyinde geliştirilmesi.

Bu inceleme, farklı disiplinlerden gelen araştırmaları bir araya getirerek, kurumsal yönetişimde dijital yetkinliklerin ölçütlerini ortaya koymayı ve bunların yönetsel yansımalarını tartışmayı amaçlamaktadır.

2.2.7.1 Siber Güvenlik ve Dijital Risklerin Yönetişime Etkisi

Guerin (2022), siber risklerin yönetim kurulu üyeleri için giderek daha kritik hale geldiğini vurgulamaktadır. Özellikle sağlık sektöründe akıllı tıbbi cihazların ve mobil teknolojilerin yaygınlaşması, kuruluşları siber saldırılara karşı daha savunmasız kılmaktadır. Aynı şekilde, enerji ve madencilik gibi çıkarıcı sektörlerde sensörler ve dijital ağların çokluğu, siber tehditlerin çeşitlenmesine yol açmaktadır.

- Yönetim kurulları fiduciary duty kapsamında dijital riskleri anlamak ve yönetmekle yükümlüdür.
- Siber güvenlik risklerinin finansal değerlendirme yoluyla ölçülmesi, muhtemel kayıpları öngörmek ve uygun önlemler geliştirmek için gereklidir.
- Sarbanes–Oxley gibi düzenlemeler, yönetim mekanizmalarının şeffaflığını artırsa da, dijital risklerin doğası gereği daha kapsamlı ve sürekli güncellenen stratejiler gerekmektedir.

Sonuç olarak, siber risk yönetimi, dijital yetkinliklerin kurumsal yönetişimdeki en görünür ölçütlerinden biridir.

2.2.7.2 Dijital Ekonomi ve Kurumsal Yönetişim

Cai, Qiu ve Tu (2022) çalışmalarında, dijital ekonominin kurumsal yönetim mekanizmalarını köklü bir biçimde yeniden şekillendirdiğini ileri sürmektedir. Araştırmaya göre mevcut e-devlet ve dijital yönetim modelleri, çoğunlukla zayıf teorik temellere dayanmaktadır ve bu nedenle sağlam bilimsel çerçevelerle desteklenmeleri gerekmektedir. Bu bulgu, dijital dönüşümün yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda yönetim anlayışında köklü bir paradigma değişimi yarattığını göstermektedir.

- Hesap Verebilirlik: Dijital ekonomi, kurumların paydaşlara karşı hesap verebilirliğini artırmakta; şeffaflık, veri erişimi ve gerçek zamanlı raporlama gibi unsurlarla karar alma süreçlerini daha açık ve izlenebilir hale getirmektedir.
- Çok Boyutlu Performans: Dijitalleşme, yalnızca ekonomik performansı değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumlulukları da yönetişimin merkezine taşımaktadır. Böylece kurumsal performans, sadece finansal göstergeler üzerinden değil, ESG kriterleriyle birlikte değerlendirilmekte ve daha bütüncül bir yaklaşım ortaya çıkmaktadır.
- E-Devlet ve Dijital Yönetişim: E-devlet uygulamaları ve dijital yönetim mekanizmaları, kamu kurumları ve özel sektörün sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu hareket etmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle şeffaflık, veri paylaşımı, çevrimiçi denetim mekanizmaları ve dijital katılım araçları, paydaşların yönetim süreçlerine daha etkin dahil olmasını sağlamaktadır.

Bu bağlamda, dijital ekonominin kurumsal yönetim yapısına entegrasyonu, organizasyonların Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG'ler) ile uyumlu hareket etmesi açısından kritik bir zemin oluşturmaktadır. Dijitalleşmenin sunduğu teknolojik imkânlar (büyük veri, blockchain, yapay zekâ, IoT vb.), yalnızca ekonomik değer yaratmakla kalmayıp, aynı zamanda kurumsal şeffaflık, etik sorumluluk ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir araç haline gelmektedir.

Sonuç olarak, dijital ekonomi – kurumsal yönetim ilişkisi, kurumların gelecekteki rekabet gücünü, paydaş güvenini ve sürdürülebilir kalkınma performansını doğrudan şekillendiren bir unsur olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3: Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

2.2.7.3 Eğitimde Dijital Yetkinlik Çerçevesi

Velandia Rodriguez ve arkadaşları (2022), öğretmenlerin dijital becerilerini geliştirmeye yönelik çerçevelerin evrimini sistematik biçimde incelemiştir.

- Dijital yeterlilikler, temel okuryazarlıktan çok boyutlu dijital yetkinliklere doğru evrilmiştir.
- Bu yetkinlikler, bilgi arama, içerik üretme, bilgisayar güvenliği, çevrimiçi işbirliği ve bilgi yayılımı gibi alanları kapsamaktadır.
- Özellikle İbero-Amerika'da geliştirilen çerçeveler, dijital dönüşümün eğitim sistemlerine entegrasyonunda kritik bir rol oynamaktadır.

Kurumsal yönetim açısından bu çalışmalar, insan kaynağının dijital dönüşüme uyum sağlayabilmesi için dijital eğitim politikalarının zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Eğitimde dijital yetkinlik, uzun vadede kurumsal inovasyon kapasitesinin de temelidir.

2.2.7.4 Dijital Liderlik ve Kurumsal Dönüşüm

Ghamrawi & Tamim (2023), yükseköğretimde dijital liderlik kavramını inceleyerek, dijital dönüşüm süreçlerinde liderlerin kritik rolünü ortaya koymaktadır.

- Dijital liderlerin, yalnızca teknolojiye hâkim değil, aynı zamanda vizyoner, öğrenmeyi teşvik eden ve dijital vatandaşlığı destekleyen kişiler olmaları gerekmektedir.
- Liderlik, dijitalleşmeye yönelik direnci aşmada ve kurum kültürünü dönüştürmede anahtar rol oynamaktadır.
- 21. yüzyıl kurumlarında dijital liderlik, hem teknolojik hem de insani boyutları bir arada yönetmeyi zorunlu kılmaktadır.

Bu bulgular, dijital yetkinlik ölçütlerinin yalnızca teknik becerilerle değil, aynı zamanda liderlik tarzları ve kültürel dönüşüm kapasitesiyle de ilişkili olduğunu göstermektedir.

2.2.7.5 Kurumsal Teoriler ve Dijital Yetkinlikler

Zhao ve arkadaşları (2024), kurumsal dijital dönüşümde yönetim teorilerinin rolünü incelemiştir.

- Hissedar önceliği teorisi, şirketlerin dijital stratejilerinde hissedar değerini maksimize etmeye odaklanır.
- Paydaş teorisi, sosyal sorumluluk ve sürdürülebilirlik gibi unsurları öne çıkarır.
- Bu iki yaklaşım arasındaki denge, kurumsal yönetimde dijital yetkinliklerin ölçütlerinin belirlenmesinde kritik bir referans çerçevesi oluşturur.

Ayrıca, ajan teorisi yönetim ve sahiplik arasındaki ayrımı, dijital dönüşümün karmaşık yapıları içinde yeniden yorumlamakta ve yönetimde yeni hesap verebilirlik mekanizmaları gerektirmektedir.

2.2.7.6 Sonuç

Kurumsal yönetimde dijital yetkinlik ölçütleri, yalnızca teknoloji kullanımı değil, aynı zamanda risk yönetimi, sürdürülebilirlik, liderlik ve eğitim boyutlarını da kapsayan çok katmanlı bir yapıya sahiptir.

- Siber güvenlik: Dijital risklerin finansal olarak ölçülmesi ve yönetim kurullarının bu konuda sorumluluk alması.
- Dijital ekonomi: E-devlet, hesap verebilirlik ve sürdürülebilirlik ile bütünleşen kurumsal yönetim.
- Eğitim: Dijital yeterliliklerin hem birey hem kurum düzeyinde geliştirilmesi.
- Liderlik: Vizyoner ve yenilikçi liderlik tarzlarının dijital dönüşümü yönlendirmedeki rolü.
- Teorik çerçeve: Hissedar ve paydaş teorileriyle dijital stratejilerin uyumu.

Sonuç olarak, dijital yetkinlikler artık kurumsal yönetimin temel performans göstergeleri arasına girmiştir. Yöneticiler, dijital riskleri anlamak ve yönetmek, dijital stratejileri kurumsal yapıya entegre etmek ve liderlik kapasitesini bu yönde güçlendirmek zorundadır. Eğitimden ekonomiye, risk yönetiminden liderliğe kadar

uzanan bu geniş yelpaze, dijital yetkinliklerin kurumsal yönetişimde ölçülebilir, karşılaştırılabilir ve geliştirilebilir göstergeler haline gelmesini zorunlu kılmaktadır.

2.3 Karbon Veri Yönetimi ve Raporlama Altyapısı

Karbon Veri Yönetimi, bir organizasyonun sera gazı emisyonlarını izleme, analiz etme, raporlama ve strateji geliştirme süreçlerini kapsayan bütüncül bir sistemdir. Temel amacı, karbon salınımlarının kontrol altına alınması ve azaltılması yoluyla çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesidir. Bu sistem sayesinde şirketler ve kurumlar, enerji tüketimi, ulaşım, üretim faaliyetleri ve diğer operasyonlardan kaynaklanan karbon ayak izlerini düzenli olarak takip edebilirler.

İlk aşamada, organizasyonun farklı faaliyet alanlarında ortaya çıkan emisyonlar kaynaklarına göre sınıflandırılır ve sistematik biçimde toplanır. Bu veriler genellikle enerji tüketimi, yakıt kullanımı, üretim süreçleri ve lojistik faaliyetlerden elde edilir.

Toplanan veriler detaylı şekilde incelenerek hangi süreçlerin daha yüksek emisyonlara sebep olduğu belirlenir. Bu analiz, işletmelerin çevresel etkilerini doğru anlamaları ve öncelikli müdahale alanlarını tespit etmeleri açısından kritik öneme sahiptir.

Karbon veri yönetiminin önemli bir aşaması da raporlamadır. Organizasyonlar, emisyon sonuçlarını hem iç hem de dış paydaşlarla, ulusal ve uluslararası standartlara (ör. ISO 14064, GHG Protokolü) uygun biçimde paylaşır. Bu raporlar, kurumların çevresel performansının şeffaf bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanır ve yasal uyum açısından da gereklidir.

Son aşamada, elde edilen veriler doğrultusunda emisyon azaltım hedefleri tanımlanır ve bu hedeflere ulaşmak için stratejiler geliştirilir. Enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kullanımına geçiş, atık yönetiminde iyileştirmeler ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri bu stratejilerin başlıca bileşenleridir. Ayrıca karbon kredileri ve gönüllü piyasa mekanizmaları kullanılarak emisyonların dengelenmesi de mümkün hale gelmektedir.

2.3.1 Veri toplama yöntemleri (ölçüm, beyan, otomasyon vb.)

Kurumsal karbon ayak izinin hesaplanmasında en önemli parametrelerden biri faaliyet verileridir. Önceki bölümde ele alınan emisyon kaynaklarına ilişkin faaliyet verilerinin belirlenmesi ve bu verilere yönelik gerekli belgelerin derlenmesi, kurumsal karbon ayak izi hesaplama sürecinin kritik bir aşamasını oluşturmaktadır. Tablo 1, farklı faaliyet kategorileri için gerekli veri türlerine ve ilgili belgelere örnekler sunmaktadır.

Doğrudan emisyonlar açısından, sabit ve mobil yanma kaynaklarına ilişkin faaliyet verilerine ulaşmak genellikle daha kolaydır. Bunun temel nedeni, bu faaliyetlerin şirketlerin operasyonel kontrolü altında değerlendirilmesidir.

Bu nedenle, bu verilere ilişkin düzenli kayıtların tutulması ve takibinin yapılması daha pratik olmaktadır. Ancak, dolaylı emisyonlara yönelik verilerin bulunabilirliği veya güvenilirliğinin sağlanması işletmeler için zorluk yaratabilmektedir. Özellikle ithal elektrik gibi dolaylı emisyonlarda bu durum ön plana çıkmaktadır. Yine de, elektrik tüketimine ilişkin veriler çoğunlukla faturalara yansdığı için erişilebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.

Doğrudan emisyon kaynakları arasında yer alan antropojenik sistem kaçakları ise, daha önce karbon ayak izi çalışması yapmamış şirketler için elde edilmesi güç verilerden biridir. Çoğunlukla bu sistemlerin bakımları dış hizmet sağlayıcılar tarafından yapılmakta ya da şirketin kendi bakım birimi tarafından yürütülmektedir. Bu nedenle, bu tür kaçaklara ilişkin verilerin elde edilebilmesi için servis sağlayıcılardan bakım raporlarının talep edilmesi ya da bakım biriminin gerçekleştirdiği işlemleri kayıt altına alması gerekmektedir.

Dolaylı emisyonlar içerisinde yer alan taşımacılıkla ilgili veriler ise farklı alternatiflerle hesaplanabilmektedir. İlk durumda, taşımacılık faaliyetlerine ilişkin fosil yakıt tüketiminin bilindiği varsayılmaktadır. Eğer yakıt tüketimi verisi mevcut değilse, ulaşım türü, araç tipi, yakıt türü, kat edilen mesafe ve taşınan yük miktarı gibi bilgiler toplanarak hesaplama yapılabilmektedir. Ancak, işletmeler genellikle taşımacılık için farklı firmalarla çalıştıklarından, bu bilgilerin düzenli şekilde temin edilmesi zorlayıcı olabilmektedir. Bu nedenle, taşımacılık hizmeti sağlayıcılarının bu veri toplama ihtiyacı konusunda bilgilendirilmesi ve düzenli veri akışını sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi önerilmektedir.

Çalışan servisi hizmeti sağlayan işletmeler açısından, hizmet alımı sırasında sözleşmelere yakıt tüketimi, taşınan yolcu sayısı ve gidilen mesafeye ilişkin verilerin raporlanmasına yönelik hükümler eklenmesi faydalı olacaktır. Bu tür veriler, hesaplamalarda kullanılabilecek güçlü kanıt belgeleri niteliği taşımaktadır.

Benzer şekilde, şirketi ziyaret eden misafirlerin taşımacılığına ilişkin faaliyet verileri doğrudan şirket tarafından kayıt altına alınabilir. Ziyaretçilere, kurumda yürütülen karbon ayak izi çalışmalarına ilişkin bilgilendirme yapılabilir ve yakıt tüketimi, gidilen mesafe, yakıt türü ile araç tipine dair verilerin paylaşılması için izinleri talep edilebilir. Bu yaklaşım, ziyaret kaynaklı emisyonların daha doğru ve şeffaf şekilde raporlanmasına katkı sağlamaktadır.

Şirket tarafından satın alınan hammadde, makine, ekipman veya hizmetlere ilişkin veriler, faaliyet miktarı veya faaliyetlerin finansal değeri esas alınarak değerlendirilebilir.

İşletmeler için en zorlu kategorilerden biri ise ürün kullanımına bağlı emisyonlardır. Bu konuda şirketlerin, ürünün kullanım sürecinde tüketici davranışlarını analiz etmeleri gerekmektedir. Örneğin Halı sektörü özelinde, halının süpürülmesi veya yıkanması sırasında tüketilen elektrik miktarı ürün kullanım faaliyet verisi olarak dikkate alınabilir. Bu nedenle halı üreticilerinin, hedef pazarlarındaki tüketicilerin halı süpürme veya temizleme sıklığını ve kullandıkları cihaz türlerini araştırmaları önemlidir. Ayrıca, halının kullanım ömrü sonunda nasıl bertaraf edildiği veya geri dönüştürüldüğüne ilişkin soruların da bu araştırmaya dahil edilmesi mümkündür [1].

Tablo 1: Faaliyet Türlerine Göre Gerekli Veri ve Belgeler

Faaliyet Türü	Faaliyet Örneği	Gerekli Veri Türü	Veri Örneği	Belge Örneği
<i>Sabit Yanma</i>	Doğalgaz tüketimi, kazanlarda yakıt kullanımı	Tüketilen fosil yakıt miktarı	Sm3 (doğalgaz), lt (dizel)	Faturalar, makbuzlar
<i>Mobil Yanma</i>	Motorlu araçlarda yakıt tüketimi	Tüketilen fosil yakıt miktarı	lt (benzin, motorin)	Faturalar, makbuzlar
<i>Antropojenik sistem kaçakları</i>	Klimalar, soğutma sistemleri, yangın söndürücüler	1) Kaçak miktarı 2) Ekipman tipi, soğutucu türü	1 kg (R410A soğutucu) veya soğutucu türüne göre	Servis raporları, bakım kayıtları
<i>İthal Elektrik</i>	Şirketin satın aldığı elektrik	Tüketilen elektrik miktarı	kWh (elektrik)	Faturalar
<i>Taşımacılık (mal/ürün)</i>	Tır, kamyon vb. ile ürün taşımacılığı	Alternatif 1) Yakıt tüketimi, Alternatif 2) Taşıma türü, araç tipi, yakıt türü, mesafe, yük miktarı	1 lt (dizel) veya 2) 20 ton yük, 150 km	Taşıma belgeleri, makbuzlar
<i>Ziyaretçi/iş seyahati taşımacılığı</i>	Personel, müşteri veya ziyaretçi taşımacılığı	Alternatif 1) Yakıt tüketimi, Alternatif 2) Araç türü, mesafe, yakıt tipi	1 lt (dizel) veya 2) Otobüs, 30 km	Biletler, makbuzlar
<i>Satın alınan mal/hizmetler</i>	Kağıt, kimyasal, danışmanlık hizmetleri	Alternatif 1) Satın alınan ürün miktarı, Alternatif 2) Parasal değer	10 ton (kağıt), 5000 TL	Faturalar, irsaliyeler

Faaliyet Türü	Faaliyet Örneği	Gerekli Veri Türü	Veri Örneği	Belge Örneği
Atık Bertarafı	Üretim sürecinde oluşan atıklar	Atık türü, miktarı, bertaraf yöntemi	Kağıt, ton, geri dönüşüm	Firma kayıtları, atık fişleri
Ürün Kullanımı	Ürünlerin kullanım süresince temizlik	Elektrik tüketimi	kWh (elektrik)	Anketler, araştırma raporları
Ömrünü Tamamlamış Ürün	Kullanım ömrü sona ermiş Ürünler	Nihai Ürün miktarı, bertaraf türü	m ² (Ürün), depolama	Satış raporları, bertaraf belgeleri

2.3.2 Kapsam 3 Verilerine Ulaşmada Zorluklar

Kurumsal karbon ayak izi hesaplamasında en karmaşık ve zorlu adımlardan biri, Kapsam 3 emisyonlarının doğru şekilde hesaplanmasıdır. Bu emisyonlar, işletmenin doğrudan kontrolü dışında gerçekleşen ancak faaliyetleriyle ilişkili olan dolaylı sera gazı salımlarını kapsamaktadır. Örneklendirmek gerekirse; satın alınan hammaddeye gömülü emisyonlar, taşımacılık hizmetlerinde kullanılan yakıtlardan kaynaklanan emisyonlar ve bir ürünün yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan emisyonlar Kapsam 3 kapsamında değerlendirilmektedir.

Bu tür verilerin büyük çoğunluğu, işletme dışındaki paydaşlardan (tedarikçiler, lojistik firmaları, müşteriler vb.) elde edilmek zorundadır. Ancak uygulamada, özellikle tedarikçilerden yanıt alma sürecinde muhasebe firmaları ve şirketler önemli güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bu nedenle, şirketlerin Kapsam 3 emisyonlarını daha doğru ve eksiksiz hesaplayabilmeleri için etkin veri toplama stratejileri geliştirmeleri kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda önerilebilecek bazı temel stratejiler şunlardır:

- Ürün veya hizmet satın alma sözleşmelerine, emisyon verilerinin sağlanmasını zorunlu kılan hükümler eklenmesi,
- Karbon muhasebesi altyapısına henüz sahip olmayan paydaşların yönlendirilmesi ve sürece dâhil edilmesi,
- Paydaşlar arasında veri akışını kolaylaştırmak amacıyla dijital izlenebilirlik ve veri paylaşım platformlarının kullanılması veya geliştirilmesi.

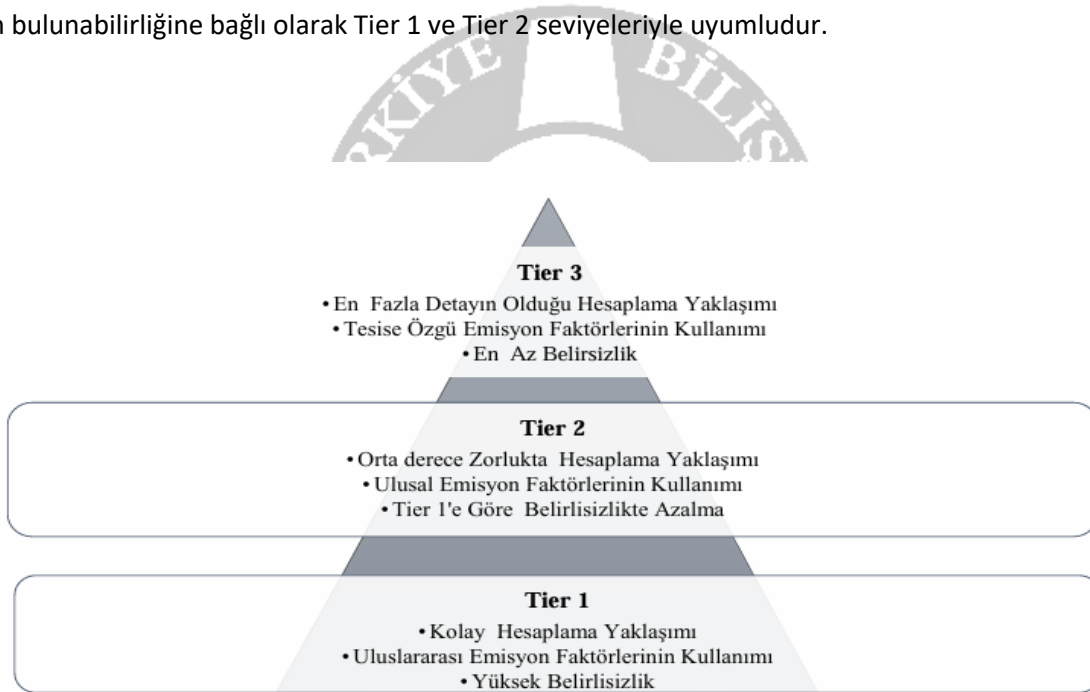
Bu stratejiler yalnızca Kapsam 3 verilerinin teminini kolaylaştırmakla kalmayacak, aynı zamanda tedarik zinciri boyunca şeffaflık ve iklim dostu iş birliklerinin geliştirilmesine de uzun vadede katkı sağlayacaktır.

Bunun yanında, emisyon faktörlerinin IPCC, DEFRA ve EPA gibi farklı veri tabanlarında bölgesel varsayımlar, yakıt özellikleri ve metodolojik yaklaşımlardaki farklılıklar nedeniyle değişkenlik gösterebileceği vurgulanmalıdır. Bu çalışmada emisyon faktörleri, Türkiye bağlamındaki uygulanabilirlik dikkate alınarak seçilmiştir. Ancak gelecekteki uygulamalarda, farklı emisyon faktörü kaynakları kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılması, sonuçların duyarlılığının değerlendirilmesi açısından faydalı olacaktır.

Ayrıca, IPCC'nin veri kalitesini katmanlı (tiered) yaklaşım kapsamında sınıflandırdığını belirtmek yararlı olacaktır. Bu çerçevede:

- Tier 1, varsayılan emisyon faktörleri ve genel faaliyet verilerinin kullanımını temsil etmektedir.
- Tier 2, ülkeye özgü faktörlerin veya şirket düzeyindeki faaliyet verilerinin kullanılmasını içermektedir.
- Tier 3 ise yüksek çözünürlüklü, proses düzeyindeki ölçümler veya modellenmiş tahminler ile en ileri düzey hesaplama yaklaşımını ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan veri kaynaklarının büyük çoğunluğu, ulusal emisyon faktörlerinin ve tesislere özgü kayıtların bulunabilirliğine bağlı olarak Tier 1 ve Tier 2 seviyeleriyle uyumludur.



Şekil 1: Tier Kavramı ve Seviyeleri [2]

Bu stratejiler yalnızca Kapsam 3 verilerinin temin edilmesini kolaylaştırmakla kalmayacak, aynı zamanda uzun vadede tedarik zinciri boyunca şeffaflığın sağlanmasına ve iklim dostu iş birliklerinin geliştirilmesine de katkı sunacaktır.

Ayrıca, emisyon faktörlerinin IPCC, DEFRA ve EPA gibi farklı veri tabanları arasında; bölgesel varsayımlar, yakıt özellikleri ve metodolojik yaklaşımlardaki farklılıklardan dolayı değişiklik gösterebileceği vurgulanmalıdır. Bu

çalışmada emisyon faktörleri, Türkiye bağlamına uygunluğu dikkate alınarak seçilmiştir. Ancak gelecekteki uygulamalarda, sonuçların duyarlılığını değerlendirmek amacıyla birden fazla emisyon faktörü kaynağını karşılaştırmalı olarak analiz etmek faydalı olacaktır.

Buna ek olarak, IPCC'nin kademeli (Tier) yaklaşımına göre veri kalitesinin sınıflandırılmasının yararlı olacağı ifade edilmelidir. Tier 1, varsayılan emisyon faktörlerinin ve genel faaliyet verilerinin kullanımını temsil ederken; Tier 2, ülkeye özgü faktörlerin veya şirket düzeyinde faaliyet verilerinin kullanımını içermektedir. Tier 3 ise yüksek çözünürlüklü, proses seviyesindeki ölçümler veya modellemelere dayalı tahminleri kapsamaktadır. Bu çalışmada kullanılan veri kaynaklarının çoğu, ulusal emisyon faktörlerinin ve tesis bazlı kayıtların mevcudiyetine bağlı olarak Tier 1 ve Tier 2 seviyeleri ile uyumludur.

Diğer taraftan, Sera Gazı Protokolü (GHG Protocol), kurumsal sera gazı envanterlerinde kullanılacak verilerin kalitesine ilişkin bir hiyerarşi tanımlamaktadır. Bu hiyerarşi, en güvenilir ve özgün verilerden başlayarak daha düşük doğruluk düzeyine sahip verilere kadar dört katmandan oluşmaktadır. Tablo 2, bu veri hiyerarşisini sistematik biçimde sunmakta; ayrıca ilgili şekil, kapsam ve kategorilere göre hangi veri türlerinin tercih edildiğini görsel olarak desteklemektedir.

En üst seviyede, yani 1. katmanda (tedarikçiye özel yöntem), ürün veya hizmetin gerçek üretim koşullarını yansıtan doğrudan tedarikçi verileri kullanılmaktadır. Bu yaklaşım en yüksek güvenilirliği temsil etmekte olup, örneğin bir tedarikçinin sunduğu Çevresel Ürün Beyanı (EPD) bu kapsama girmektedir. 2. katman (hibrit yöntem), özgün verilerin yetersiz olduğu durumlarda ortalama verilerle desteklenmesini içermektedir. 3. katmanda (ortalama veri yöntemi), sektör ortalamaları veya ulusal/bölgesel veri tabanlarından elde edilen bilgiler kullanılmakta, ancak doğruluk düzeyi görece düşmektedir. 4. katman (harcama bazlı yöntem) ise finansal harcama verilerinden hareketle hesaplama yapılmasına dayalı olup, veri elde etme kolaylığı sağlasa da doğruluk açısından en zayıf yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Şekil incelendiğinde, farklı kapsam ve kategoriler için kullanılan veri türlerinin değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bazı kategorilerde tedarikçiye özel veriler öncelikli iken, diğerlerinde hibrit veya ortalama veriler öne çıkmaktadır. Bu durum, veri bulunabilirliği ve veri toplama maliyetlerinin hesaplama yöntemi seçiminde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2: Sera gazı protokolünün önerdiği veri hiyerarşisi. [3]

Katman	Hesaplama Yöntemi	Yukarı Akım Üretim Emisyonları	Tedarikçinin Kapsam 1 ve 2 Emisyonları
1 (PB)	Tedarikçiye Özel	Tedarikçiye Özel Veriler	Tedarikçiye Özel Veriler
2 (PB)	Hibrit Yöntem	Tedarikçiye Özel Veriler veya ortalama veriler, veya her ikisinin bir kombinasyonu	Tedarikçiye Özel Veriler
3 (PB)	Ortalama Veri Yöntemi	Ortalama Veriler	Ortalama Veriler
4 (SB)	Harcama Bazlı Yöntem	Ortalama Veriler	Ortalama Veriler

2.3.3 Emisyon Faktörünü Belirleme

Emisyon faktörü, belirli bir faaliyetin gerçekleştirilmesi sonucu ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için kullanılan bir parametredir. Faaliyetlere ilişkin emisyon faktörleri çeşitli yollarla elde edilebilir. Örneğin, bir işletme kendi tesislerinde kullanılan fosil yakıtları analiz ederek emisyon faktörünü hesaplayabilir; aynı zamanda bu veriler ulusal envanterlerden veya güvenilir uluslararası veri tabanlarından da temin edilebilir.

Bu çalışmada kullanılan emisyon faktörleri, kamuya açık uluslararası veri tabanlarından alınmıştır. Başlıca kaynaklar şunlardır:

- Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2024)
- Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (DEFRA, 2024)
- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA, 2023)

Tablo 4, faaliyet verisi türleri ve veri kategorilerine göre kullanılacak emisyon faktörü veri tabanlarına örnekler sunmaktadır. Tabloya göre, ithal edilen elektrik için emisyon faktöründe ulusal kaynakların tercih edilmesi önerilmektedir. Zira ülkelerin yenilenebilir enerji potansiyeli farklılık gösterdiğinden, ulusal verilerin kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir. Bu nedenle, elektrik için kullanılan emisyon faktörleri ülkeden ülkeye önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir.

Emisyon faktörlerine ek olarak, hesaplamalarda gerekli olan net kalorifik değerler ve küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential – GWP) gibi diğer parametreler de IPCC veri tabanından elde edilebilmektedir. Net kalorifik değer, bir yakıtın yanmasıyla açığa çıkan enerji miktarını ifade eder ve enerji kaynaklarının ne kadar enerji ürettiğini anlamak açısından kritik bir göstergedir. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ise belirli bir sera gazının, atmosferde belirli bir süre boyunca (genellikle 100 yıl) gezegenin ısınmasına olan katkısını ölçen bir değerdir. GWP, bir gazın etkisini aynı miktardaki karbondioksit (CO₂) ile karşılaştırmalı olarak ifade etmektedir.

Tablo 4. Faaliyet ve veri türüne göre emisyon faktörü kaynaklarına örnekler [8]

<i>Faaliyet Türü (Örnek)</i>	<i>Veri Türü (Örnek)</i>	<i>Emisyon Faktörü Kaynağı (Örnek)</i>
<i>Sabit yanma</i>	Tüketilen fosil yakıt miktarı	IPCC
<i>Mobil yanma</i>	Tüketilen fosil yakıt miktarı	IPCC
<i>Antropojenik sistemlerden sızıntı</i>	GHG sızıntı miktarı	IPCC
<i>İthal elektrik</i>	İthal edilen elektrik miktarı	Ulusal kaynaklar, EPDK
<i>Ürün/mal taşımacılığı</i>	Tüketilen fosil yakıt miktarı	IPCC
<i>Ürün/mal taşımacılığı</i>	Taşıma türü, araç türü, araç kapasitesi, fosil yakıt türü, mesafe ve yük	DEFRA
<i>Ziyaretçi/iş seyahati taşımacılığı</i>	Tüketilen fosil yakıt miktarı	IPCC
<i>Ziyaretçi/iş seyahati taşımacılığı</i>	Taşıma türü, araç türü, fosil yakıt türü, mesafe	DEFRA
<i>Evden çalışma</i>	Çalışma saati, gün	DEFRA
<i>Otel konaklaması</i>	Gece sayısı, kişi sayısı, ülke	DEFRA
<i>Satın alınan mallar/sermaye malları</i>	Satın alınan malların miktarı	DEFRA
<i>Satın alınan mallar/sermaye malları</i>	Satın alınan malların parasal değeri	EPA
<i>Atık bertarafı</i>	Atık türü, atık miktarı, bertaraf türü	DEFRA
<i>Ömrünü tamamlamış ürünlerin işlenmesi</i>	ömrünü tamamlama işlem türü	Ecoincent LCA

2.3.4 Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, karbon ayak izi çalışmalarında yapılan hesaplamaların güvenilirlik düzeyini değerlendirmemize imkân tanıyan en önemli analizlerden biridir. Bu analiz, hesaplama sürecinde kullanılan verilerin doğruluk seviyelerine ilişkin bir tahmin yapılmasını gerektirir. Her ne kadar bu çalışmanın temel odağı emisyon kaynaklarının belirlenmesi ve sektörel bir çerçevenin yapılandırılması olsa da, belirsizlik konusu geniş ve metodolojik açıdan karmaşık bir alandır. Bu nedenle kapsamlı bir belirsizlik modellemesi bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur; ancak karbon raporlama uygulamalarını geliştirmeyi hedefleyen kuruluşlara yol gösterebilmek amacıyla temel unsurlarına ilişkin kısa bir özet aşağıda sunulmaktadır.

Karbon ayak izi çalışmalarında belirsizlik analizi niteliksel (qualitative) ve niceliksel (quantitative) yöntemlerle gerçekleştirilebilir:

- **Niceliksel Belirsizlik Analizi:** Daha çok firmaların faaliyetler üzerinde doğrudan kontrole sahip olduğu ve ölçüm verilerinin daha kolay erişilebilir olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu analiz, iki temel bileşendeki belirsizliğin değerlendirilmesini içerir: *faaliyet verisi belirsizliği* ve *parametre belirsizliği*. Şirketler, hesaplama süreçlerinde kullandıkları faaliyet verisi ve parametre belirsizliklerini ayrı ayrı hesaplar ve uygun kombinasyon kurallarıyla birleştirir. Faaliyet verisi belirsizlikleri, şirketlerin veri topladığı cihazlardaki ölçüm sapmalarından elde edilebilir. Parametre belirsizlikleri ise kullanılan veri tabanlarında tanımlanan değerler üzerinden hesaplanabilir. Örneğin, IPCC veritabanı, kullanılan verilerin belirsizlik oranlarını ya da alt ve üst sınırlarını sunmaktadır. Bu değerler, parametre belirsizliklerinin hesaplanmasında kullanılabilir.
- **Niteliksel Belirsizlik Analizi:** Firmaların çoğunlukla faaliyet verileri için tedarikçilere veya üçüncü taraflara bağımlı oldukları, dolayısıyla sayısal belirsizlik verilerinin kolayca elde edilemediği durumlarda tercih edilmektedir. Bu tür durumlarda şirketler, uzman görüşü, veri temin kriterleri veya dokümantasyon tutarlılığı gibi yöntemleri kullanarak verilerin kalitesini değerlendirebilir ve belirsizlik seviyelerini niteliksel olarak tahmin edebilirler [8].

2.3.5 Önemlilik Analizi

Doğrudan sera gazı emisyonları (Scope 1), kuruluşun mülkiyetinde bulunan veya doğrudan kontrol ettiği kaynaklardan salınan emisyonları ifade etmektedir. Bu kapsamda, örneğin iklimlendirme sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanlardan ya da şirket araç filosunda gerçekleşen yakıt yanmalarından kaynaklanan emisyonlar yer almaktadır. Doğrudan sera gazı uzaklaştırmaları ise, kuruluşun sahip olduğu veya kontrol ettiği yutaklar aracılığıyla gerçekleştirilen sera gazı giderimlerini kapsamaktadır.

Dolaylı sera gazı emisyonları (Scope 2 ve Scope 3), kuruluşun faaliyetleri sonucunda oluşmakla birlikte doğrudan kontrolü altında olmayan kaynaklardan ortaya çıkan emisyonları ifade etmektedir. Satın alınan elektrik ve ısı enerjisinden kaynaklanan emisyonlar Scope 2 kapsamında değerlendirilirken; tedarik zinciri, lojistik faaliyetler, iş seyahatleri ve atık bertarafı süreçlerinden doğan emisyonlar Scope 3 kapsamına girmektedir.

Önemli dolaylı sera gazı emisyonları ise, kuruluşun kendi belirlediği önemlilik kriterlerine göre seçilen ve raporlanan emisyonları kapsamaktadır. Bu bağlamda kuruluş, tüm dolaylı emisyonlarını tanımlamakta; ardından kriterlere göre değerlendirme yaparak yalnızca "önemli" kabul edilen emisyonları raporlamaktadır. Örneğin otel işletmeleri için müşteri seyahatlerinden kaynaklanan emisyonlar ve elektrik tüketimi kritik önemde iken; tekstil sektöründe hammaddelerin üretim süreçlerinden doğan emisyonlar, ulaşım sektöründe ise lojistik ve taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar öncelikli olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla önemlilik, sektörün faaliyet yapısına, enerji ve hammadde tüketim düzeyine, tedarik zinciri uzunluğuna ve paydaş beklentilerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

2.3.6 Raporlama Altyapısı

Karbon ayak izinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için uluslararası standartlar geliştirilmiştir. Sera Gazı Protokolü Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı, kurumların sera gazı emisyon envanteri hazırlamalarına yönelik kapsamlı gereklilikler ve rehberlik sunmaktadır (GHG Protocol, 2024). Benzer şekilde, ISO 14064-1:2018 standardı da organizasyon düzeyinde sera gazı emisyonları ve giderimlerinin hesaplanması ve raporlanması için uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır (ISO, 2022). Bu standartlar, dünya genelinde birçok sektörde benimsenmekte; kurumsal karbon ayak izinin hesaplanması ve bu hesaplamalardan elde edilen veriler doğrultusunda emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Karbon ayak izi ölçümü ve veri toplama süreçleri tamamlandıktan sonra, bu verilerin hangi standartlara göre raporlanacağı kritik bir aşamayı oluşturmaktadır. Doğru raporlama standardının seçilmesi, işletmelerin sürdürülebilirlik stratejilerinin etkinliğini doğrudan etkilemekte ve ulusal ile uluslararası düzeyde şeffaflık, karşılaştırılabilirlik ve hesap verebilirlik sağlamaktadır. Bu nedenle, karbon raporlama standartlarının incelenmesi ve kuruma en uygun olanının belirlenmesi, stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Küresel ölçekte en yaygın kullanılan standartlardan biri **GHG Protocol**'dür. Bu protokol, Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 emisyonlarını ayrıntılı ve açık bir biçimde tanımlayarak, farklı sektörlerdeki şirketlere uyumlu ve karşılaştırılabilir bir raporlama çerçevesi sunmaktadır. Bir diğer önemli standart olan **ISO 14064**, karbon ayak izi hesaplaması, doğrulaması ve raporlanması için uluslararası geçerliliğe sahip, detaylı ve yapılandırılmış bir yöntem sunar. Bu standardın özellikle doğrulama süreçlerindeki gücü, kurumların raporlarının güvenilirliğini artırmaktadır.

Raporlama standardı seçilirken dikkate alınması gereken çeşitli kriterler bulunmaktadır. Sektör yapısı ve şirket büyüklüğü bu kriterlerin başında gelmektedir. Enerji yoğun sektörlerde faaliyet gösteren şirketler genellikle daha kapsamlı raporlama standartlarını benimsemek zorunda kalırken, küçük ve orta ölçekli işletmeler için GHG Protocol veya ISO 14064 çoğu durumda yeterli olmaktadır. Ayrıca, zorunlu ve gönüllü raporlama ayrımı da önemli bir belirleyicidir. Bazı standartlar ve platformlar belirli sektörler veya bölgeler için yasal olarak zorunlu hale gelirken, uluslararası ticaret yapan şirketlerin gönüllü olarak CDP'ye raporlama yapmaları yaygın bir uygulamadır. Son olarak,

uluslararası geçerlilik ve kabul edilebilirlik, özellikle küresel pazarlarda faaliyet gösteren şirketler için stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

2.3.7 GHG Protokolü



Sera Gazı Protokolü (GHG Protocol), sera gazı emisyonlarının muhasebeleştirilmesi ve raporlanması amacıyla dünya genelinde en yaygın şekilde kullanılan standart setlerinden biridir. Protokol girişimi, 1998 yılında Dünya Kaynakları Enstitüsü (World Resources Institute, WRI) ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) tarafından, hükümetler, sivil toplum kuruluşları ve özel sektör temsilcilerinin iş birliği ile başlatılmıştır. Bu çerçevede geliştirilen standartlar, farklı sektörler tarafından uluslararası kabul görmüş emisyon muhasebesi ve raporlama ilkelerinin uygulanması için referans niteliği taşımaktadır (GHG Protocol, 2004, s. 2-3).

GHG Protokolü Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı'nın temel amacı, kurum ve kuruluşların sera gazı envanteri hazırlarken teknik açıdan uygulanabilir, kullanıcı dostu ve güvenilir yöntemler benimsemelerini sağlamaktır. Bu standart, sera gazı emisyonlarının doğru, şeffaf ve maliyet etkin bir şekilde hesaplanması ve raporlanmasına rehberlik eder. Ayrıca, işletmelerin etkin emisyon yönetimi ve azaltım stratejileri geliştirebilmeleri için gerekli bilgilerin sağlanması da hedeflenmektedir. Standart, Kyoto Protokolü kapsamında belirlenmiş altı temel sera gazını kapsamaktadır: karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O), perflorokarbonlar (PFCs), hidroflorokarbonlar (HFCs) ve kükürt hekzaflorür (SF₆) (GHG Protocol, 2004, s. 3).

Kurumsal standardın dayandığı beş temel ilke; **ilgili (relevance)**, **tamlık (completeness)**, **tutarlılık (consistency)**, **şeffaflık (transparency)** ve ****doğruluk (accuracy)****tur. İlgili (lilik) ilkesi, kurumun sera gazı raporunda karar alma süreçleri açısından gerekli tüm bilgilerin, iç ve dış paydaşların beklentileri gözetilerek sunulmasını ifade etmektedir. Bu bağlamda, organizasyonel yapılar, operasyonel sınırlar ve iş bağlamını kapsayan uygun bir envanter sınırının belirlenmesi önemlidir. Tamlık ilkesi, envanter kapsamında yer alan tüm emisyon kaynaklarının dikkate alınmasını, olası hariç tutmaların ise gerekçelendirilmesini zorunlu kılar. Tutarlılık, kullanılan metodolojilerin zaman içerisinde karşılaştırılabilir olmasını sağlarken; şeffaflık, veri kaynakları ve varsayımların açıkça belgelenmesini gerektirir. Doğruluk ilkesi ise, belirsizliklerin en aza indirilmesi ve raporun güvenilirliğinin artırılması için kritik öneme sahiptir (GHG Protocol, 2004, s. 7-9).

Kurumların karbon ayak izi değerlendirmesi için öncelikle **organizasyonel sınırlarını** belirlemeleri gerekmektedir. Bu aşamada, sera gazı envanterine dahil edilecek tüm operasyonlar tanımlanır. Organizasyonel sınırlar iki farklı yöntemle belirlenebilir: **Sermaye Payı Yaklaşımı (Equity Share Approach)** ve **Kontrol Yaklaşımı (Control Approach)**. Sermaye payı yaklaşımında emisyonlar, işletmenin ekonomik sahiplik oranına göre tahsis edilirken;

kontrol yaklaşımında, kurumun finansal veya operasyonel kontrolüne sahip olduğu faaliyetlerden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınır (GHG Protocol, 2004, s. 17).

Organizasyonel sınırların belirlenmesinin ardından, **operasyonel sınırlar** tanımlanır. Bu kapsamda emisyonlar üç ayrı kategoriye ayrılmaktadır:

- **Kapsam 1:** Kurumun sahip olduğu veya kontrol ettiği tesis ve operasyonlardan kaynaklanan doğrudan emisyonlar.
- **Kapsam 2:** Satın alınan ve tüketilen enerji nedeniyle oluşan dolaylı emisyonlar.
- **Kapsam 3:** Tedarik zinciri, lojistik, hizmet alımları ve atık yönetimi gibi kurumun değer zinciri içerisindeki diğer faaliyetlerden kaynaklanan dolaylı emisyonlar (GHG Protocol, 2004, s. 25-27).

Kapsam 3 emisyonlarının daha ayrıntılı bir biçimde sınıflandırılması amacıyla 2011 yılında **Kurumsal Değer Zinciri (Scope 3) Muhasebe ve Raporlama Standardı** yayımlanmıştır. Bu standart, Kapsam 3 emisyonlarını toplam 15 kategoriye ayırmakta ve bunları "yukarı akım (upstream)" ve "aşağı akım (downstream)" faaliyetler şeklinde sınıflandırmaktadır. Yukarı akım emisyonları, ürün veya hizmet kuruma ulaşmadan önce ortaya çıkan emisyonları; aşağı akım emisyonları ise ürün veya hizmetin mülkiyeti başka bir aktöre devredildikten sonra oluşan emisyonları kapsamaktadır (GHG Protocol, 2011, s. 29-32).

Hesaplama aşamasında, uygun emisyon faktörlerinin seçilmesi ve faaliyet verilerinin (örneğin yakıt tüketimi, taşımacılık mesafeleri) toplanması gerekmektedir. Hesaplamalarda kullanılacak araçlar, **sektörler arası araçlar** ve **sektöre özgü araçlar** olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sektörler arası araçlar farklı endüstrilerde uygulanabilirken, sektöre özgü araçlar belirli sektörlerle yönelik olarak geliştirilmiştir (GHG Protocol, 2004, s. 42-43).

Raporlama sürecinde, kullanılan yöntemlerin, veri kaynaklarının ve varsa hariç tutmaların ayrıntılı bir biçimde belgelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, raporda kapsanan zaman dilimi, geçmiş yıllarla karşılaştırmalar, hedeflere yönelik ilerlemeler ve mevcut belirsizliklerin nedenleri de yer almalıdır. Güvenilirliğin artırılması için raporların bağımsız üçüncü taraflarca doğrulanması önerilmektedir (GHG Protocol, 2004, s. 47).

Doğrulama süreci, kurum içi denetimler yoluyla **iç doğrulama** ya da bağımsız kuruluşlarca gerçekleştirilen **üçüncü taraf doğrulaması** şeklinde yürütülebilmektedir. Her iki durumda da amaç, sera gazı envanterinin uluslararası standartlara uygun, tutarlı ve doğru bir biçimde hazırlanıp hazırlanmadığını değerlendirmektir. Doğrulama; hedef ve kapsamın belirlenmesi, veri ve hesaplamaların gözden geçirilmesi, risk değerlendirmesi, saha ziyaretleri ve raporlama aşamalarını içermektedir. Sürecin sonunda, doğrulamayı yapan otorite tarafından bir **doğrulama beyanı** yayımlanır. Bu beyan; doğrulamanın kapsamını, güven düzeyini, tespit edilen tutarsızlıkları ve iyileştirmeye yönelik önerileri içermektedir (GHG Protocol, 2004, s. 70-73) [14].

Tablo 3: GHG Protokolüne Göre Scope 3 Emisyon Kategorileri (GHG Protokolü, 2011, s. 32)

Kapsam	Kategori ve Açıklama
Kapsam 1	Yerinde yanma ve araçlarda yakıtın yanmasından kaynaklanan doğrudan emisyonlar
Kapsam 2	Satın alınan enerjiden kaynaklanan dolaylı emisyonlar
Kapsam 3	3.1 - Satın Alınan Mal ve Hizmetler 3.2 - Sermaye Malları 3.3 - Kapsam 1 veya Kapsam 2'ye Dahil Edilmeyen Yakıt ve Enerji ile İlgili Faaliyetler 3.4 - Yukarı Akım Taşımacılığı ve Dağıtım 3.5 - Operasyonlarda Oluşan Atıklar 3.6 - İş Seyahati 3.7 - Çalışan Taşımacılığı 3.8 - Upstream Kiralanan Varlıklar 3.9 - Aşağı Akım Taşımacılık ve Dağıtım 3.1 - Satılan Ürünlerin İşlenmesi 3.11 - Satılan Ürünlerin Kullanımı 3.12 - Satılan Ürünlerin Kullanım Ömrü Sonu İşlemleri 3.13 - Downstream Kiralanan Varlıklar 3.14 - Franchise'lar 3.15 - Yatırımlar

2.3.8 TS EN ISO 14064-1 Standardı



ISO 14064 standardı, organizasyon düzeyinde sera gazı (GHG) emisyonları ve giderimlerinin izlenmesi, ölçülmesi ve raporlanmasına yönelik üç ayrı fakat birbiriyle ilişkili bölümden oluşmaktadır. Ayrıca, sera gazı beyanlarının doğrulanması ve geçerliliğinin sağlanması için yöntemsel çerçeve sunmaktadır. Bu çalışmanın odağını **ISO 14064-1** oluşturmaktadır. Söz konusu bölüm, kurumların sera gazı envanterlerini geliştirmeleri, operasyonel sınırlarını belirlemeleri ve kurumsal karbon ayak izi hesaplamalarını yapmaları için ilkeler ve gereklilikler ortaya koymaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 8-9).

ISO 14064-1, sera gazı envanterlerinin hazırlanmasında **şeffaflık, doğruluk, kapsamlılık ve tutarlılık** ilkelerinin benimsenmesini zorunlu kılar. Bu kapsamda, sera gazı emisyon kaynakları ve giderimlerinin yanı sıra kullanılan metodolojilerin ve verilerin de raporun hedef kitlesinin ihtiyaçlarına uygun şekilde sunulması gerekmektedir. Ayrıca, tüm sera gazı yutaklarının ve depolarının (sinks and reservoirs, SSRs) envantere dahil edilmesi, standardın temel ilkeleri arasında yer almaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 14-15).

Standart, organizasyonel sınırların net biçimde tanımlanmasını zorunlu tutmaktadır. Bu sınırlar, **Kontrol Yaklaşımı** ve **Sermaye Payı Yaklaşımı** olmak üzere iki yöntemle belirlenmektedir. Kontrol yaklaşımında, kurumun finansal veya operasyonel kontrolü altındaki tüm faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonları ve giderimleri tamamen kurumun sorumluluğu altındadır. Sermaye payı yaklaşımında ise emisyonlar ve giderimler, kurumun ilgili faaliyetlerdeki ekonomik sahiplik oranına göre muhasebeleştirilmektedir (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 15).

Bunun yanı sıra, **raporlama sınırlarının** da belirlenmesi gerekmektedir. Raporlama sınırları çerçevesinde doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonları ile giderimler tanımlanmakta ve hesaplanmaktadır. ISO 14064-1'e göre **doğrudan emisyonlar**, organizasyonun sahip olduğu veya kontrol ettiği operasyonlardan kaynaklanmakta olup, her bir sera gazının ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. GHG Protokolü'nde kapsanan altı sera gazına ek olarak, ISO 14064-1 standardı **azot triflorür (NF₃)** gazını da kapsamaktadır. **Dolaylı emisyonlar** ise organizasyonun doğrudan kontrolü dışında gerçekleşen faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 15-16).

Kuruluşlar, raporlama sınırları dahilinde hangi dolaylı emisyonların dikkate alındığını ve bunların seçim kriterlerini açıkça belirtmek zorundadır. Seçim, genellikle emisyon kaynaklarının göreceli önemine göre yapılmakta; önemli görülen emisyon kaynaklarının tamamının belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Hariç tutulan emisyon kaynaklarının gerekçelendirilmesi zorunludur. ISO 14064-1, kurumların emisyonlarını **altı kategori** altında sınıflandırmaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 16).

Emisyonların ve giderimlerin hesaplanması aşamasında, raporlama sınırları içindeki tüm kaynaklar ve yutakların belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılan metodolojilerin doğruluk ve tutarlılığı sağlaması, sonuçların tekrarlanabilir olması ve süreç boyunca maliyet-etkinlik ile teknik uygulanabilirliğin gözetilmesi önemlidir. Emisyon faktörleri ve faaliyet verileri seçilirken güncel, bilimsel olarak güvenilir ve uluslararası kabul görmüş kaynaklara dayanılması gerekmektedir. Belirsizliklerin en aza indirilmesi ve sürecin her aşamasının belgelenmesi de zorunlu tutulmaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 16-19).

Karşılaştırılabilirliğin sağlanması amacıyla, hesaplamalarda bir **temel yıl (base year)** belirlenmelidir. Temel yıl seçilirken kapsanan dönem, seçim kriterleri ve kullanılan metodolojiler açık biçimde gerekçelendirilmelidir. Ayrıca, hesaplama yöntemlerinde, emisyon faktörlerinde veya organizasyonel/raporlama sınırlarında meydana gelen önemli değişiklikler durumunda temel yılın gözden geçirilmesi gerekmektedir (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 18).

Envanterin güvenilirliğini ve sürekliliğini sağlamak için kurumların sera gazı verilerini düzenli biçimde yönetmeleri gerekmektedir. Bu süreç, envanterin kalitesinin korunmasına, sınırlılık ve belirsizliklerin tanımlanmasına ve zaman içerisinde tutarlılığın sağlanmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca, kurum sınırları, emisyon kaynakları ve yutakları, kullanılan hesaplama yöntemleri ve veri toplama süreçlerinin periyodik olarak gözden geçirilmesini de içermektedir (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 20).

ISO 14064-1, sera gazı envanteri raporlarında bulunması gereken zorunlu unsurları da tanımlamaktadır. Bunlar arasında raporlayan kuruluşun kimliği, rapordan sorumlu kişi, kapsanan dönem, organizasyonel ve raporlama sınırlarının belgelenmesi, emisyonların önemlilik kriterleri ve her bir sera gazı için ayrı ayrı **CO₂ eşdeğeri (CO₂e)** cinsinden hesaplanmış doğrudan emisyon ve giderimler yer almaktadır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 22).

Dolaylı emisyonların ise standartta belirtilen kategoriler çerçevesinde raporlanması gerekmektedir. Envanterlerin gelecekte karşılaştırılabilmesi için raporlarda temel yılın, kullanılan metodolojilerin, emisyon faktörlerinin ve veritabanlarının belirtilmesi zorunludur. Tüm belirsizlikler, hariç tutulan emisyonlar ve yutaklar gerekçelendirilmelidir. Ayrıca, raporlarda hassasiyet analizine yer verilmesi, doğrulama türünün açıklanması ve standarda uygunluğun belirtilmesi gerekmektedir (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 22).

Bunun yanında, rapor içeriğine isteğe bağlı unsurlar da eklenebilmektedir. Örneğin, kurumun emisyon denkleştirme projeleri veya karbon kredileri gibi sözleşmesel araçları mevcut ise, bunların sera gazı envanterine katkısı açıklanmalı ve ilgili sera gazı mekanizması çerçevesinde raporlanmalıdır (SFS-EN ISO 14064-1: 2019, s. 23) [11].

Tablo 4: .ISO 14064-1 (TS-EN ISO 14064-1:2019) standardına göre sera gazı emisyon kategorileri .



Referanslar

- [1] B. Dincer, 'Kapsam 1 Ve Kapsam 2 Sera Gazı Emisyonları Ölçümlemesinin IFRS S2 Kapsamında Değerlendirilmesi', *İktisat İşletme ve Uluslararası İlişkiler Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 136–154, Jul. 2024, doi: 10.58654/jebi.1478784.
- [2] T. Stridsland, A. Stounbjerg, and H. Sanderson, 'A hybrid approach to a more complete emissions inventory: a case study of Aarhus University', *Carbon Manag*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.1080/17583004.2023.2275579.
- [3] J. Xu and K. MacAskill, 'Carbon data and its requirements in infrastructure-related GHG standards', Dec. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.envsci.2024.103935.
- [4] R. Önder SÜRMELİ, Ç. Mühendisliği, M. ve Tasarım Fakültesi, and B. Üniversitesi, 'KARBON NÖTR GELECEĞE DOĞRU: AKILLI SİSTEMLERİN ENTEGRE UYGULAMALARIYLA KARBON AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ', *JOSS Journal of Smart Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 55–73, 2025.
- [6] 'REPORTING OF GREENHOUSE GAS EMISSION IS A CHOICE OR OBLIGATION? A THEORITICAL DISCUSSION'.
- [7] E. S. KURT and H. CAVLAK, 'KURUMSAL RAPORLAMA EKOSİSTEMİ: UNSURLAR, DÜZENLEMELER VE ÖNGÖRÜLER', *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, vol. 24, no. MODAVICA Özel Sayısı, pp. 298–330, Jun. 2022, doi: 10.31460/mbdd.1067737.
- [8] P. Kocabey Çiftçi and E. Özceylan, 'A practical framework for corporate carbon footprint analysis: a case of emission sources, data collection, and calculations, in carpet industry', *Clim Change*, vol. 178, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.1007/s10584-025-03981-w.

- [9] G. ÇOLAK and B. ATILGAN TÜRKMEN, 'Kurumsal Karbon Ayak İzi Analizi: Bir Kimya Fabrikası için Örnek Hesaplama', *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, vol. 9, no. 1, pp. 191–201, Jan. 2023, doi: 10.21324/dacd.1120858.
- [10] Y. ŞEKER and O. Y. ATASEL, 'FİRMALARIN ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLERİ VE KURUMSAL YÖNETİM DERECELENDİRME NOTU: BİST KURUMSAL YÖNETİM ENDEKSİ'NDE BİR ARAŞTIRMA', *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, no. 39, pp. 722–761, Dec. 2021, doi: 10.14520/adyusbd.1009409.
- [11] 'Türk Standardı', 2022. [Online]. Available: www.tse.org.tr
- [12] Y. Döngüsü, A. (Yda, and) Rehberi, 'Türkiye'nin Döngüsel Ekonomiye Geçiş Potansiyelinin Değerlendirilmesi için Teknik Destek Projesi Sözleşme No EuropeAid/140562/IH/SER/TR Faaliyet 2.4-Döngüsel ekonomide izlemeyi desteklemek için yaşam döngüsü değerlendirmesi eğitimi'.
- [13] 'TEKSTİL ENDÜSTRİSİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN İKLİM DEĞİŞİKLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ YÜKSEK LGSANS TEZĞ'.
- [14] W. K. Fong, 'Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC)'. [Online]. Available: www.ghgprotocol.org/city-accounting

2.4 Yeşille Aklama (Greenwashing)

2.4.1 Giriş

Yeşille aklama (greenwashing), çevresel sürdürülebilirlik söylemlerinin kurumsal stratejilerde giderek daha fazla yer bulmasıyla birlikte hem akademik literatürde hem de uygulamada tartışılan kritik bir olgu haline gelmiştir. Kavram, şirketlerin çevresel performansını olduğundan daha iyi göstermek veya çevreye duyarlılığı abartmak amacıyla yanıltıcı beyanlarda bulunması olarak tanımlanmaktadır (Aggarwal & Kadyan, 2011). Bu durum, kurumsal iletişim stratejilerinin en tartışmalı unsurlarından biri olarak görülmekte ve paydaş güveni üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır (Gatti, Conti & Seele, 2023). Yeşille aklama yalnızca etik bir sorun değil; aynı zamanda bilgi asimetrisi, piyasa şeffaflığı ve düzenleyici uyum açısından çok boyutlu bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir (Feghali, Najem & Metcalfe, 2025).

Yeşille aklama, şirketlerin gerçek çevresel performansını olduğundan daha iyi göstererek yatırımcılar, tüketiciler ve diğer paydaşlar için yanlış bir bilgi seti oluşturmalarına neden olur. Bu durumda, paydaşlar kararlarını eksik veya yanıltıcı bilgilere dayanarak verirler. Örneğin, yatırımcılar "yeşil" olduğunu düşündükleri bir şirkete sermaye aktarırken, aslında çevresel etkisi yüksek bir faaliyet zincirine kaynak sağlamış olabilir. Bu durum, piyasada asimetric bilgi sorununa yol açar (ESMA, 2024; Bhullar et al., 2025). Asimetric bilgi, bir işlem ya da ilişki sırasında taraflar arasında bilgi eşitsizliğinin bulunmasıdır. Örneğin, bir şirketin çevresel performansı hakkında gerçeği yalnızca şirketin bilmesi, ancak yatırımcıların ve tüketicilerin bu bilgiyi doğrulayamaması durumunda ortaya çıkar. Bu eşitsizlik, yanlış kararlar verilmesine, risklerin gizlenmesine ve piyasanın etkin çalışmamasına yol açar.

Finansal piyasalarda güvenin temel unsuru şeffaflıktır. Yanıltıcı yeşil beyanlar, piyasa aktörlerinin gerçek çevresel riskleri doğru analiz edememesine neden olur. Bu da, hem yatırım tahsisinde hatalara hem de "lemon market" etkisi olarak bilinen olguya yol açar: iyi performans gösteren firmalar ile kötü performans gösterenler aynı kategoride algılandığı için, yüksek performanslı firmaların piyasadaki avantajı azalır (Cheng & Yan, 2025; Rasche, 2025).

Bilgi asimetrisi bağlamında literatürde sıklıkla vurgulanan "lemon market etkisi", George Akerlof'un (1970) çalışmalarına dayanan bir piyasa başarısızlığı örneğidir. Bu etki, alıcıların kaliteyi tam olarak değerlendiremediği ve satıcıların ürün veya hizmete dair daha fazla bilgiye sahip olduğu durumlarda ortaya çıkar. Böyle bir ortamda, alıcılar ortalama kaliteye göre fiyat belirlerken, yüksek kaliteli ürün veya hizmet sunan aktörler piyasadan çekilme eğilimi gösterir. Sonuç olarak, piyasada düşük kaliteli ürünler veya yanıltıcı beyanlar baskın hale gelir (Akerlof, 1970). Yeşille aklama bağlamında, gerçekten sürdürülebilir faaliyetler yürüten firmalar ile yalnızca yeşil imaj yaratmaya çalışan firmaların aynı kategoride algılanması, yatırımcıların ve tüketicilerin doğru karar almasını güçleştirmektedir. Bu durum, sürdürülebilir finans piyasalarında güven sorunlarına, şeffaflığın azalmasına ve yeşille aklamanın kurumsallaşmasına yol açabilmektedir (ESMA, 2024; Rasche, 2025).

Yeşille aklama, sürdürülebilirlik beyanlarının doğrulanması ve raporlama standartlarının uygulanması konularında düzenleyici kurumların iş yükünü artırır. Eksik veya hatalı beyanlar, AB'nin Green Claims Directive veya Türkiye'de geliştirilen TSRS (Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları) gibi regülasyonların etkinliğini zayıflatabilir. Bu durum, politika hedefleri ile piyasa davranışları arasında uyum sorunları yaratır (Spaniol et al., 2024; ESMA, 2024).

Son yıllarda kavram, farklı disiplinlerde çeşitli biçimlerde ele alınmış; pazarlama, kurumsal sosyal sorumluluk (CSR), finansal raporlama ve sürdürülebilirlik yönetimi literatüründe merkezi bir araştırma alanı haline gelmiştir (de Freitas Netto et al., 2020). Özellikle ESG raporlamasının kurumsal sürdürülebilirlik performansının temel göstergelerinden biri olarak önem kazanması, yeşille aklama riskini daha görünür kılmıştır (Bhullar et al., 2025). Bu bağlamda, ESG beyanlarının kalitesindeki zayıflıklar, yatırımcı güveninde erozyona ve finansal piyasalarda "lemon market" etkisi olarak bilinen bilgi asimetrisine yol açabilmektedir (Cheng & Yan, 2025; ESMA, 2024). Yanıltıcı sürdürülebilirlik iddiaları, sermaye tahsisini bozarak sürdürülebilir finansın güvenilirliğini tehdit etmektedir (ESMA, 2024).

Yeşille aklamanın ortaya çıkışında paydaş baskıları, düzenleyici zorluklar, finansal teşvikler ve kurumsal meşruiyet arayışı gibi faktörler kritik rol oynamaktadır (Fang, Wang & Zhao, 2025; Zhang et al., 2025). Araştırmalar, bu olgunun yalnızca mikro düzeyde kurumsal kararlarla sınırlı olmadığını, aynı zamanda sosyo-kültürel ve jeopolitik bağlamlarda şekillendiğini göstermektedir (Feghali et al., 2025). Bununla birlikte, kavramın tanımlanmasına yönelik literatürde bir konsensüs bulunmaması, düzenleyici çerçevelerin zayıf kalmasına ve uygulama boşluklarının devam etmesine yol açmaktadır (Spaniol et al., 2024). Avrupa Komisyonu'nun 2024 yılında yayımladığı raporda, incelenen çevresel iddiaların %53'ünün yanıltıcı olduğu belirlenmiş; küresel ölçekte yeşille aklama vakalarının 2019–2023 döneminde arttığı, ancak AB'de düzenleyici baskının artmasıyla 2023–2024 arasında sınırlı bir düşüş yaşandığı rapor edilmiştir (Rasche, 2025).

Günümüzde yeşille aklama yalnızca şirketlerin itibarını değil, aynı zamanda sermaye piyasalarının işleyişini, tüketici davranışlarını ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerini de etkileyen çok boyutlu bir sorun olarak görülmektedir. Bu nedenle, kavramın tarihsel gelişimi, teorik temelleri, farklı sektörlerdeki yansımaları ve düzenleyici çerçeveler bağlamında kapsamlı bir analiz gerekmektedir.

2.4.2 Yeşille Aklama Kavramının Teorik Temelleri

2.4.2.1 Kavramsal Çerçeve ve Tanımlar

Yeşille aklama (greenwashing), literatürde farklı disiplinlerde ele alınmış, zaman içinde gelişen ve çeşitlenen bir kavramdır. Genel olarak, yeşille aklama; bir şirketin, ürünün veya hizmetin çevresel performansını olduğundan daha iyi göstermek için bilinçli olarak yanıltıcı bilgi sunması veya eksik bilgi paylaşması olarak tanımlanmaktadır (Aggarwal & Kadyan, 2011; de Freitas Netto et al., 2020). TerraChoice'ın (2009) tanımı, kavramın pratikte nasıl

ortaya çıktığını açıklayan çerçevelerden biridir ve bu çerçeve "yanıltıcı iddialar, belirsiz ifadeler, sahte etiketler ve doğrulanamaz bilgiler" gibi unsurları kapsar.

Yeşille aklamamanın kavramsal temeli, çift yönlü bir uyumsuzluk üzerinden şekillenmektedir: şirketlerin kamuya yönelik beyanları (talk) ile gerçekte uyguladıkları politikalar (action) arasındaki fark. Bu durum literatürde decoupling (söylem-eylem ayrışması) olarak tanımlanmış ve kurumsal ikiyüzlülük (organizational hypocrisy) kavramı ile ilişkilendirilmiştir (Brunsson, 1993; Meyer & Rowan, 1977; Forliano, 2025). Lyon ve Maxwell (2011) yeşille aklamayı, şirketlerin çevre dostu uygulamalara yönelik beyanlarını artırırken somut çevresel yatırımları sınırlı tutma stratejisi olarak açıklamaktadır.

Yeşille aklamaya ilişkin tanımlar arasında iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır. Birinci yaklaşım, yeşille aklamayı yalnızca kasıtlı yanıltma stratejisi olarak konumlandırırken; ikinci yaklaşım, kavramı bilgi eksikliği, koordinasyon sorunları veya düzenleyici belirsizlikler nedeniyle ortaya çıkan istemsiz davranışları da kapsayacak şekilde genişletmektedir (Spaniol et al., 2024; Feghali et al., 2025). Bu çerçevede, Spaniol ve çalışma arkadaşları (2024), kavramı doğru şekilde tanımlamanın önemini vurgulamakta ve tanım kargaşasının düzenleyici çerçevelerin etkinliğini zayıflattığını belirtmektedir.

Yeşille aklama kavramına ilişkin son dönem yaklaşımlar, olgunun yalnızca yanlış veya yanıltıcı beyanlardan ibaret olmadığını, aynı zamanda bilgi yönetimi ve iletişim etiği bağlamında daha geniş bir boyuta sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu perspektife göre, yeşille aklama üç temel kategoriye ayrılmaktadır (Gatti, Conti & Seele, 2023):

- **Bilgi bozulması (distortion):** Yanlış veya gerçeğe aykırı bilgi sunulması.
- **Bilgi eksikliği (omission):** Doğru ancak yetersiz bilginin verilmesi, kritik unsurların bilinçli olarak dışarıda bırakılması.
- **Bilgi kirliliği (pollution):** Doğru bilgilerin, aşırı detay veya karmaşık veri yüklemesi yoluyla algısal manipülasyon yaratacak şekilde sunulması.

Bu yaklaşım, yeşille aklamamanın geleneksel tanımlarını genişleterek, fenomenin yalnızca içerik değil, aynı zamanda algısal ve bilişsel etkileri bakımından da incelenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Böylelikle, kavram, bilgi asimetrisi ve şeffaflık sorunlarının yanı sıra, bilgi tasarımının stratejik kullanımını da kapsayan çok boyutlu bir çerçevede değerlendirilmektedir.

Yeşille aklama yalnızca pazarlama iletişimi düzeyinde değil, ESG raporlaması, kurumsal sosyal sorumluluk (CSR) uygulamaları ve yeşil finansman politikaları bağlamında da incelenmektedir (Bhullar et al., 2025; Zhang et al., 2025). Bu nedenle, kavramın çok katmanlı bir yapıya sahip olduğu ve hem mikro düzeyde (firma davranışı) hem makro düzeyde (düzenleyici ve piyasa dinamikleri) analiz edilmesi gerektiği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır (Cheng & Yan, 2025; ESMA, 2024).

2.4.2.2 Yeşille Aklamamanın Nedenleri

Yeşille aklama olgusunun ortaya çıkmasında birden fazla içsel ve dışsal faktör etkili olmaktadır. Literatürde bu nedenler genellikle meşruiyet arayışı, rekabet baskısı, düzenleyici boşluklar, finansal teşvikler ve bilgi asimetrisi çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu unsurlar, işletmelerin çevresel sorumluluk algısının güçlenmesine paralel olarak artan paydaş beklentileri ile kurumsal kapasite arasındaki boşluktan kaynaklanmaktadır (Brunsson, 1993; Meyer & Rowan, 1977; Forliano, 2025).

2.4.2.3 Meşruiyet Arayışı ve Kurumsal Baskılar

Meşruiyet teorisi, örgütlerin toplumsal kabul ve onay kazanmak için belirli normlara ve değerlere uyum sağlama eğiliminde olduğunu ileri sürmektedir (Meyer & Rowan, 1977). Bu bağlamda, şirketler paydaşların artan sürdürülebilirlik taleplerine yanıt vermek için çevre dostu beyanlarda bulunabilir; ancak, maliyet ve operasyonel kısıtlar nedeniyle bu beyanlar çoğu zaman sembolik düzeyde kalabilmektedir. Bu durum, literatürde "decoupling" veya "kurumsal ikiyüzlülük" olarak tanımlanan söylem-eylem ayrışmasının tipik bir örneğidir (Brunsson, 1993; Forliano, 2025). Böylece, yeşille aklama bir iletişim stratejisinden öte, kurumsal hayatta kalma ve meşruiyet aracı haline gelmektedir (Spaniol et al., 2024).

2.4.2.4 Rekabet Avantajı ve İmaj Yönetimi

Yeşille aklamanın bir diğer itici gücü, yeşil imajın rekabet avantajı yaratmasıdır. Çevreye duyarlı tüketici talebinin artması, şirketleri pazarlama kampanyalarında çevresel sorumluluğu ön plana çıkarmaya yöneltmektedir (Aggarwal & Kadyan, 2011; Meenakshi et al., 2025). Ancak bu durum, gerçek çevresel performansla desteklenmeyen iddiaların çoğalmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle konaklama, moda ve otomotiv gibi sektörlerde yapılan araştırmalar, şirketlerin sembolik eylemleriyle somut uygulamaları arasındaki farkın, marka imajını koruma motivasyonu ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Feghali et al., 2025).

2.4.2.5 Düzenleyici Belirsizlik ve Denetim Zafiyetleri

Yeşille aklama davranışını teşvik eden bir diğer unsur, düzenleyici çerçevelerdeki boşluklardır. Avrupa Birliği'nin Green Claims Directive gibi girişimlerine rağmen, çevresel beyanların doğruluğunu denetleyen mekanizmaların yetersizliği, bu davranışın yaygınlaşmasına neden olmaktadır (ESMA, 2024; Rasche, 2025). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde bağımsız doğrulama ve yaptırım mekanizmalarının sınırlı olması, şirketlere manipülatif raporlama için geniş bir alan bırakmaktadır (Spaniol et al., 2024).

2.4.2.6 Finansal Teşvikler ve Politika Yan Etkileri

Yeşil finansman araçları, şirketleri çevre dostu projelere yönlendirmeyi amaçlasa da, denetim zayıflıkları bu politikaların beklenmedik yan etkilerine yol açabilmektedir. Çin'de yapılan ampirik çalışmalar, yeşil kredi ve tahvil gibi finansman mekanizmalarının, uygunluk kriterlerinin yüzeysel olarak yerine getirilmesi için sembolik uygulamaları artırdığını göstermektedir (Zhang et al., 2025). Benzer şekilde, sıkı çevre düzenlemelerinin yarattığı maliyet baskısı, şirketleri düşük maliyetli ve görünürde "yeşil" çözümlere yöneltmektedir (Fang et al., 2025).

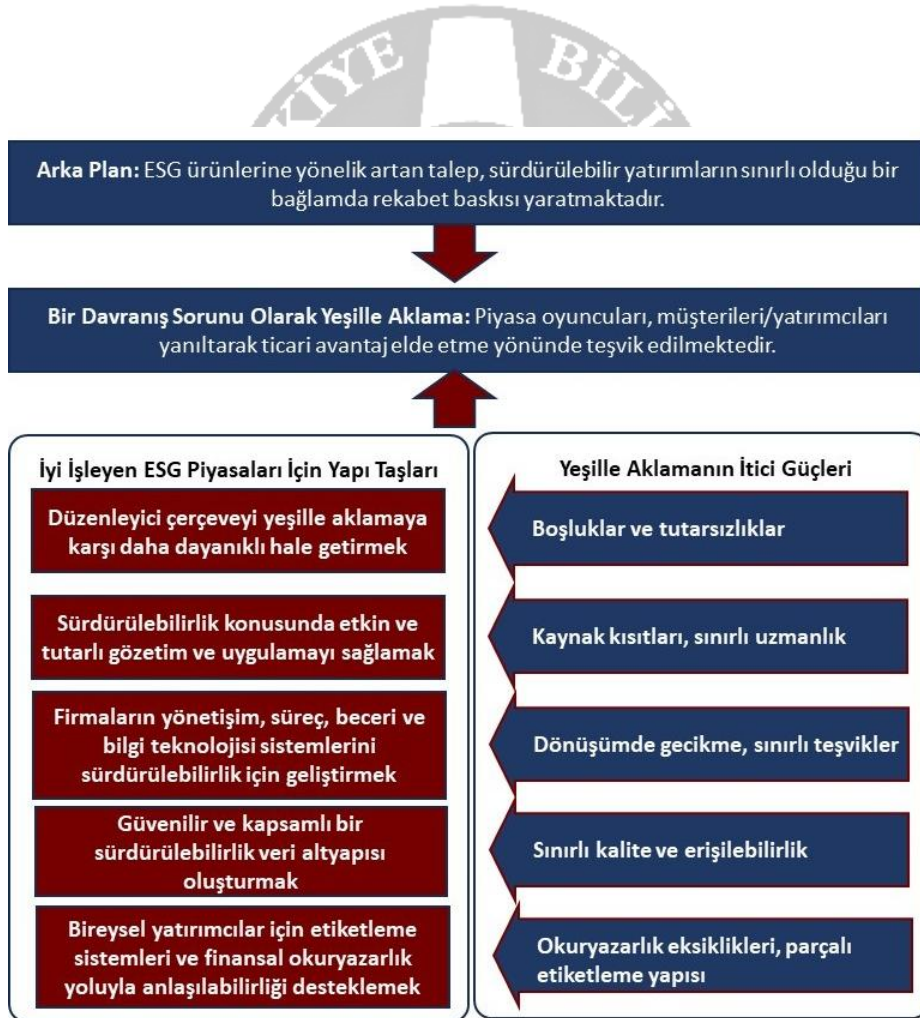
2.4.2.7 Bilgi Asimetrisi ve Piyasa Dinamikleri

Yeşille aklama davranışının arkasındaki en önemli yapısal faktörlerden biri, bilgi asimetrisidir. Çevresel performansa ilişkin doğrulanabilir bilgi eksikliği, şirketlerin seçici raporlama ve abartılı beyanlarla piyasa algısını yönetmesine olanak tanımaktadır (Cheng & Yan, 2025; ESMA, 2024). Bu durum, sürdürülebilirlik piyasasında "lemon market etkisi" olarak bilinen bir bozulma riskini doğurur; yani, gerçekten çevreci olan şirketlerle yalnızca görünürde yeşil olan şirketler arasındaki fark, yatırımcılar tarafından ayırt edilemediğinde, piyasa güvenilirliğini kaybeder (Rasche, 2025).

2.4.2.8 İçsel Kapasite Eksiklikleri

Son olarak, bazı şirketlerde yeşille aklama, bilinçli bir yanıltma stratejisinden ziyade, içsel kaynak yetersizlikleri ve departmanlar arası koordinasyon sorunlarından kaynaklanabilmektedir (Feghali et al., 2025; Spaniol et al., 2024). Bu tür istemsiz yeşille aklama (inadvertent greenwashing) vakaları, özellikle karmaşık tedarik zincirlerinde ve çok uluslu yapılarda yaygındır.

Yeşille aklamanın bazı itici güçleri **Şekil 2**'de verilmektedir. **Şekil 2**, yeşille aklama risklerinin arkasındaki çok boyutlu dinamikleri ve bu risklerin azaltılmasına yönelik temel yapı taşlarını bütüncül bir çerçevede sunmaktadır. ESG ürünlerine yönelik artan talep ve sürdürülebilir yatırımların sınırlılığı, piyasada yoğun bir rekabet baskısı yaratarak firmaları kısa vadeli avantajlar için yanıltıcı iletişim stratejilerine yönlendirmektedir. Bu davranışsal eğilim, düzenleyici boşluklar, kaynak ve uzmanlık eksiklikleri, dönüşümde gecikmeler ve bilgi altyapısındaki yetersizlikler tarafından pekiştirilmektedir. Ayrıca, parçalı etiketleme standartları ve finansal okuryazarlık eksiklikleri, yatırımcıların yanıltıcı iddialara karşı kırılganlığını artırmaktadır. Bu bağlamda, düzenleyici çerçevenin güçlendirilmesi, denetim ve şeffaflığın artırılması, kurumsal yönetim ve veri altyapısının geliştirilmesi ile piyasa aktörlerinin bilinçlendirilmesi, yeşille aklamanın önlenmesine yönelik kritik yapı taşları olarak öne çıkmaktadır (ESMA, 2024).



Şekil 2. Yeşille Aklamanın Bazı İtici Güçleri (ESMA, 2024)

Şekil 3, yeşille aklama olgusunu iş modeli perspektifinden ele alarak bu davranışın hangi bileşenlerde ortaya çıktığını göstermektedir. Pedersen ve Andersen (2023), iş modeli yapı taşlarını değer önermesi, iş dönüşüm sistemi, müşteri arayüzü ve finans & muhasebe sistemi olarak sınıflandırmakta ve bu yapıların pazar dışı paydaş ortamı ile nasıl etkileşime girdiğini vurgulamaktadır. Değer önermesi düzeyinde, şirketlerin paydaşlara sunduğu sürdürülebilirlik taahhütleri ile operasyonel uygulamaları arasındaki tutarsızlık dikkat çekmektedir. Örneğin, şirketler çevreye duyarlı olduklarını iddia ederken, gerçekte temel faaliyetlerinde kayda değer bir dönüşüm gerçekleştirmemektedir. Bu durum, literatürde "decoupling" (söylem-eylem ayrışması) olarak tanımlanan fenomenin tipik bir örneğidir (Forlano, 2025).

İş dönüşüm sisteminde, hammaddelerin sürdürülebilirliği konusunda yanlış iddialar, çekirdek faaliyetlerden bağımsız projelerin ön plana çıkarılması ve tedarik zincirine ilişkin bilgilerin gizlenmesi tipik yeşille aklama örnekleridir. Müşteri arayüzünde ise, yeşil segmentleri hedefleyen yanıltıcı etiketleme, çevresel etkilerin değerlendirilmesini zorlaştıran bilgi tasarımı ve müşterileri maliyetli ilişkilere yönlendiren stratejiler öne çıkmaktadır. Ayrıca, finans ve muhasebe sisteminde çevresel etkilerin raporlardan bilinçli olarak çıkarılması ve performans değişikliği olmaksızın sertifikasyon süreçlerine katılım, yeşille aklamanın raporlama ve meşruiyet boyutunu yansıtmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, yeşille aklamanın yalnızca iletişim değil, iş modeli düzeyinde sistemik bir sorun olduğuna işaret etmektedir (Pedersen & Andersen, 2023).



İş Modeli Perspektifinden Yeşille Aklama



Yeşille Aklama Örnekleri:

- 1- Şirket, kullanılan malzemelerin sürdürülebilir olduğu yönünde yanlış beyanlarda bulunur.
- 2- Şirket, ana faaliyetlerinden bağımsız, çevresel açıdan marjinal projeleri ön plana çıkarır.
- 3- Şirket, tedarik zincirindeki sürdürülebilirlik performansı hakkında bilgiyi bilinçli olarak gizler.

- 4- Şirket, yanıltıcı iddialar ve etiketlerle yeşil segmentleri hedefler.
- 5- Şirket, ürün ve hizmetlerin çevresel ayak izini müşterilerin değerlendirmesini zorlaştırır.
- 6- Şirket, sürdürülebilirlik iddiasında bulunurken müşterileri maliyetli ilişkiler içine (ör. sık güncellemeler ve yeniden satın alma) sokar.

- 7- Şirket, sürdürülebilirlik raporlamasında önemli çevresel etkileri bilinçli olarak görmezden gelir.
- 8- Şirket, performansını değiştirmeden sürdürülebilirlik sertifikalarına ve etiketlerine abone olur.

Şekil 3. İş Modeli Perspektifinden Yeşille Aklama (Pedersen ve Andersen, 2023)

2.4.3 Tarihsel Arka Plan ve Kavramın Evrimi

Yeşille aklama kavramı, ilk kez 1986 yılında Jay Westerveld tarafından, otellerin havlu yeniden kullanım kampanyalarını çevresel kaygılardan ziyade maliyet düşürme amacıyla uyguladığını belirten eleştirilerle literatüre girmiştir (Gatti, Conti & Seele, 2023; Rasche, 2025). Bu bağlamda kavram, başlangıçta yanıltıcı çevre dostu söylemler ile sınırlı bir iletişim problemi olarak görülmüştür.

1990'lı yıllarda ise kavram, büyük çevresel felaketler (örneğin Exxon Valdez petrol sızıntısı ve Bhopal felaketi) sonrasında, şirketlerin imaj yönetimi stratejileri bağlamında tartışılmaya başlanmıştır (Aggarwal & Kadyan, 2011). 1990'lı yıllarda yeşille aklama kavramının anlamı genişleyerek, çevresel felaketlerin yarattığı kamuoyu baskısı

sonucu şirketlerin itibar yönetimi stratejileriyle ilişkilendirilmeye başlanmıştır. Özellikle Bhopal felaketi (1984) ve Exxon Valdez petrol sızıntısı (1989) gibi büyük çevresel krizler, şirketlerin çevresel sorumluluklarının daha yoğun biçimde sorgulanmasına yol açmış, bu durum kurumsal düzeyde "yeşil" imaj oluşturma çabalarını hızlandırmıştır (Aggarwal & Kadyan, 2011). Bu dönemde, pek çok büyük ölçekli işletme çevre dostu reklam kampanyaları, sponsorluk faaliyetleri ve sürdürülebilirlik raporlarıyla kendilerini sorumlu bir aktör olarak konumlandırmaya çalışmıştır. Ancak bu girişimler, çoğunlukla temel operasyonel süreçlerde kayda değer bir dönüşüm olmadan yürütüldüğünden, aktivistler ve medya tarafından "kozmetik" uygulamalar olarak eleştirilmiş ve yeşille aklamanın kurumsal itibar yönetimiyle bağlantılı bir stratejik davranış biçimi olduğu yönündeki tartışmalar akademik literatürde yaygınlık kazanmıştır (Forliano, 2025; Gatti, Conti & Seele, 2023).

1990'lı yıllarda, çevresel felaketlerin ardından artan kamuoyu baskısı ve kurumsal çevre politikalarına yönelik eleştiriler, yeşille aklamanın akademik ve aktivist literatürde tartışılmasını hızlandırmıştır. Bu dönemde yayımlanan "Greenwash: The Reality Behind Corporate Environmentalism" (Greer & Bruno, 1996) adlı çalışma, şirketlerin çevresel sorumluluk söylemlerinin gerçekteki operasyonel uygulamalarla ne ölçüde örtüştüğünü sorgulayarak kavramın meşruiyet boyutuna dikkat çekmiştir. Çalışma, özellikle enerji, kimya ve otomotiv gibi yüksek çevresel etkiye sahip sektörlerde, kurumsal iletişim stratejilerinin çevre dostu bir imaj yaratmada nasıl araçsallaştırıldığını ortaya koymuştur. Bu eleştiriler, yeşille aklamanın yalnızca tüketiciyi yanıltan bir pazarlama taktiği değil, aynı zamanda kurumsal sosyal sorumluluk (CSR) söyleminin altında yatan stratejik bir yönetim pratiği olabileceğini ortaya koyarak, kavramın daha geniş bir teorik çerçevede ele alınmasına zemin hazırlamıştır (Greer & Bruno, 1996; Aggarwal & Kadyan, 2011; Forliano, 2025).

2000'li yıllarla birlikte, kurumsal sosyal sorumluluk (CSR) ve sürdürülebilirlik raporlamasının yaygınlaşması, yeşille aklama riskini artırmıştır (de Freitas Netto et al., 2020). Şirketler, çevresel duyarlılığı marka değerine entegre etmeye çalışırken, bu söylemlerin gerisinde kalan operasyonel uygulamalar, kavramın iletişimden yönetim düzeyine taşındığını göstermektedir (Forliano, 2025). Lyon ve Maxwell (2011) bu dönemde yeşille aklamayı, firmaların çevre dostu iddialarını artırırken gerçek çevresel yatırımlardan kaçınmalarını açıklayan stratejik bir araç olarak tanımlamıştır.

2010 sonrasında, ESG (Çevresel, Sosyal ve Yönetişim) kriterlerinin finansal piyasalarda belirleyici hale gelmesiyle kavram daha da karmaşık bir yapıya bürünmüştür. Avrupa Birliği'nin Sürdürülebilir Finans Taksonomisi, Green Bond Principles ve ABD'de SEC'in ESG açıklamalarıyla ilgili düzenlemeleri, yeşille aklamanın artık yalnızca etik bir sorun değil, aynı zamanda piyasa güvenliği ve düzenleyici uyum açısından kritik bir konu haline geldiğini göstermektedir (ESMA, 2024; Zhang et al., 2025). Bu süreçte, TerraChoice (2009) tarafından geliştirilen "Yeşille Aklamanın Yedi Günahı" çerçevesi, kavramın pratikteki görünümünü sınıflandırmak açısından önemli bir referans noktası olmuştur. Bu çerçeve, yanıltıcı çevresel beyanların yedi tipik kategorisini belirleyerek (i) gizli takas, (ii) kanıt eksikliği, (iii) belirsizlik, (iv) alakasızlık, (v) iki kötünün iyisi, (vi) sahte etiket kullanımı ve (vii) doğrudan yalan gibi unsurları sistematik biçimde açıklamaktadır. Modelin önemi, yeşille aklamanın yalnızca kavramsal olarak değil, operasyonel düzeyde ölçülebilir bir olgu olarak incelenmesine olanak tanımasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede, hem tüketici araştırmalarında hem de düzenleyici çerçevelerde, yanıltıcı yeşil iddiaların tanımlanması ve izlenmesi için standartlaştırılmış bir yaklaşım geliştirilmiştir (TerraChoice, 2009; de Freitas Netto et al., 2020).

Özet olarak, yeşille aklamanın tarihsel gelişimi, farklı dönemlerde öne çıkan dinamiklerle açıklanabilir. 1980'li yıllar, kavramın ilk kez gündeme geldiği ve otel sektöründeki havlu yeniden kullanım kampanyaları gibi örneklerin eleştirildiği dönem olmuştur (Gatti, Conti & Seele, 2023). 1990'lı yıllarda, Greer ve Bruno'nun çalışmalarıyla birlikte kavram, büyük çevresel felaketler sonrası kurumsal itibar yönetimi ve yapısal uyumsuzluk bağlamında tartışılmaya başlanmıştır. 2000'li yıllar, kurumsal sosyal sorumluluk (CSR) söyleminin ve sürdürülebilirlik raporlamasının kurumsallaşmasıyla, yeşille aklamanın pazarlama düzeyinden kurumsal yönetim boyutuna taşındığı bir

dönemdir. 2020'li yıllarda ise ESG standartlarının finansal piyasalar için merkezi hale gelmesi ve düzenleyici baskıların artması, yeşille aklamayı küresel düzeyde kritik bir piyasa riski haline getirmiştir. Bu dönemde, yapay zekâ tabanlı tespit yöntemleri ve dijital doğrulama araçlarının geliştirilmesi, yeşille aklamayla mücadelede öne çıkan yeni yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Gatti et al., 2023; ESMA, 2024).

Günümüzde yeşille aklama, farklı düzeylerde ve çeşitli biçimlerde incelenen, çok disiplinli bir araştırma alanına dönüşmüştür. Bu kapsamda kavram; pazarlama, tedarik zinciri yönetimi, yeşil finansman, ESG raporlaması ve dijital doğrulama teknolojileri gibi farklı alanlarda ele alınmakta; ayrıca greenhushing, greenrinsing ve socialwashing gibi yeni türevlerle genişleyen bir terminolojiye sahiptir (Feghali et al., 2025; Rasche, 2025). Bu evrimsel süreç, yeşille aklamanın yalnızca algısal bir strateji değil, kurumsal yapılar ve piyasa düzenlemeleriyle doğrudan ilişkili sistemik bir sorun olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.4.3.1 Teorik Yaklaşımlar

Yeşille aklama olgusunu anlamak için literatürde farklı teorik perspektifler geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, şirketlerin neden yanıltıcı çevresel beyanlarda bulunduğunu ve bu davranışın hangi koşullarda ortaya çıktığını açıklamaya yöneliktir. En yaygın kullanılan çerçeveler arasında Meşruiyet Teorisi, Paydaş Teorisi ve Sinyal Teorisi yer almakta olup, son yıllarda bu analizlere Evrimsel Oyun Teorisi de eklenmiştir. Bu teoriler, yeşille aklamanın hem normatif hem de stratejik doğasını farklı düzeylerde incelemektedir.

2.4.3.2 Meşruiyet Teorisi

Meşruiyet teorisi, örgütlerin sosyal onay kazanma ve varlığını sürdürme amacıyla toplumun norm ve değerlerine uyum sağlamaya çalıştığını savunur (Meyer & Rowan, 1977). Çevresel duyarlılığın artmasıyla birlikte sürdürülebilirlik, işletmeler için kurumsal meşruiyetin temel bir bileşeni haline gelmiştir. Ancak firmalar, maliyet ve operasyonel kısıtlar nedeniyle bu talepleri karşılayacak yapısal dönüşümleri gerçekleştiremediklerinde, sembolik uyum stratejilerine yönelmektedir. Bu durum, literatürde decoupling olarak tanımlanan söylem-eylem ayrışması ile açıklanmaktadır (Brunsson, 1993; Lyon & Maxwell, 2011). Dolayısıyla meşruiyet teorisi, yeşille aklamayı şirketlerin toplumsal beklentiler karşısında geliştirdiği hayatta kalma stratejisi olarak konumlandırmaktadır (Forlano, 2025).

2.4.3.3 Paydaş Teorisi

Paydaş teorisi, işletmelerin yalnızca hissedarlarına değil, tüm paydaşlara karşı sorumluluk taşıdığını ve bu paydaş gruplarının artan çevresel beklentilerinin, kurumsal stratejileri doğrudan etkilediğini belirtir (Freeman, 1984). Yatırımcıların, müşterilerin ve düzenleyicilerin giderek daha yüksek çevresel standartlar talep etmesi, şirketleri yeşil imaj oluşturmaya teşvik etmektedir. Ancak bu durum, gerçek performansla desteklenmeyen sembolik eylemlere yol açabilmektedir (Feghali, Najem & Metcalfe, 2025; Meenakshi et al., 2025). Paydaş teorisi perspektifinden, yeşille aklama kısa vadede paydaş beklentilerini karşılama stratejisi olarak görülse de, uzun vadede güven kaybına ve itibar erozyonuna yol açan bir risk faktörüdür (Bhullar et al., 2025).

2.4.3.4 Sinyal Teorisi

Sinyal teorisi, bilgi asimetrisinin yüksek olduğu piyasalarda, firmaların güvenilirlik sağlamak için çeşitli sinyaller kullandığını öne sürer (Spence, 1973). Yeşille aklama bağlamında bu sinyaller, sürdürülebilirlik raporları, yeşil sertifikalar veya reklam kampanyaları olabilir (Fang, Wang & Zhao, 2025). Ancak bu sinyallerin doğrulanabilirliği düşük olduğunda veya maliyet avantajı sağladığında, firmalar gerçekte çevresel performanslarını geliştirmeden yeşil imaj yaratabilir. Bu durum, bilgi asimetrisini daha da derinleştirerek yatırımcıların ve tüketicilerin yanlış

kararlar vermesine neden olur (Hao et al., 2025). Dolayısıyla sinyal teorisi, yeşille aklamayı bilgi yönetimi ve algı stratejileriyle ilişkili bir davranış olarak açıklamaktadır (Lubloy et al., 2025).

2.4.3.5 Evrimsel Oyun Teorisi

Son yıllarda yeşille aklamanın dinamik boyutlarını analiz etmek amacıyla Evrimsel Oyun Teorisi (Evolutionary Game Theory – EGT) kullanılmaya başlanmıştır. Bu yaklaşım, şirketler, yatırımcılar ve düzenleyiciler gibi birden fazla aktörün stratejik etkileşimlerini modelleyerek, yeşille aklamanın hangi koşullarda yaygınlaştığını veya caydırıldığını ortaya koymaktadır (Hao et al., 2025). EGT, bilgi asimetrisi koşullarında, firmaların düşük maliyetli sinyaller yoluyla avantaj elde etme eğiliminin, yatırımcıların güven stratejileri ve düzenleyici yaptırımlarla nasıl dengelendiğini analiz eder (Fang et al., 2025). Araştırmalar, yeşille aklamayı azaltmak için zorunlu ESG raporlaması, üçüncü taraf doğrulama ve yüksek maliyetli cezai yaptırımların önemli teşvik mekanizmaları olduğunu göstermektedir (Zhang et al., 2025). Bu çerçevede EGT, sinyal teorisinin sunduğu bilgi asimetrisi açıklamasını dinamik bir stratejik uyum perspektifiyle tamamlamakta, yeşille aklamanın piyasa koşullarına bağlı adaptif bir davranış olduğunu vurgulamaktadır.

EGT, klasik oyun teorisinin bir uzantısı olarak, stratejik davranışların statik dengelerden ziyade zaman içinde nasıl değiştiğini incelemektedir. Adını, biyolojideki evrimsel süreçlerden alır; çünkü model, stratejilerin başarı düzeyine bağlı olarak tekrar eden etkileşimler sonucunda "seçilip" popülasyon içinde baskın hale geldiği dinamikleri analiz eder (Maynard Smith, 1982). Bu yaklaşım, oyuncuların her zaman tam rasyonel olmadığı, ancak başarılı stratejilerin taklit edilerek yayıldığı bir adaptasyon sürecini esas alır.

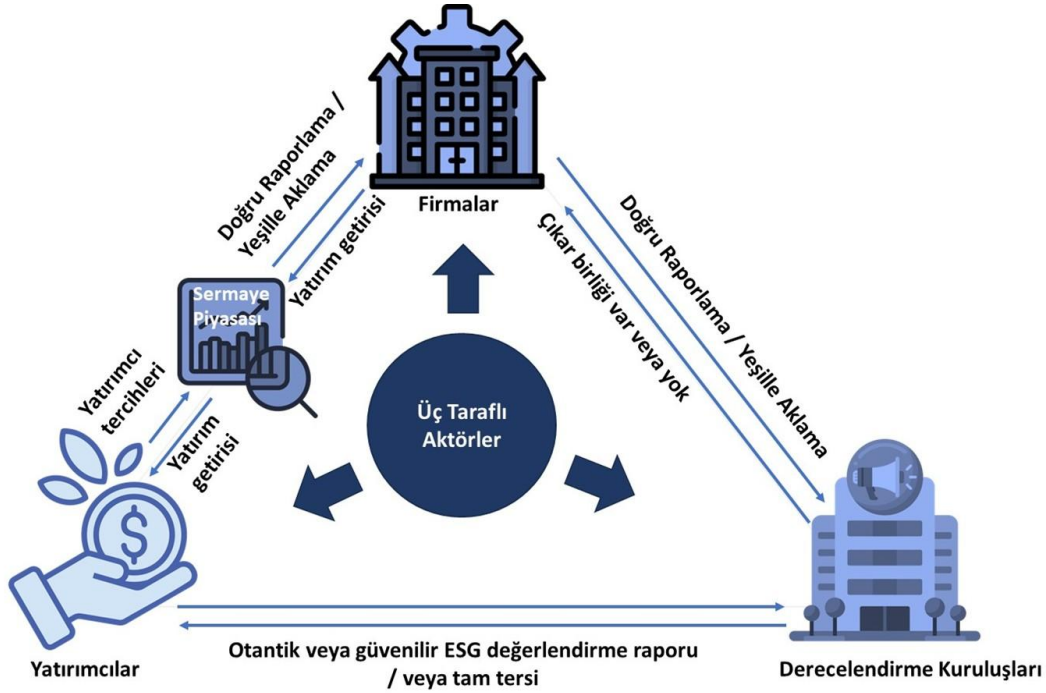
Yeşille aklama bağlamında EGT, firmaların, yatırımcıların ve düzenleyicilerin stratejik etkileşimlerini modelleyerek, bu davranışın hangi koşullarda kalıcı hale geldiğini veya caydırıldığını ortaya koyar (Hao et al., 2025). Tipik bir modelde:

- Firmalar, iki temel strateji arasında seçim yapar: Gerçek yeşil yatırım (substantive action) veya yeşille aklama (symbolic action).
- Yatırımcılar, güven (trust) veya güvensizlik (distrust) stratejisi benimser.
- Düzenleyiciler, sıkı denetim (strict enforcement) veya esnek denetim (lenient enforcement) uygular.

Modelin dinamik doğası sayesinde, cezai yaptırımların artırılması, zorunlu ESG raporlaması veya bağımsız doğrulama mekanizmalarının maliyet parametrelerine etkisi ölçülebilir. Araştırmalar, denetim zafiyetinin ve bilgi asimetrisinin yüksek olduğu durumlarda, yeşille aklamanın popülasyonda baskın strateji haline geldiğini; buna karşılık, yüksek denetim maliyetleri ve yaptırımların, gerçek yeşil yatırımları uzun vadede daha avantajlı hale getirdiğini göstermektedir (Hao et al., 2025; Fang et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Bu nedenle, EGT, sinyal teorisinin sunduğu bilgi asimetrisi çerçevesini tamamlayarak, yeşille aklamayı piyasa koşullarına bağlı adaptif bir strateji olarak analiz etme olanağı sağlamaktadır.

Şekil 4, sermaye piyasalarında yeşille aklama davranışının oluşumuna aracılık eden üç temel aktör arasındaki etkileşimi açıklamaktadır: şirketler (enterprise), derecelendirme kuruluşları (rating agencies) ve yatırımcılar (investors).



Şekil 4. ESG piyasasında yeşille aklama dinamikleri: Şirketler, derecelendirme kuruluşları ve yatırımcılar arasındaki üçlü etkileşim (Hao et al., 2025).

Şekil 4'te gösterilen üçlü yapı, ESG bilgi akışının güvenilirliği ve piyasa şeffaflığı açısından kritik öneme sahiptir. Şirketler, sermaye piyasasına sundukları raporlarda gerçeğe uygun bilgiler verebileceği gibi, yeşille aklama stratejileriyle yanıltıcı beyanlarda da bulunabilmektedir. Derecelendirme kuruluşları, bu bilgileri değerlendirerek yatırımcılara güvenilir ESG derecelendirme raporları sunar; ancak doğrulama mekanizmalarının zayıf olduğu durumlarda manipülasyona açık hale gelebilir. Yatırımcılar ise sermaye tahsisinde büyük ölçüde bu raporların doğruluğuna bağlıdır; dolayısıyla güven veya güvensizlik ilişkisi, piyasanın işleyişini doğrudan etkileyen bir faktördür.

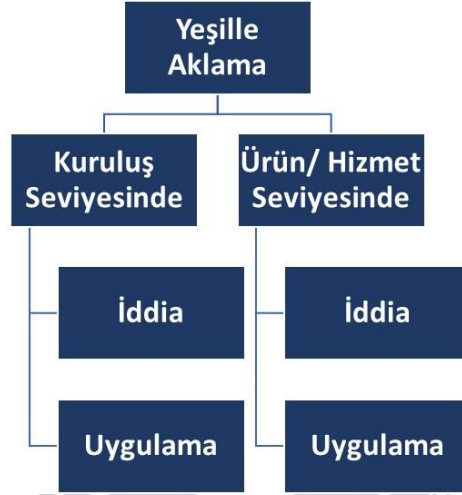
Şekilde yer alan "çıkar birliği var veya yok" ifadesi, şirketler ile derecelendirme kuruluşları arasında olası çıkar ilişkilerini ve bu durumun yeşille aklamayı sistematik bir sorun haline getirme potansiyelini vurgulamaktadır. Bilgi asimetrisinin yüksek olduğu ortamlarda, yatırımcıların kararları genellikle sınırlı doğrulama imkanına dayalıdır ve bu durum, sermaye piyasasında sürdürülebilir finansın güvenilirliğini zayıflatan bir mekanizma yaratır. Bu nedenle, ESG bilgi zincirinde bağımsız doğrulama ve düzenleyici denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi, yeşille aklamanın önlenmesi için kritik bir ön koşul olarak öne çıkmaktadır (Lubloy et al., 2025; Hao et al., 2025).

2.4.4 Yeşille Aklamanın Tonları: Türler, Taktikler ve Uygulamalar

2.4.4.1 Yeşille Aklama Tipleri

Yeşille aklama, kurumsal aktörlerin çevresel performanslarını olduğundan daha olumlu yansıtan, yanlış veya yanıltıcı bilgiye dayalı uygulamaları kapsamaktadır (Delmas & Burbano, 2011; Lyon & Montgomery, 2015).

Şekil 5, yeşille aklama olgusunu düzey ve boyut olmak üzere iki eksende sınıflandırmaktadır.



Şekil 5. Yeşille Aklamanın Genel Kategorileri (de Freitas Netto et al., 2020).

Şekil 5'te düzey ekseninde, yeşille aklama faaliyetleri kuruluş seviyesinde (örneğin, kurumun genel çevresel performansına ilişkin stratejik iddialar) ve ürün/hizmet seviyesinde (örneğin, belirli bir ürünün veya hizmetin çevre dostu olduğu yönündeki iddialar) incelenmektedir. Boyut eksenine ise bu faaliyetlerin doğasına işaret eder:

- **İddia (Claim-based):** Kurum veya ürün hakkında çevresel fayda sağlayan beyanlarda bulunulması, ancak bu iddiaların doğrulanabilir, somut kanıtlara dayanmaması.
- **Uygulama (Executional):** Çevre dostu imaj yaratmak için kullanılan semboller, renkler, görseller veya marka öğeleri gibi iletişimsel unsurlarla yapılan yanıltıcı uygulamalar.

Bu çerçeve, yeşille aklamanın yalnızca yanlış beyanlar yoluyla değil, aynı zamanda algı yönetimine yönelik görsel ve dilsel stratejilerle de ortaya çıktığını göstermektedir. Böylece, olgunun hem stratejik hem de taktik boyutu birlikte ele alınmaktadır.

Literatürde bu olgu farklı sınıflandırmalarla ele alınmakta olup, yaygın tipolojiler üç ana boyutta değerlendirilmektedir: (i) iletişim tabanlı yeşille aklama, (ii) ürün ve hizmet düzeyinde yeşille aklama ve (iii) kurumsal düzeyde stratejik yeşille aklama.

2.4.4.2 İletişim Tabanlı Yeşille Aklama

İletişim tabanlı yeşille aklama, kurumların çevre dostu imajını güçlendirmek için gerçeği çarpıtan veya eksik bilgi veren iletişim stratejilerini ifade eder. Bu tip, reklam, sosyal medya ve sürdürülebilirlik raporları gibi iletişim araçları üzerinden yürütülmektedir (Walker & Wan, 2012). Bilgi bozulması (distortion), yanlış verilerin sunulması veya yanıltıcı çevresel iddiaların ortaya atılmasıyla gerçekleşmektedir. Örneğin, fosil yakıt üreticilerinin düşük karbon ayak izi vurgusu yaparken, toplam emisyonlarını açıklamaması bu kategoriye girmektedir (Nyilasy et al., 2014).

2.4.4.3 Ürün ve Hizmet Düzeyinde Yeşille Aklama

Ürün veya hizmet düzeyinde yeşille aklama, çevresel fayda iddialarının ölçülebilir verilerle desteklenmemesi veya doğrulanamaması durumunda ortaya çıkar (Parguel, Benoît-Moreau & Larceneux, 2011). Bu kapsamda en sık rastlanan alt türler şunlardır:

- **Eksik Bilgi (selective disclosure):** Ürünün yalnızca olumlu çevresel özelliğinin vurgulanması (ör. ambalajın geri dönüştürülebilir olması), ancak üretim sürecinde yüksek karbon salımı gibi olumsuz yönlerin gizlenmesi.
- **Yanlış Sertifikasyon:** Ürün üzerinde gerçeği yansıtmayan veya doğrulanmamış eko-etiketlerin kullanılması (Testa et al., 2015).

2.4.4.4 Kurumsal Düzeyde Stratejik Yeşille Aklama

Bu tür, çevre dostu girişimlerin kurumun temel iş stratejisinin bir parçasıymış gibi sunulmasını, ancak bu uygulamaların marjinal ve sembolik düzeyde kalmasını ifade eder (Marquis, Toffel & Zhou, 2016). Bilgi aşırılığı (information overload) yoluyla çok sayıda sürdürülebilirlik raporu, eko-sertifika veya gönüllü inisiyatif açıklaması yapılarak paydaşların algısında pozitif bir etki yaratılması amaçlanmaktadır. Ancak bu raporların çoğu gerçek performans artışını göstermemekte, yalnızca görünürlük stratejisine hizmet etmektedir.

2.4.4.5 Dijital Yeşille Aklama (Yeni Eğilim)

Son yıllarda sosyal medya platformlarının yaygın kullanımı, yeşille aklamanın dijital ortama taşınmasına neden olmuştur. Bu bağlamda kurumlar, algoritmik hedefleme ve influencer iş birlikleri aracılığıyla çevresel sorumluluk mesajlarını yaymakta, ancak somut veriye dayalı aksiyonlar sınırlı kalmaktadır (Lyon & Montgomery, 2023).

Bu tipolojiler, yeşille aklamanın yalnızca kurumsal iletişimde değil, aynı zamanda tedarik zinciri, ürün tasarımı ve dijital pazarlama gibi çok boyutlu alanlarda ortaya çıktığını göstermektedir. Ayrıca her bir tip, bilgi yönetimi etiği ve şeffaflık ilkeleri bağlamında değerlendirilmesi gereken etik sorunlar doğurmaktadır.

Yeşille aklama olgusunun sistematik olarak analiz edilmesine yönelik en kapsamlı çabalardan biri, TerraChoice tarafından geliştirilen "Yeşille Aklamanın Yedi Günahı" çerçevesidir. **Tablo 5**, söz konusu yedi günahı, her biri için tanımlama ve örnekler ile birlikte sunmaktadır.

Tablo 5. Yeşille Aklamanın Yedi Günahı (TerraChoice, 2010)

No	Günahın Adı	Tanım
1	Gizli Takas Günahı (Sin of the Hidden Trade-Off)	Bir ürünün "yeşil" olarak tanıtılması, ancak bu iddianın makul olmayan derecede dar bir özellik setine dayanması ve diğer önemli çevresel sorunlara dikkat edilmemesi durumudur. Örneğin, kâğıt ürünlerinin yalnızca sürdürülebilir bir ormandan elde edildiği için çevre dostu olarak kabul edilmesi. Oysa kâğıt yapım sürecindeki enerji kullanımı, sera gazı emisyonları, su ve hava kirliliği gibi diğer çevresel etkiler de aynı derecede önemli olabilir.
2	Kanıt Yok Günahı (Sin of No Proof)	Çevresel iddiaların kolayca erişilebilir destekleyici bilgilerle veya güvenilir üçüncü taraf sertifikasıyla doğrulanamaması durumudur. Yaygın örnekler arasında, tüketim sonrası geri dönüştürülmüş içerik yüzdeleri iddia eden ancak herhangi bir kanıt sunmayan kâğıt ürünleri bulunur.

3	Belirsizlik Günahı (Sin of Vagueness)	Anlamı o kadar belirsiz veya geniş olan çevresel iddiaların yapılması ki, tüketici tarafından yanlış anlaşılması muhtemeldir. Örneğin, "Tamamen doğal" ifadesi. Arsenik, uranyum, cıva ve formaldehit doğal olarak bulunur ve zehirlidir. "Tamamen doğal" her zaman "çevre dostu" anlamına gelmez.
4	Alakasızlık Günahı (Sin of Irrelevance)	Çevresel iddianın doğru olmasına rağmen tüketiciler için önemsiz veya çevre dostu ürün arayışında yararsız olması durumudur. Yaygın bir örnek, "CFC içermez" ifadesidir; çünkü CFC'ler yasalar gereği zaten yasaklanmıştır.
5	İki Kötü Arasında Daha İyi Olmanın Günahı (Sin of Lesser of Two Evils)	Çevresel iddiaların, ürün kategorisi genelinde geçerli olmasına rağmen, kategorinin toplam çevresel etkilerini göz ardı etmesine neden olan durumudur. Örneğin, organik sigaralar veya yakıt tasarruflu SUV araçlar bu kategoriye girer.
6	Yalan Günahı (Sin of Fibbing)	En nadir görülen günahdır ve tamamen yanlış çevresel iddiaların yapılması durumudur. Yaygın örnekler, ürünlerin Energy Star sertifikalı olduğunu iddia etmesi ancak aslında bu sertifikaya sahip olmamasıdır.
7	Sahte Etiket Günahı (Sin of Worshipping False Labels)	Ürünün, resimler veya logolar aracılığıyla gerçekte var olmayan bir üçüncü taraf onayına sahip olduğu izlenimini vermesi durumudur. Başka bir deyişle, sahte etiket kullanımı.

Bu yaklaşım, çevre dostu iddiaların hangi tür yanlış yönlendirme stratejileriyle yapıldığını tanımlayarak, tüketicilerin ve politika yapımcıların bilinçlenmesine katkı sağlamaktadır (TerraChoice, 2010). Çalışmada tanımlanan günahlar; yanlış bilgi verme, eksik bilgi sunma, doğrulanamaz beyanlar veya sembolik eylemler yoluyla çevresel performansın gerçekte olduğundan daha olumlu yansıtılmasına odaklanmaktadır. Bu tipoloji, yeşille aklamayı yalnızca kurumsal bir iletişim sorunu olarak değil, aynı zamanda bilgi etiği ve şeffaflık bağlamında ele almayı mümkün kılmaktadır.

TerraChoice tarafından tanımlanan "Yeşille Aklamanın Yedi Günahı", çevresel beyanların güvenilirliği ve şeffaflığına ilişkin önemli bir kavramsal çerçeve sunmaktadır. Bu günahlar, yalnızca tüketici yanılgılarını değil, aynı zamanda bilgi etiği ve kurumsal hesap verebilirlik sorunlarını da ortaya koymaktadır. Özellikle "Gizli Takas" ve "Belirsizlik" gibi kategoriler, kurumsal iletişimde seçici bilgi paylaşımı ve muğlak dil kullanımının sistematik bir stratejiye dönüştüğünü göstermektedir. Buna karşılık, "Yalan" ve "Sahte Etiket" gibi daha nadir görülen günahlar, doğrudan aldatmaya dayalı uygulamaların varlığını işaret etmektedir. Dolayısıyla bu sınıflandırma, yeşille aklama pratiklerinin yalnızca iletişimsel bir sapma değil, aynı zamanda çevre politikalarının ve piyasa düzenlemelerinin etkinliği açısından da kritik bir sorun olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 2, bir iddianın yeşille aklama olarak sınıflandırılma sürecini sistematik biçimde ortaya koyan karar ağacını göstermektedir.

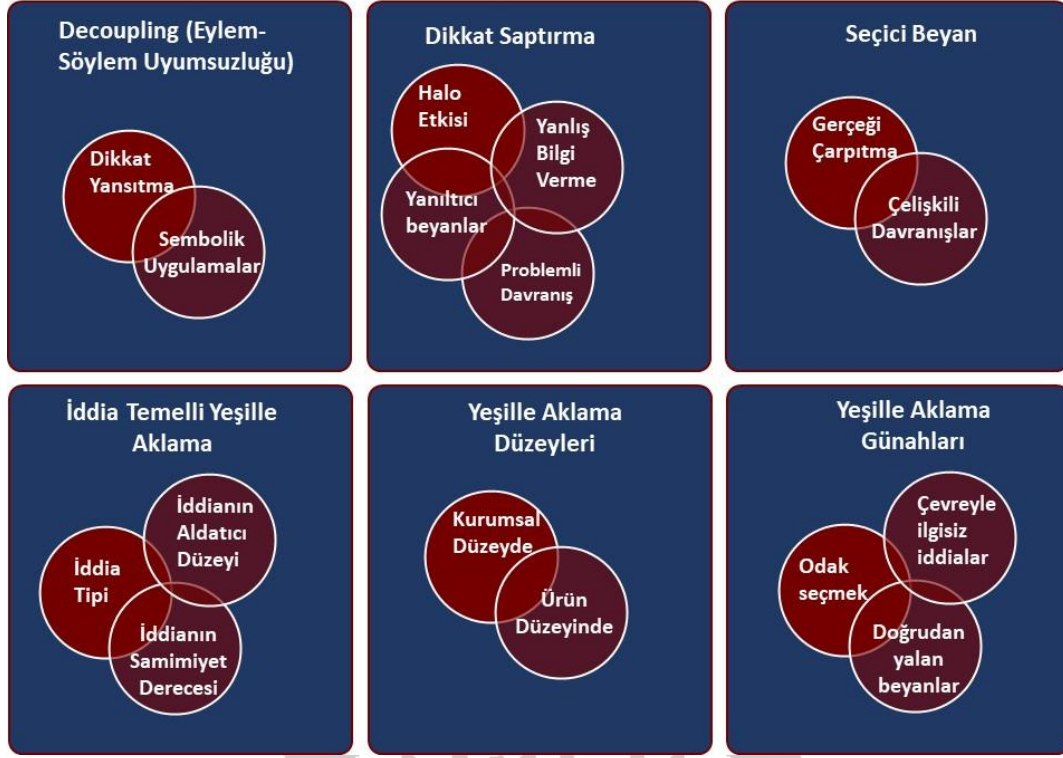


Şekil 6. Bir iddianın yeşille aklama olarak sınıflandırılması süreci (Spaniol et al., 2024).

Bu yaklaşım, çevresel beyanların yeşille aklama niteliği taşıyıp taşımadığını belirlemek için ardışık olarak beş temel soruyu sorgular: (i) iddia çevreyle ilişkili mi, (ii) bir firma tarafından mı yapılmış, (iii) ürün veya hizmetin pazarlanmasına yönelik mi, (iv) iddia doğrulanmamış mı ve (v) yanıltıcı mı? Ayrıca, iddianın rekabet avantajı elde etme amacı taşıması da değerlendirmeye alınmaktadır. Her bir aşamada verilen "hayır" yanıtı, farklı türde stratejik iletişim pratiklerine veya ilgili aktör gruplarına işaret etmektedir. Bu yapı, yeşille aklamayı yalnızca tek tip bir olgu olarak değil, çok katmanlı ve bağlama bağlı bir iletişim fenomeni olarak konumlandırmakta ve analize sistematik bir çerçeve kazandırmaktadır (Spaniol et al., 2024).

Yeşille aklama olgusu, farklı bağlamlarda ve çok boyutlu yapısıyla çeşitli tipolojiler altında incelenmiştir. Literatürde bu olgu yalnızca tekil bir strateji olarak değil, hem iletişimsel hem de davranışsal boyutları kapsayan karmaşık bir uygulama seti olarak ele alınmaktadır (Delmas & Burbano, 2011; Lyon & Montgomery, 2015). Bu kapsamda, kurumsal düzeydeki sembolik eylemlerden ürün odaklı yanıltıcı iddialara kadar uzanan geniş bir spektrum söz konusudur. **Şekil 7**, yeşille aklamanın başlıca türlerini kavramsal bir çerçeve içinde sınıflandırarak, bu olgunun kurumsal strateji ve iletişim düzeyindeki farklı görünümünü ortaya koymaktadır.

Yeşille Aklama Tipleri



Şekil 7. Farklı Bağlamlarda Yeşille Aklama Tipleri (Meenakshi et al., 2025).

Şekilde sunulan sınıflandırma, yeşille aklamanın altı temel kategori üzerinden analiz edilmesini sağlamaktadır: koparma-eylem söylemuyumsuzluğu- (decoupling), dikkat saptırma (attention deflection), seçici beyan (selective disclosure), iddia temelli yeşille aklama (claim greenwashing), düzeyler (levels of greenwashing) ve günahlar (sins of greenwashing). Bu çerçeve, olgunun hem mikro (ürün odaklı iddialar) hem makro (kurumsal stratejik söylemler) düzeyde nasıl farklılaştığını göstermektedir. Örneğin, koparma kategorisi, sembolik eylemler ve dikkat dağıtıcı uygulamalar aracılığıyla kurumsal performans ile iletişim arasındaki tutarsızlıkları vurgularken; günahlar kategorisi, TerraChoice tarafından geliştirilen ve “gizli takas-odak seçmek”, “alakasızlık” ve “yalan” gibi spesifik aldatıcı pratikleri işaret eden etik ihlalleri kapsamaktadır. Dolayısıyla bu tipoloji, yeşille aklama davranışlarının yalnızca iletişim stratejisi olarak değil, aynı zamanda kurumsal yönetim ve piyasa düzenlemeleri açısından kritik bir problem alanı olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



Tablo 6'de kavramlar örneklerle açıklanmaktadır.



Tablo 6. Yeşille Aklama Tipolojisinde Kavramlar, Açıklamaları ve Örnekler

Kavram	Açıklama ve Örnek
Decoupling (Koparma)	Kurumsal söylemler ile gerçek uygulamalar arasındaki uyumsuzluğu ifade eder. Örnek: Şirketin "karbon nötr" olduğunu iddia etmesi, ancak karbon ofsetlerini şeffaf olmayan yollarla kullanması.
Attention Deflection (Dikkat Saptırma)	Dikkatin asıl çevresel sorunlardan uzaklaştırılması. Örnek: Fosil yakıt şirketinin yenilenebilir enerji yatırımlarını ön plana çıkarırken ana faaliyetlerinden kaynaklı emisyonları gizlemesi.
Symbolic Actions (Sembolik Eylemler)	Gerçek çevresel faydası olmayan ama çevreci izlenimi veren girişimler. Örnek: Ağaç dikme kampanyası başlatan ancak üretim süreçlerinde yüksek karbon salan firma.
Halo Effect	Tek bir olumlu özelliğin markanın tüm faaliyetlerini çevreci gösterdiği algısı. Örnek: Ürünün ambalajının geri dönüştürülebilir olması üzerinden "doğa dostu" algısı yaratmak.
Falsification (Yanlış Beyan)	Bilinçli olarak yanlış bilgi sunma. Örnek: Sertifikası olmayan ürünün organik olduğunu iddia etmek.
Misleading (Yanıltıcı Beyan)	Doğrudan yalan olmamakla birlikte tüketiciyi yanlış yönlendiren beyanlar. Örnek: "Doğa dostu" gibi belirsiz ve kanıtlanmamış ifadeler kullanmak.
Problematic Behavior (Sorunlu Davranış)	Şirketin ana faaliyetlerinin çevresel olarak zararlı olmasına rağmen çevreci bir imaj yaratmaya çalışması. Örnek: Plastik üreticisinin geri dönüşüm kampanyası ile kendini çevreci olarak konumlandırması.
Selective Disclosure (Seçici Açıklama)	Yalnızca olumlu çevresel bilgilerin paylaşılması. Örnek: Ürünün enerji tasarruflu olduğunu vurgularken, üretim sırasında kullanılan toksik kimyasallardan bahsetmemek.
Two-fold Behaviour (Çelişkili Davranış)	Bir alanda çevreci görünürken başka bir alanda çevresel zarara devam etmek. Örnek: Geri dönüşümlü ambalaj kullanan ama kömürle çalışan üretim tesisine sahip firma.
Claim Greenwashing (İddia Temelli Yeşille Aklama)	Ürün veya hizmete yönelik çevresel iddiaların türü, samimiyeti ve doğruluk düzeyiyle ilgili stratejiler. Örnek: "%100 ekolojik" ifadesiyle pazarlama yapmak ancak doğrulama sunmamak.
Claim Deceptiveness (Aldatıcı İddia)	Gerçeği yansıtmayan çevresel iddialar. Örnek: Plastik poşetin "biyobozunur" olarak etiketlenmesi ancak sadece endüstriyel koşullarda bozunabilmesi.
Claim Sincerity (Samimiyet Düzeyi)	İddianın gerçekten çevresel etkiyi azaltmaya yönelik olup olmadığı. Örnek: Ambalajda yapılan küçük bir değişikliği büyük bir çevreci girişim olarak sunmak.
Levels of Greenwashing (Yeşille Aklama Düzeyleri)	Yeşille aklamanın gerçekleştiği düzeyi belirtir: Kurumsal veya ürün bazlı. Örnek: Kurumsal düzeyde "sıfır emisyon" stratejisi; ürün düzeyinde "eko-etiket" kullanımı.
Firm-Level (Kurumsal Düzey)	Şirketin bütününe yönelik yeşille aklama stratejileri. Örnek: ÇSY raporlarında performansını olduğundan daha iyi göstermek.
Product-Level (Ürün Düzeyi)	Belirli bir ürüne yönelik yanıltıcı çevresel beyanlar. Örnek: "Çevre dostu" deterjan iddiası.
Sins of Greenwashing (Yeşille Aklamanın Günahları)	TerraChoice tarafından tanımlanan aldatıcı uygulamalar (ör. gizli takas, alakasızlık, yalan).
Hidden Trade-off (Gizli Takas)	Yalnızca tek bir olumlu özelliğe odaklanıp diğer olumsuz etkileri gizleme. Örnek: Geri dönüştürülmüş plastik kullanımı vurgusu yaparken üretimde yüksek karbon salımı.
Irrelevance (Alakasızlık)	Gerçek ama anlamsız bir çevre iddiası. Örnek: "CFC içermez" ibaresi, CFC'lerin zaten yasak olduğu bir dönemde kullanılması.
Fibbing (Yalan)	Doğrudan yanlış bilgi verme. Örnek: Sertifikasız bir ürünün eko-etiketli olduğu iddiası.

2.4.4.6 Yeşille Aklama Sözlüğü

Yeşille aklama olgusu, yalnızca geleneksel anlamda yanıltıcı çevresel iddialarla sınırlı olmayıp, zamanla farklı iletişim stratejilerini ve kurumsal davranış biçimlerini kapsayan geniş bir terminoloji geliştirmiştir. Literatürde bu çeşitlilik, şirketlerin sürdürülebilirlik algısını yönetmek amacıyla benimsediği farklı taktikleri tanımlayan kavramlarla ifade edilmektedir (Lyon & Montgomery, 2015; Delmas & Burbano, 2011). Bu bağlamda, "greenshifting", "greenhushing"

ve "greencrowding" gibi terimler, yeşille aklamanın evrimleşen dinamiklerini ve kurumsal iletişimdeki karmaşık yapıyı yansıtmaktadır. Tablo 7, bu kavramların sistematik bir özetini sunmakta ve örnekleri ile açıklamaktadır.

Tablo 7. Yeşille Aklamanın Farklı Alt Kavramları ve Örnekleri

Terim	Tanım	Örnek
Greenwashing (Yeşille aklama)	Kurum veya ürünün çevresel faydalarını olduğundan daha olumlu göstermek için yanıltıcı bilgi verme, seçici açıklama veya sembolik eylemler kullanma pratiği.	Fosil yakıt şirketinin yenilenebilir enerjiye yaptığı küçük yatırımları ön plana çıkararak ana faaliyetlerinden kaynaklanan yüksek emisyonları gizlemesi.
Greencrowding (Yeşil kalabalığa karışma)	Şirketlerin sürdürülebilirlik taahhütlerini büyük bir endüstri koalisyonu veya gönüllü platform içinde görünür kılarak bireysel hesap verebilirliği azaltma stratejisi.	500 şirketin yer aldığı iklim taahhüt deklarasyonuna imza atarak gerçek ilerleme sağlamayan firmaların görünürlük kazanması.
Greenlighting (Yeşile ışık tutma)	Dikkati küçük bir çevresel iyileştirme üzerine çekerek ürün veya şirketin diğer olumsuz çevresel etkilerini perdeleme.	Petrol şirketinin reklamlarında yenilenebilir enerji yatırımlarını öne çıkarırken fosil yakıt projelerindeki büyümeyi gizlemesi.
Greenshifting (Yeşil kaydırma)	Çevresel sorumluluğun şirketten tüketiciye kaydırılması; bireysel davranışların krizin ana nedeni olarak gösterilmesi.	Plastik atık krizinde şirketin tek kullanımlık ambalaj üretimine devam ederken, tüketicileri geri dönüşüm alışkanlıkları konusunda suçlayan kampanyalar yürütmesi.
Greenlabelling (Yeşil etiketleme)	Ürün veya hizmetin gerçeğe uygun olmayan, doğrulanmamış çevresel etiketlerle pazarlanması.	"Eko" veya "doğa dostu" etiketi taşıyan ancak üçüncü taraf sertifikasyonu bulunmayan temizlik ürünleri.
Greenrinsing (Yeşil durulama)	Şirketin her yıl sürekli değişen çevre hedefleri açıklayarak hesap verebilirliği ve izlenebilirliği zorlaştırması.	Bir markanın her yıl karbon nötr olma tarihini ileriye taşıması, önceki hedeflerin neden gerçekleşmediğini açıklamaması.
Greenhushing (Yeşil sessizleşme)	Eleştiri veya düzenleyici risklerden kaçınmak için çevresel hedef ve uygulamaların kamuya açıklanmaması veya düşük profile tutulması.	Karbon salımını azaltmaya yönelik ciddi hedefleri olan bir şirketin bu bilgiyi yalnızca iç raporlarda belirtmesi.
Greenblushing (Yeşil utangaçlık)	Şirketin çevresel başarılarını pazarlama amacıyla yeterince duyurmaması, sessiz kalması.	Su tüketimini önemli ölçüde azaltan bir şirketin bu başarıyı yalnızca yıllık raporda paylaşması, dış iletişimde yer vermemesi.
Greenskimming (Yeşil sıyırma)	Sürdürülebilirlik girişimlerinden elde edilen faydaların, yalnızca belirli ürün gruplarında veya pazarlama kanallarında uygulanarak diğer süreçlerde göz ardı edilmesi (üst tabakayı sıyırma).	Premium ürünlerde geri dönüştürülmüş ambalaj kullanılırken, diğer ürünlerde geleneksel plastik ambalajın devam etmesi.

2.4.5 Görsel ve Söylemsel Manipülasyon Yoluyla Yeşille Aklama

Yeşille aklamanın en yaygın stratejilerinden biri, çevre dostu imaj yaratmak amacıyla görsel ve söylemsel unsurların manipülasyonu yoluyla paydaş algısını şekillendirmektir. Bu yaklaşım, şirketin gerçek çevresel performansında kayda değer bir değişiklik olmaksızın, yeşil bir kimlik oluşturmaya olanak tanır (Walker & Wan, 2012; Lyon & Montgomery, 2015). Özellikle reklamcılık, ambalaj tasarımı ve kurumsal raporlama süreçlerinde bu tür yüzeysel göstergeler belirgin şekilde gözlemlenmektedir.

Görsel Manipülasyon, renk kullanımı, doğa imgeleri, organik semboller veya çevre çağrışımlı grafikler aracılığıyla gerçekleştirilir (Delmas & Burbano, 2011). Yeşil, mavi ve toprak tonları gibi renkler ile yaprak, su damlası, orman veya hayvan görsellerinin yoğun kullanımı, ürünün veya kurumun ekolojik değerlerle özdeşleştirilmesini hedefler (Hartmann & Apaolaza-Ibáñez, 2012). Bu bağlamda, bir fosil yakıt şirketinin reklamlarında yoğun şekilde yenilenebilir enerji görsellerine yer vermesi, görsel manipülasyonun tipik bir örneğidir.

Söylemsel Manipülasyon ise dilin stratejik kullanımı yoluyla gerçekleştirilir. Özellikle "doğa dostu", "çevreyle uyumlu", "eko" ve "sürdürülebilir" gibi muğlak ifadeler, ürün veya hizmetin çevresel faydalarını abartarak tüketicilerde pozitif bir algı oluşturur (Nyilasy et al., 2014). Bu ifadeler, çoğunlukla doğrulanabilir kanıt veya üçüncü taraf sertifikasyon olmaksızın kullanılmakta, bu da tüketicinin yanıltılmasına neden olmaktadır (Parguel, Benoît-Moreau & Larceneux, 2011). Ayrıca, kurumsal raporlarda stratejik dil oyunları ile gerçek performans eksiklikleri örtülmekte, böylece "gerçekte var olmayan çevresel sorumluluk" algısı güçlendirilmektedir (Marquis, Toffel & Zhou, 2016).

Bu tür yüzeysel göstergeler, paydaşların algısal düzeyde tatmin edilmesine hizmet eden sembolik aksiyonlar niteliği taşır. Oysa sembolik aksiyonlar, kurumsal uygulamalarda köklü değişiklik yaratmadığı sürece, yalnızca kısa vadeli bir güven ilişkisi oluşturur ve uzun vadede kurumsal meşruiyet risklerini artırır (Walker & Wan, 2012). Dolayısıyla, görsel ve söylemsel manipülasyon, yeşille aklamanın hem en görünür hem de en tartışmalı biçimlerinden birini temsil etmektedir.

2.4.6 Belirsiz ve Doğrulanamaz İddialar Yoluyla Yeşille Aklama

Yeşille aklamanın en yaygın biçimlerinden biri, ürün bazlı çevresel iddiaların belirsizlik, kanıtsızlık ve yanlış yönlendirme içeren söylemlerle yapılmasıdır (de Freitas Netto et al., 2020). Literatürdeki tanımların büyük bölümü, kanıtlanamayan veya yanıltıcı beyanları yeşille aklamanın temel özelliği olarak kabul etmektedir (Spaniol et al., 2024). Bu bağlamda, birçok yeşil iddia "kanıtlanabilirlikten uzak, belirsiz veya aşırı genelleştirilmiş" ifadeler barındırmaktadır (ESMA, 2024).

Piyasada sık rastlanan örnekler arasında "net-zero taahhütleri", "karbon nötr ürün" gibi doğrulama gerektiren beyanlar ile ölçüm metodolojisi veya bağımsız doğrulama olmadan kullanılan çevre etiketleri bulunmaktadır. Bu tür ifadeler, tüketicide çevresel fayda algısı yaratırken, gerçekte ölçülebilir bir performans göstergesi ortaya koymamaktadır (Walker & Wan, 2012). Ayrıca, "tamamen doğal", "çevre dostu", "daha az emisyon" gibi muğlak terimler, doğrulanabilir bir kriter veya sertifikasyona dayanmaması nedeniyle yanıltıcı nitelik taşımaktadır (Aggarwal & Kadyan, 2011).

En yaygın taktikler, belirsiz dil kullanımı (ör. "eko-dostu"), sahte sertifikaların pazarlama aracı olarak sunulması, abartılı reklam stratejileri ve üçüncü taraf denetiminden yoksun yeşil etiketlerin kullanımınıdır (Feghali et al.,

2025). Bu durum, TerraChoice tarafından tanımlanan Belirsizlik Günahı (Sin of Vagueness) ve Kanıt Yok Günahı (Sin of No Proof) kavramlarıyla da örtüşmektedir (TerraChoice, 2010).

Güncel literatür, belirsiz ve doğrulanamaz iddiaların daha karmaşık formlar aldığını göstermektedir. Özellikle geleceğe dönük ancak kanıtlarla desteklenmeyen vaatler (örneğin, 2030 veya 2050 için net sıfır hedefleri) ve tedarik zincirinde dolaylı yeşille aklama (vicarious greenwashing) bu kapsamda değerlendirilmektedir (Pizzetti et al., 2021; Feghali et al., 2025). Bu tür taktikler, kurumsal iletişimde şeffaflık sorunlarını artırmakta ve düzenleyici otoritelerin gözetim ihtiyacını güçlendirmektedir (European Commission, 2022).

2.4.7 Stratejik Odak Saptırma ve Sembolik Eylemler Yoluyla Yeşille Aklama

Yeşille aklamanın önemli bir boyutu, çevresel performansın gerçek niteliğini gölgeleyerek paydaş algısını yönetmeye odaklanan stratejik uygulamalar ile ilgilidir. Bu bağlamda "odak saptırma" (attention deflection), şirketlerin yüksek çevresel etkilerini arka planda bırakıp sınırlı veya sembolik girişimlerini görünür kılmaları şeklinde tanımlanır (Marquis, Toffel & Zhou, 2016; Lyon & Montgomery, 2015). Odak saptırma, yeşille aklamanın en etkili taktiklerinden biri olup, özellikle yüksek karbon salımlı endüstrilerde sıkça görülmektedir (Delmas & Burbano, 2011).

Sembolik eylemler, bu stratejinin en yaygın unsurlarından biridir. Şirketler, düşük maliyetli, yüksek görünürlük sağlayan ve genellikle ölçülebilir çevresel faydası sınırlı olan projeleri öne çıkararak kurumsal imajlarını güçlendirmeye çalışır (Walker & Wan, 2012). Örneğin, fosil yakıt sektöründe faaliyet gösteren bir şirketin, ağaç dikme kampanyalarını kurumsal iletişimde merkezi bir unsur olarak sunması, sembolik eylemin tipik bir örneğidir. Benzer şekilde, plastik üreticilerinin geri dönüşüm temalı sosyal sorumluluk projeleri yürütmesi, odak saptırmaya yönelik stratejik bir iletişim pratiği olarak değerlendirilmektedir.

Bu tür sembolik aksiyonlar, şirketin temel faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel maliyetleri perdeleme işlevi görürken, kamuoyu nezdinde "çevre dostu" bir algı yaratır (Parguel, Benoît-Moreau & Larceneux, 2011). Araştırmalar, sembolik uygulamaların genellikle gönüllü girişimler, hayırsever bağışlar veya karbon dengeleme projeleri gibi yüksek iletişim değeri taşıyan fakat operasyonel dönüşümü sınırlı eylemlerden oluştuğunu ortaya koymaktadır (Lyon & Montgomery, 2015; Nyilasy et al., 2014).

Bu strateji, kısa vadede marka itibarı için avantaj sağlasa da, uzun vadede paydaşların güvenini zedeleyebilir ve düzenleyici otoritelerin denetim riskini artırabilir (Marquis et al., 2016). Dolayısıyla, odak saptırma ve sembolik eylemler, yeşille aklamanın yalnızca pazarlama alanında değil, aynı zamanda kurumsal yönetim ve etik çerçevede de ele alınması gereken bir sorun alanı olduğunu göstermektedir.

2.4.8 Yetersiz Eylem ve Etkisiz Politikalar Yoluyla Yeşille Aklama

Yeşille aklamanın bir diğer kritik boyutu, kurumların çevresel iddialarını desteklemek için uygulamaya koydukları yetersiz veya etkisiz aksiyonlar ve politikalar ile ilgilidir. Bu durum, sembolik yönetim (symbolic management) anlayışının bir uzantısı olarak, kurumların görünürde çevresel sorumluluk aldıkları izlenimini yaratırken gerçekte çevresel etkiyi anlamlı düzeyde azaltmayan faaliyetleri ifade eder (Lyon & Montgomery, 2015; Delmas & Burbano, 2011). Bu tür politikalar genellikle gönüllü girişimlere katılım, düşük etki potansiyeline sahip projeler veya sertifika temelli ama izlenebilirliği zayıf uygulamalar biçiminde karşımıza çıkar.

Yetersiz eylemler, çoğunlukla karbon emisyonu, enerji tüketimi veya atık yönetimi gibi kritik alanlarda yapısal dönüşüm gerektiren aksiyonlar yerine, görünürlük sağlayan küçük çaplı projelerle sınırlı kalmaktadır. Örneğin, bir şirketin operasyonel emisyonlarını azaltmaya yönelik kapsamlı bir strateji geliştirmek yerine, yalnızca ofislerinde enerji tasarruflu ampuller kullanması bu kategoriye girer. Benzer şekilde, gönüllü raporlama platformlarına (ör. CDP, GRI) katılım sağlamak ancak raporlanan verilerin doğrulanabilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini garanti altına almamak da etkisiz politikaların bir göstergesidir (Marquis, Toffel & Zhou, 2016).

Araştırmalar, bu tür uygulamaların çoğunlukla itibar yönetimi motivasyonu ile şekillendiğini ve uzun vadeli performans iyileştirmesi sağlamadığını ortaya koymaktadır (Walker & Wan, 2012). Ayrıca, düzenleyici baskının düşük olduğu piyasalarda bu tür sembolik politikaların daha yaygın olduğu gözlemlenmektedir (Nyilasy et al., 2014). Feghali et al. (2025) bu tür eylemleri, "kurumsal strateji ile operasyonel dönüşüm arasındaki boşluğu doldurmayan, performans odaklı olmayan girişimler" olarak tanımlamaktadır.

Bu bağlamda, yetersiz eylemler ve etkisiz politikalar, hem paydaş güveni hem de çevresel yönetim açısından risk teşkil etmekte, şirketlerin sürdürülebilirlik iddialarının şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleriyle çelişmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, etki temelli (impact-oriented) politikaların teşvik edilmesi ve yeşil iddiaların zorunlu doğrulama mekanizmalarıyla desteklenmesi, yeşille aklamanın bu boyutunun azaltılması için kritik önemdedir.

2.4.9 Sektörel Örnekler (enerji, tekstil, finans vb.)

Yeşille aklama uygulamaları, sektörler arasında farklı taktiklerle ortaya çıkmakta ve her bir endüstri kendi faaliyet yapısına uygun yanıltıcı stratejiler geliştirmektedir. Enerji sektöründe, özellikle fosil yakıt şirketleri, çevre dostu imaj oluşturmak amacıyla yenilenebilir enerji yatırımlarını orantısız şekilde öne çıkarırken, temel faaliyetlerinden kaynaklanan yüksek karbon emisyonlarını göz ardı etmektedir (Delmas & Burbano, 2011; Lyon & Montgomery, 2015). Benzer şekilde, tekstil ve moda endüstrisi, geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen kapsül koleksiyonları öne çıkararak aşırı üretim ve hızlı moda pratiklerini perdelemektedir (Pizzetti, Gatti & Seele, 2021). Finans sektöründe ise, çevre dostu yatırım fonları (green funds) ve sürdürülebilirlik temalı finansal ürünler, çoğu zaman somut çevresel faydayı doğrulayan kriterlerden yoksun olarak pazarlanmaktadır (Feghali et al., 2025).

Literatürde yer alan vaka incelemeleri, yeşille aklamanın sadece iletişimsel bir araç değil, aynı zamanda pazarlama ve stratejik yönetim boyutlarında bütünleşik bir uygulama olduğunu göstermektedir. Aggarwal & Kadyan (2011) çalışması, farklı sektörlerden öne çıkan örnekleri detaylı olarak incelemiş ve bu vakaların, şirketlerin "çevre dostu" algısını pekiştirmek için yanıltıcı bilgi ve sembolik eylemler kullandığını ortaya koymuştur. Örneğin, Royal Dutch Shell, CO₂ emisyonlarını bir tehdit yerine çiçek yetiştirme kaynağı olarak gösteren reklam kampanyasıyla eleştirilmiştir. Otomotiv sektöründe General Motors (GM), "Gas-friendly to gas-free" sloganıyla çevreci bir imaj sunarken, aynı dönemde fosil yakıtlı araç üretiminde önemli bir azalma gerçekleştirilmemiştir. Gıda ve içecek sektöründe Nestlé, "Eco Shape" şişeleri ile çevresel fayda iddiasında bulunmuş ancak üretim süreçlerindeki karbon ve su tüketimi ile ilgili şeffaf veri sunmamıştır. Elektronik sektöründe ise LG, Energy Star etiketini yanlış kullanarak tüketicileri enerji verimliliği konusunda yanıltmıştır.

Bu örnekler, yeşille aklamanın ürün bazlı yanıltıcı iddialardan kurumsal düzeyde sembolik stratejilere kadar uzanan geniş bir spektrumda yer aldığını göstermektedir. Ayrıca, sektör bazında incelenen bu vakalar, düzenleyici çerçevelerin ve bağımsız doğrulama mekanizmalarının önemini vurgulamaktadır. **Tablo 8'**te bazı sektörel yeşille aklama örnekleri verilmektedir.

Tablo 8. Sektörel Yeşille Aklama Örnekleri ve Açıklamaları

Sektör	Şirket	Örnek	Açıklama
Petrol	Royal Dutch Shell	CO ₂ 'yi çiçek yetiştirme kaynağı olarak gösteren reklam	Shell, karbon emisyonlarını çevreye zarar veren bir unsur yerine faydalı bir kaynak gibi sunarak algı yönetimi yapmıştır. Gerçek operasyonel emisyonlar raporlarda yüksek seviyede kalmıştır (Aggarwal & Kadyan, 2011).
Otomotiv	General Motors (GM)	"Gas-friendly to gas-free" kampanyası	GM, bu sloganla çevreci bir imaj çizmiş ancak fosil yakıtlı araç üretimi aynı dönemde devam etmiş, elektrikli araç oranı sınırlı kalmıştır (Aggarwal & Kadyan, 2011).
Gıda & İçecek	Nestlé	"Eco Shape" şişe iddiaları	Nestlé, ambalajın çevre dostu olduğunu iddia etmiş fakat üretim süreçlerindeki su ve karbon ayak iziyle ilgili şeffaf veri sunmamıştır (Aggarwal & Kadyan, 2011).
Elektronik	LG	Yanlış Energy Star etiketi	LG, bazı ürünlerinde Energy Star etiketi kullanarak enerji verimliliği iddiasında bulunmuş ancak bu sertifikaların doğruluğu daha sonra tartışmalı bulunmuştur (Aggarwal & Kadyan, 2011).
Tekstil & Moda	H&M	"Conscious Collection"	H&M, sürdürülebilir malzemelerden üretilen sınırlı koleksiyonları öne çıkarırken, hızlı moda modelinin yarattığı aşırı üretim ve atık sorununu göz ardı etmiştir (Pizzetti et al., 2021).
Finans	HSBC	"Net-zero investment" reklamları	HSBC, net sıfır hedeflerini vurgulayan kampanyalar yürütmüş ancak aynı dönemde yüksek karbonlu sektörler milyarlarca dolar kredi sağlamaya devam etmiştir (Feghali et al., 2025).
Havacılık	Lufthansa	"Fly greener" reklamı	Lufthansa, karbon dengeleme projelerini öne çıkararak uçuşların çevresel etkisini azaltmış gibi göstermiş ancak operasyonel emisyonlarında somut azalma sağlanmamıştır (European Commission, 2022).
Teknoloji	Apple	"Carbon neutral" ürün lansmanları	Apple, bazı ürünlerinde karbon nötr iddiasında bulunmuş ancak bu hedef büyük ölçüde ofset mekanizmalarına dayanmış ve gerçek operasyonel azaltımlar sınırlı kalmıştır (Feghali et al., 2025).

2.4.10 Yeşille Aklama Karşısında Mevzuat ve Düzenleyici Çerçeve

2.4.10.1 Avrupa Birliği'nde Yeşille Aklamanın Önlenmesine Yönelik Mevzuat

Avrupa Birliği (AB), sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda çevresel beyanların güvenilirliğini artırmak ve yeşille aklamayı önlemek amacıyla son yıllarda kapsamlı düzenlemeler geliştirmiştir (Tablo 9). AB düzeyindeki yasal çerçeve, hem tüketici haklarını koruma hem de şirketleri hesap verebilir kılma hedefiyle şekillenmiştir. Bu bağlamda, Haksız Ticari Uygulamalar Direktifi (Unfair Commercial Practices Directive - UCPD, 2005/29/EC) (EC, 2005) uzun süredir yürürlükte olan temel düzenlemelerden biridir. Bu direktif, tüketicilerin ekonomik davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilecek yanıltıcı çevresel beyanları "haksız uygulama" olarak tanımlamakta ve bu tür iddialara karşı yaptırım mekanizmaları öngörmektedir.

Yeşille aklama ile mücadelede daha somut ve güncel adımlar ise 2022 sonrası dönemde atılmıştır. Özellikle "Yeşil Dönüşüm İçin Tüketicilerin Güçlendirilmesi Direktifi" (Directive (EU) 2024/825) (EC, 2024), çevreye ilişkin genel iddiaların yalnızca doğrulanabilir ve kanıtlanabilir verilere dayanması gerektiğini açıkça belirtmektedir. Söz konusu düzenleme, "karbon nötr", "doğa dostu", "iklim pozitif" gibi ifadelere yönelik kullanım koşullarını sıkılaştırarak, şirketlerin geleceğe dönük, belirsiz ve desteklenmemiş iddialar ile tüketicileri yanıltmasını engellemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, gönüllü çevre etiketlerinin kullanımı da yalnızca üçüncü taraf doğrulaması varsa meşru kabul edilmektedir.

AB Komisyonu tarafından Mart 2023'te sunulan "Green Claims Directive (GCD)" taslağı (EC, 2023) ise, yeşil iddialara yönelik özel bir yasal çerçeve sunmaktadır. Bu düzenleme, işletmelerin sunduğu çevresel beyanların bilimsel temellere dayanması, açıkça tanımlanması ve bağımsız kuruluşlarca doğrulanması şartını getirmektedir. Ayrıca, çok sayıda etikete sahip olan mevcut pazarda tüketicilerin kafa karışıklığını gidermek amacıyla etiket enflasyonuna karşı önlemler öngörülmekte, yalnızca onaylı etiket sistemlerinin kullanımına izin verilmektedir.

Sürdürülebilir ürünlerin tasarımı ve çevresel etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesi için yürürlüğe giren Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Tüzüğü (Ecodesign for Sustainable Products Regulation - ESPR) (EC, 2022) da yeşille aklamayı dolaylı olarak önleyici bir işlev görmektedir. Bu tüzük, ürünlerin çevresel performans bilgilerinin dijital ürün pasaportu (Digital Product Passport) ile izlenmesini ve karşılaştırmalı biçimde sunulmasını zorunlu kılarak, yanıltıcı iddiaların önüne geçmeyi hedeflemektedir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında geliştirilen bu düzenlemeler, çevresel söylemlerin kurumsal stratejilerde sorumlulukla bütünleştirilmesini teşvik ederken, aynı zamanda şeffaflık, izlenebilirlik ve hesap verebilirlik ilkelerini hukuki düzeyde zorunlu kılmaktadır. Böylece, yeşille aklama ile mücadele yalnızca etik bir tercih olmaktan çıkarılıp, hukuki bir zorunluluğa dönüştürülmektedir.

Tablo 9. Avrupa Birliği'nde Yeşille Aklamaya Yönelik Temel Düzenlemeler

Düzenleme	Kapsamı	Yeşille Aklama ile İlişkisi
UCPD – Haksız Ticari Uygulamalar Direktifi (2005/29/EC)	Tüm ticari iletişimlerde tüketiciyi aldatmaya yönelik uygulamaların engellenmesi	Belirsiz veya yanıltıcı çevresel beyanların "haksız ticari uygulama" sayılmasını sağlar. Çevresel iddialar da dâhil olmak üzere tüketiciyi etkileyen yanlış yönlendirmeleri kapsar.
Tüketicilerin Yeşil Dönüşüm İçin Güçlendirilmesi Direktifi (2024/825)	Ürünlerin çevresel niteliklerine ilişkin bilgilendirme, dayanıklılık ve onarılabilirlik açıklamaları	"Karbon nötr", "iklim dostu" gibi genel ifadelerin yalnızca bilimsel temelli ve doğrulanabilir olması koşulunu getirir. Onaysız çevre etiketlerini kısıtlar.
Yeşil İddialar Direktifi – Green Claims Directive (Taslak, 2023)	Tüm gönüllü çevresel beyanların geçerlilik koşullarının ve doğrulama süreçlerinin tanımlanması	Şirketlerin ürünlerine veya faaliyetlerine dair sundukları çevresel iddiaların bilimsel, ölçülebilir ve üçüncü tarafça doğrulanmış olmasını şart koşar.
ESPR – Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Tüzüğü	Ürünlerin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel performansının tasarıma entegre edilmesi	Ürün performansının dijital pasaportla izlenmesini zorunlu kılarak yeşil iddiaların doğrulanabilirliğini artırır. Dolaylı olarak yeşille aklamayı önler.

Tablo 9’te özetlenen düzenlemeler, Avrupa Birliği’nin yeşille aklamaya karşı çok katmanlı ve sistematik bir yaklaşım benimsediğini göstermektedir. Bu çerçeve, yalnızca haksız ticari uygulamaları sınırlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel iddiaların bilimsel doğruluğunu, şeffaflığını ve izlenebilirliğini hukuki yükümlülük haline getirmektedir. Özellikle Yeşil İddialar Direktifi ve ESPR gibi yeni kuşak düzenlemeler, firmaların pazarlama stratejileri ile gerçek çevresel performansları arasındaki boşluğu daraltmayı hedeflemektedir. Bu düzenleyici dönüşüm, çevresel beyanları manipülasyon aracı olmaktan çıkarıp, kurumsal sürdürülebilirliğin hesap verebilir bileşenleri haline getirme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, bu çerçevenin etkinliğinin uygulama, denetim ve cezai yaptırımların işlerliği ile doğrudan ilişkili olduğu da unutulmamalıdır.

2.4.10.2 Uluslararası Standartlar ve Kurumsal Çerçeveler

Yeşille aklamaya karşı geliştirilen düzenleyici çabalar yalnızca yasal mevzuatla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda uluslararası düzeyde kabul görmüş standartlar ve raporlama çerçeveleri aracılığıyla kurumsal davranışı yönlendirmektedir (Tablo 10). Bu standartlar, şirketlerin çevresel beyanlarında şeffaflık, tutarlılık ve doğrulanabilirlik ilkelerini esas alarak yeşille aklamanın önlenmesine katkı sunmaktadır.

Özellikle ISO 14000 serisi çevre yönetim sistemlerine ilişkin gönüllü standartlar kümesi, kurumsal çevresel performansın ölçülmesi ve iletilmesinde temel referans noktası haline gelmiştir. ISO 14021 standardı, özellikle “çevreye ilişkin kendi beyanlı iddialar” (self-declared environmental claims) konusuna odaklanmakta ve “geri dönüştürülebilir”, “doğa dostu” gibi iddiaların nasıl sunulması gerektiğine dair teknik kriterler tanımlamaktadır. ISO 14024 ise üçüncü taraf onaylı eko-etiketleme sistemlerini tanımlar ve gönüllü olarak uygulanan çevre etiketlerinin güvenilirliğini artırmayı amaçlar. Ürün karbon ayak izinin ölçümü için geliştirilen ISO 14067 standardı da, karbon nötr iddialarının doğrulanmasında uluslararası kabul görmüş bir çerçeve sunmaktadır.

Kurumsal düzeyde sürdürülebilirlik raporlamasına yönelik çeşitli çerçeveler de yeşille aklamanın önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Global Reporting Initiative (GRI), çevresel etkilerin nicel ve nitel biçimde raporlanmasını teşvik ederken, özellikle “uygunluk” ve “doğrulama” kriterlerine vurgu yaparak iddiaların temellendirilmesini zorunlu kılar. SASB (Sustainability Accounting Standards Board) ise sektöre özgü metriklerle şirketlerin maddi çevresel etkilerini açıkça tanımlamalarını hedefler. Bu çerçeveler, ISSB’nin 2023’te yayımladığı IFRS S1 ve S2 standartlarıyla entegre hale gelmiş, sürdürülebilirlik beyanlarının finansal raporlamayla tutarlı, karşılaştırılabilir ve denetlenebilir olmasını sağlamıştır.

Avrupa’da geliştirilen ESRS (European Sustainability Reporting Standards) çerçevesi, çevresel beyanlara yönelik çift yönlü önemlilik (double materiality), ileriye dönük senaryo açıklamaları ve etki bazlı göstergeler aracılığıyla yeşille aklamayı önleyici yönde önemli araçlar sunmaktadır. Türkiye’de bu çerçeve, Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS) ile uyumlaştırılmaktadır. Bu süreç, yeşil iddiaların finansal, yönetişimsel ve çevresel performansla bağdaştırılmasını teşvik etmekte ve şirketleri kamuoyuna karşı hesap verebilir kılmaktadır.

Ayrıca TCFD (Task Force on Climate-Related Financial Disclosures) tarafından geliştirilen iklimle ilgili risk açıklama ilkeleri, özellikle yeşil finansman alanında yeşille aklama riskine karşı önleyici bir şeffaflık mekanizması olarak işlev görmektedir. Risk, strateji, yönetim ve metrik-açıklamalar çerçevesinde yapılandırılan bu beyan formatı, çevresel vaatlerin operasyonel ve finansal gerçekliklerle ne ölçüde uyumlu olduğunu değerlendirmek için denetleyicilere ve yatırımcılara somut bir araç sunmaktadır.

Uluslararası standartlar ve raporlama çerçeveleri, yalnızca iyi niyetli raporlama uygulamalarını teşvik etmekle kalmayıp, aynı zamanda şirketlerin yeşille aklama risklerine karşı sorumlu bir beyan sistemi kurmasını sağlayan teknik ve kurumsal altyapıyı da oluşturmaktadır.

Tablo 10. Uluslararası Standartlar ve Raporlama Çerçevelerinin Yeşille Aklamayla Mücadelede Rolü

Standart / Çerçeve	Kapsamı	Yeşille Aklamayla Mücadelede Rolü
ISO 14021	Kendi beyanlı çevresel iddialar (ör. "geri dönüştürülebilir", "çevre dostu")	İddiaların içerik, doğruluk ve sunum biçimi açısından teknik kriterlere uygunluğunu zorunlu kılar. Belirsiz ve kanıtsız ifadeleri sınırlamayı hedefler.
ISO 14024	Üçüncü taraf onaylı çevre etiketleme sistemleri	Güvenilir eko-etiketlerin kullanımını teşvik eder; sahte, gönüllü ve denetlenmeyen etiketlerin yayılmasını engeller.
ISO 14067	Ürün karbon ayak izi hesaplaması	"Karbon nötr" gibi ifadelerin bilimsel hesaplama ve doğrulanabilirliğe dayanmasını sağlar.
GRI (Global Reporting Initiative)	Kapsamlı sürdürülebilirlik raporlaması	Doğrulanabilir ve karşılaştırılabilir çevresel bilgi sunumunu teşvik eder. Şeffaflık eksikliğine dayalı yeşille aklamayı azaltır.
SASB	Sektör temelli sürdürülebilirlik göstergeleri	Her sektör için maddi (material) çevresel konuları tanımlar, genel-geçer iddiaların sınırlandırılmasına katkı sağlar.
IFRS S1–S2 (ISSB)	Sürdürülebilirlik ve iklimle ilgili finansal açıklamalar	Kurumsal beyanların finansal raporlamayla entegre edilmesini sağlar. Sembolik ve stratejik odak saptırma türü yeşille aklamayı önlemeye yöneliktir.
ESRS (European Sustainability Reporting Standards)	AB düzeyinde sürdürülebilirlik raporlaması	Çift yönlü önemlilik, etkisel göstergeler ve denetlenebilir veri setleriyle yeşil iddiaların denetimini güçlendirir.
TSRS (Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları)	Türkiye'de ESRS uyumlu sürdürülebilirlik raporlaması	Kurumsal beyanların doğruluğu, karşılaştırılabilirliği ve açıklık düzeyi üzerinden yeşille aklamayı sınırlandırır.
TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures)	İklimle ilgili risk, strateji, yönetim ve metrik açıklamaları	Kurumların çevresel vaatlerinin operasyonel ve finansal risklerle ne derece uyumlu olduğunu değerlendirmeye olanak tanır.

2.4.10.3 Türkiye'de Mevzuat Gelişmeleri

Türkiye'de yeşille aklamaya karşı doğrudan geliştirilmiş özgün bir düzenleyici çerçeve henüz bulunmamakla birlikte, çeşitli sektörleri kapsayan mevcut yasal düzenlemeler, reklam denetim mekanizmaları ve sürdürülebilirlik raporlama standartları dolaylı yollarla bu tür uygulamaların sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır (Tablo 11). Yeşille aklamaya karşı hukuki dayanaklar, öncelikle Türk Ticaret Kanunu, Reklam Kurulu Kararları, Çevre Etiket Yönetmeliği, Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS) ve son dönemde giderek önem kazanan emisyon ticareti ve SKDM (Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması) uygulamalarında kendini göstermektedir.

Türk Ticaret Kanunu'nun (TTK) 55. maddesi, "dürüstlük kuralına aykırı reklam" ve "tüketiciyi yanıltıcı ticari uygulamalar" kapsamında çevresel nitelik taşıyan doğrulanamaz beyanları da kapsayacak şekilde yorumlanabilmektedir (TTK, 2011). Özellikle "kendini rakiplerinden üstün gösterme", "eksik bilgilendirme" ve "gerçek dışı üstünlük iddiası" gibi fiiller, yeşille aklamanın söylemsel ve görsel manipölasyon biçimlerini kapsar niteliktedir. Bu çerçevede, çevreci iddiaların da ticari aldatma suçu kapsamında değerlendirilebilmesi mümkündür.

Reklam Kurulu ise yeşille aklamaya ilişkin en görünür denetim organıdır. Son yıllarda giderek artan biçimde, "doğa dostu", "çevreye zarar vermez", "karbon nötr" gibi ifadelerin hangi ölçütlere dayandığını belgeleyemeyen kampanyalara yönelik idari yaptırım kararları alınmıştır (Ticaret Bakanlığı, 2023). Bu kararlar, Türkiye'de yeşil iddiaların içeriğinin şeffaf, ölçülebilir ve ispat edilebilir olmasına yönelik yargısal bir içtihat oluşturmaktadır. Ancak bu denetimler daha çok şikâyeteye dayalı ve geriye dönük çalıştığı için önleyici bir etki yaratmakta sınırlı kalmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen Çevre Etiket Yönetmeliği (2018) (ÇŞİDB, 2018) ise gönüllü bir sistem olmakla birlikte, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirerek bilimsel esaslara dayalı etiketleme sunmayı hedeflemektedir. Bu sistem, özellikle ISO 14024 standardına dayalı üçüncü taraf onaylı eko-etiketlerin teşvik edilmesi açısından önemlidir ve sahte veya anlamsız etiketlerin yaygınlaşmasını önlemeyi amaçlar.

Kurumsal düzeyde ise, Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS) 2024 yılı itibarıyla yürürlüğe girmiş olup, özellikle büyük işletmeler için çevresel, sosyal ve yönetişimsel (ÇSY/ESG) beyanların kapsamlı biçimde açıklanmasını zorunlu kılmaktadır. TSRS, ESRS ile uyumlu olarak geliştirilmiş olup, yeşille aklamanın önlenmesine yönelik etkili bir kurumsal raporlama altyapısı sunmaktadır. Çifte önemlilik (double materiality), etki bazlı metrikler ve ileriye dönük hedeflerin beyanı gibi unsurlar, çevresel iddiaların manipölatif biçimlerde sunulmasını zorlaştırmaktadır (KGK, 2023).

Son olarak, Türkiye'nin 2023 itibarıyla yeniden yapılandırma sürecine girdiği Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve SKDM'ye uyum çalışmaları, şirketlerin emisyon verilerini şeffaf ve doğrulanabilir biçimde raporlamasını gerektirmekte ve bu yönüyle karbon ayak izi temelli yeşille aklama vakalarına karşı caydırıcı bir işlev görmektedir.

Tüm bu gelişmelere karşın, Türkiye'deki mevcut düzenlemelerin hâlâ parçalı, gönüllülük esasına dayalı ve kurumsal kapasite açısından sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle yeşille aklamanın önlenmesi için hem mevzuatın bütüncül bir çerçevede ele alınması hem de denetim ve yaptırım mekanizmalarının güçlendirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Tablo 11.Türkiye’de Yeşille Aklamaya İlişkin Mevzuat ve Kurumsal Çerçeve

Düzenleme / Kurum	Kapsamı	Yeşille Aklamayla İlişkisi
Türk Ticaret Kanunu (TTK) m.55	Haksız rekabet, aldatıcı reklam, ticari dürüstlük kuralları	Doğrulanamayan çevreci iddialar, yanıltıcı üstünlük beyanları ve eksik bilgilendirme durumları TTK kapsamında haksız rekabet olarak değerlendirilebilir.
Reklam Kurulu Kararları	Ticari reklamların içeriğinin denetimi ve yanıltıcı uygulamalara karşı yaptırım	“Doğa dostu”, “çevreye zarar vermez” gibi ifadelerin ölçülebilir ve ispatlanabilir olmadığı durumlarda idari yaptırımlar uygulanmıştır.
Çevre Etiket Yönetmeliği (2018)	Gönüllü eko-etiket sistemi; ürünün çevresel performansına dair bilimsel değerlendirme	ISO 14024 standardına dayanır. Anlamsız, doğrulanmamış veya taklit etiketlere karşı güvenilir etiketleme sunar.
Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS)	Kurumsal düzeyde çevresel, sosyal ve yönetimsel (ÇSY) beyanların raporlanması	ESRS ile uyumlu olarak geliştirilmiştir. İleriye dönük hedeflerin ve etki metriklerin açıklanmasını zorunlu kılar. Şirketlerin yeşil iddialarını şeffaf biçimde temellendirmelerini sağlar.
Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve SKDM Uyum Süreci	Emisyonların ölçümü, raporlanması ve doğrulanması; sektör bazlı karbon izleme	“Karbon nötr” gibi iddiaların bağımsız ölçüm ve doğrulama gerekliliğini artırarak karbon temelli yeşille aklamayı sınırlayıcı bir işlev görür.

2.4.10.4 Düzenleyici Gelişmelerin Yetersizlikleri ve Riskler

Yeşille aklamaya karşı geliştirilen düzenleyici araçlar, hem Avrupa Birliği’nde hem de Türkiye’de önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da, bu çabaların uygulamada karşılaştığı bazı yapısal ve işlevsel sınırlılıklar dikkate değerdir. Gerek mevzuatların tasarımı gerekse denetim ve yaptırım süreçlerinin yeterliliği açısından sistemin bütüncül, etkili ve önleyici bir yapı oluşturduğu henüz söylenemez. Bu durum, yeşille aklamanın daha sofistike ve dolaylı biçimlerinin çoğalmasına zemin hazırlamaktadır.

İlk olarak, çoğu düzenleme hâlâ gönüllülük esasına dayalıdır ve özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için bağlayıcı olmayan raporlama veya etiketleme sistemlerine dayanmaktadır. Bu gönüllülük, yalnızca şeffaflık kültürünü geliştirmekte yetersiz kalmakla kalmamakta, aynı zamanda firmaların çevresel performanslarını sembolik düzeyde açıklayıp yapısal dönüşümden kaçınmalarını da mümkün kılmaktadır (Delmas & Burbano, 2011). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, politika yapımcıların piyasa teşviklerine dayalı yumuşak önlemleri tercih etmesi, zorlayıcı düzenlemelerin hayata geçmesini geciktirmektedir.

İkinci olarak, denetim ve doğrulama mekanizmalarının zayıflığı, çevresel beyanların güvenilirliğini sınırlayan temel bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Avrupa’da bile, Green Claims Directive gibi düzenlemeler hâlen yürürlüğe girmemiştir ve uygulanabilirlikleri üye devletlerin iç denetim kapasitelerine bağlıdır. Türkiye özelinde ise, Reklam Kurulu kararları geriye dönük ve şikâyet temelli işlediği için önleyici bir etki yaratma potansiyeli sınırlıdır. Ayrıca, TSRS gibi yeni raporlama sistemlerinin yaygın ve etkili bir şekilde uygulanması için şirket içi bilgi sistemlerinin, uzman kadroların ve bağımsız denetim ağlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Bir diğer önemli risk, düzenlemelerin yalnızca doğrudan beyanlara odaklanmasıdır. Oysa yeşille aklama, artık sadece "yanlış bilgi verme" değil; aynı zamanda bilgi gizleme (greenhushing), aşırı genelleştirme, geleceğe dönük desteklenmemiş vaatlerde bulunma ve dolaylı sorumluluk transferi (vicarious greenwashing) gibi çok katmanlı biçimlerde ortaya çıkmaktadır (Feghali et al., 2025; Pizzetti et al., 2021). Mevcut düzenleyici çerçeveler bu yeni taktikleri kavramsal olarak yeterince ele alamamakta; bu da yeşille aklamanın daha sofistike formlarla devam etmesine neden olmaktadır.

Son olarak, kurumsal kapasite eksiklikleri ve dijital izlenebilirlik altyapısının yetersizliği, özellikle tedarik zincirinin alt halkalarında yapılan çevresel beyanların doğrulanmasını neredeyse imkânsız hâle getirmektedir. Sürdürülebilir ürünlerin yaşam döngüsünü izlemeye yönelik dijital pasaportlar ve blockchain tabanlı sistemler, henüz yaygınlaşmamıştır. Bu da yeşil etiketlerin denetimsiz kullanımına ve etki temelli performansın ölçülmeden göz ardı edilmesine yol açmaktadır.

Tüm bu nedenlerle, yeşille aklamayı önlemeye yönelik düzenlemelerin yalnızca mevzuat düzeyinde değil, aynı zamanda uygulama kapasitesi, dijital sistem altyapısı, denetim araçları ve cezai mekanizmalarla birlikte güçlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, sürdürülebilirlik iddiaları toplum nezdinde itibar kaybına uğrayacak ve çevresel yönetim açısından ciddi bir güven krizine yol açabilecektir.

Yeşille aklama (greenwashing), sürdürülebilirlik söyleminin yaygınlaştığı günümüzde hem tüketiciler hem de yatırımcılar nezdinde güven kaybı yaratabilecek en kritik kurumsal risk alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, yeşille aklamayı yalnızca etik dışı bir pazarlama stratejisi değil, aynı zamanda bilgi ve iletişim etiği ihlali bağlamında çok boyutlu bir yanıltma pratiği olarak ele almıştır. Literatürde yer alan kuramsal çerçeveler, kavramsal ayrımlar ve sektörel örnekler üzerinden yapılan analizler göstermektedir ki yeşille aklama pratikleri ürün, işletme ve sistem düzeyinde farklı biçimlerde ve yoğunluklarda ortaya çıkmakta; özellikle söylemsel manipülasyonlar, belirsiz iddialar ve stratejik odak saptırma yöntemleri bu tür uygulamaların temel yapıtaşlarını oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın ilk bölümlerinde ortaya konan tipoloji ve sözlük çalışmaları, yeşille aklamanın artık yalnızca açık yanıltma biçimleriyle sınırlı kalmadığını; aksine greenhushing (sessizlik), greencrowding (kalabalığa karışma), greenrinsing (vaat yenileme) gibi daha karmaşık, dolaylı ve düşük görünürlüklü biçimlerin yaygınlaştığını göstermektedir. Bu kavramlar, şirketlerin çevresel performanslarına dair bilgi üretme, sunma ve saklama stratejilerinin ne derece politize ve hesaplanmış hale geldiğini göstermektedir.

Sektörel örnekler üzerinden yapılan çözümleme, yeşille aklamanın yalnızca niyet temelli bireysel bir etik sorun olmadığını, aksine kurumsal strateji, yönetim modeli ve düzenleyici bağlamla doğrudan ilişkili bir yapısal mesele olduğunu ortaya koymaktadır. Enerji, finans, tekstil ve elektronik gibi sektörlerdeki vakalar, çevre dostu imaj oluşturma'nın çoğu zaman gerçek çevresel etkilerin dönüşümünden daha öncelikli bir hedef haline geldiğini göstermektedir.

Bu bağlamda düzenleyici çerçevenin rolü kritik bir noktada yer almakta; ancak AB'deki gelişmelere rağmen birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de bu alanda hâlâ önemli boşluklar mevcuttur. Gönüllü sistemlerin ağırlıkta olması, denetim kapasitesinin sınırlılığı, dijital izlenebilirlik araçlarının yeterince kullanılmaması ve çevresel iddiaların yalnızca sembolik düzeyde değerlendirilmesi, düzenlemelerin etki gücünü zayıflatmaktadır.

Tüm bu bulgular ışığında, yeşille aklamayla mücadele yalnızca etik çağrılarla değil, hukuki yaptırımlar, bağımsız doğrulama mekanizmaları, şeffaf raporlama sistemleri ve eleştirel medya okuryazarlığını da içeren çok katmanlı

bir strateji ile yürütülmelidir. Ayrıca sürdürülebilirlik iletişimi, yalnızca çevresel başarıların duyurulduğu bir alan olmaktan çıkarılarak, sistemik etkilerin ve sınırların da açıkça tartışıldığı, hesap verilebilir bir kamusal diyalog alanına dönüşmelidir.

Bu çalışmanın ortaya koyduğu kavramsal çerçeve, tanımlar, örnekler ve düzenleyici değerlendirmeler, hem politika yapıcılar hem de kurumsal aktörler için somut bir referans noktası sunmayı hedeflemektedir. Sürdürülebilirliğin gerçekten dönüştürücü bir potansiyele sahip olabilmesi için, yeşille aklamaya karşı kolektif farkındalık ve yapısal müdahale eş zamanlı olarak inşa edilmelidir.

2.4.10.5 Referanslar

- Aggarwal, P., & Kadyan, A. (2011). Greenwashing: The darker side of CSR. *Indian Journal of Applied Research*, 4(3), 61–66. <https://doi.org/10.15373/2249555X/MAR2014/20>
- Akerlof, G. A. (1970). The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, 84(3), 488–500. <https://doi.org/10.2307/1879431>
- Bhullar, P. S., Joshi, M., Sharma, S., Kaur, A., & Phan, D. (2025). Greenwashing and ESG: Bibliometric analysis and future research agenda. *Pacific-Basin Finance Journal*, 93, 102846. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2025.102846>
- Brunsson, N. (1993). Ideas and actions: Justification and hypocrisy as alternatives to control. *Accounting, Organizations and Society*, 18(6), 489–506. [https://doi.org/10.1016/0361-3682\(93\)90001-N](https://doi.org/10.1016/0361-3682(93)90001-N)
- Cheng, Z., & Yan, X. (2025). Environmental management system certification and corporate ESG greenwashing. *Energy Economics*, 149, 108800. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108800>
- ÇŞİDB (2018) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Çevre Etiket Yönetmeliği*. Resmî Gazete No. 30457. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/10/20181019-5.htm>
- de Freitas Netto, S. V., Sobral, M. F. F., Ribeiro, A. R. B., & Soares, G. R. L. (2020). Concepts and forms of greenwashing: A systematic review. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3>
- de Grefte, J., & de Bruin, B. (2025). Sustainable finance, biodiversity, and greenwashing: How contested values, metrics, and causation facilitate information distortion, information omission, and information pollution. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 74, 101522. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2025.101522>
- Delmas, M. A., & Burbano, V. C. (2011). The drivers of greenwashing. *California Management Review*, 54(1), 64–87.
- EC, European Commission. (2005). *Directive 2005/29/EC of the European Parliament and of the Council of 11 May 2005 concerning unfair business-to-consumer commercial practices in the internal market (Unfair Commercial Practices Directive)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32005L0029>

- EC, European Commission. (2023). *Proposal for a Directive on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive)*. COM(2023) 166 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0166>
- EC, European Commission. (2024). *Directive (EU) 2024/825 of the European Parliament and of the Council of 28 February 2024 on empowering consumers for the green transition through better protection against unfair practices and better information*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L0825>
- EC, European Commission. (2022). *Proposal for a Regulation on Ecodesign for Sustainable Products (ESPR)*. COM(2022) 142 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0142>
- ESMA (2024). European Securities and Markets Authority, *Final report on greenwashing: Progress report and supervisory convergence*. ESMA36-287652198-2699. Retrieved from <https://www.esma.europa.eu>
- Fang, C., Wang, Z., & Zhao, L. (2025). Environmental regulations and the greenwashing of corporate ESG reports. *Economic Analysis and Policy*, 87, 1469–1481. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2025.07.030>
- Feghali, K., Najem, R., & Metcalfe, B. D. (2025). Greenwashing in the era of sustainability: A systematic literature review. *Corporate Governance and Sustainability Review*, 9(1), 18–31. <https://doi.org/10.22495/cgsrv9i1p2>
- Forliano, C. (2025). Greenwashing and corporate hypocrisy: A systematic review and research agenda. *Journal of Business Research*, 172, 114091. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114091>
- Gatti, L., Conti, L. G., & Seele, P. (2023). Introduction to greenwashing. In *A comprehensive guide to greenwashing phenomena, contexts, and trends* (pp. 1–20). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781035328246>
- Greer, J., & Bruno, K. (1996). *Greenwash: The reality behind corporate environmentalism*. Penang, Malaysia: Third World Network.
- Hartmann, P., & Apaolaza-Ibáñez, V. (2012). Consumer attitude and purchase intention toward green energy brands: The roles of psychological benefits and environmental concern. *Journal of Business Research*, 65(9), 1254–1263.
- Hao, X., Tian, T., Dong, L., Wong, C. W. Y., & Lai, K.-h. (2025). Unmasking greenwashing in ESG disclosure: Insights from evolutionary game analysis. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06538-3>
- Inês, A., Diniz, A., & Moreira, A. C. (2023). A review of greenwashing and supply chain management: Challenges ahead. *Cleaner Environmental Systems*, 11, 100136. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100136>
- KGK (2023) Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (KGK). (2023). *Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları – TSRS 1 ve TSRS 2*. <https://www.kgk.gov.tr>
- Lubloy, Á., Keresztúri, J. L., & Berlinger, E. (2025). Quantifying firm-level greenwashing: A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 373, 123399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123399>
- Lyon, T. P., & Maxwell, J. W. (2011). Greenwash: Corporate environmental disclosure under threat of audit. *Journal of Economics & Management Strategy*, 20(1), 3–41. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9134.2010.00282.x>
- Lyon, T. P., & Montgomery, A. W. (2015). The means and end of greenwash. *Organization & Environment*, 28(2), 223–249.

- Lyon, T. P., & Montgomery, A. W. (2023). Greenwash in the digital age. *Journal of Business Ethics*, 187(1), 15-32.
- Marquis, C., Toffel, M. W., & Zhou, Y. (2016). Scrutiny, norms, and selective disclosure: A global study of greenwashing. *Organization Science*, 27(2), 483–504.
- Meenakshi, N., Dhir, A., Shah, P., Nicolau, J. L., & Kaur, P. (2025). Conceptualization of greenwashing in the hospitality industry. *International Journal of Hospitality Management*, 131, 104255.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2025.104255>
- Meyer, J. W., & Rowan, B. (1977). Institutionalized organizations: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology*, 83(2), 340–363. <https://doi.org/10.1086/226550>
- Nyilasy, G., Gangadharbatla, H., & Paladino, A. (2014). Greenwashing: A consumer perspective. *Journal of Business Ethics*, 125(4), 693-707.
- Parguel, B., Benoît-Moreau, F., & Larceneux, F. (2011). How sustainability ratings might deter greenwashing: A closer look at ethical corporate communication. *Journal of Business Ethics*, 102(1), 15-28.
- Pedersen, E. R. G., & Reitan Andersen, K. (2023). Greenwashing: A Broken Business Model. *Journal of Business Models*, 11(2), 11-24. <https://doi.org/10.54337/jbm.v11i2.7352>
- Pizzetti, M., Gatti, L., & Seele, P. (2021). Greenwashing revisited: In search of a typology and accusation-based definition. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 3569–3583.
- Rasche, A. (2025). The concepts of greenwashing and greenhushing. In *Expert Essentials*. Oxford University Press.
- Spaniol, M. J., Danilova-Jensen, E., Nielsen, M., Rosdahl, C. G., & Schmidt, C. J. (2024). Defining greenwashing: A concept analysis. *Sustainability*, 16(20), 9055. <https://doi.org/10.3390/su16209055>
- TerraChoice. (2010). *The sins of greenwashing: A Report on Environmental claims made in the North American consumer market*. TerraChoice Environmental Marketing Inc. Underwriters Laboratories.
- Testa, F., Iraldo, F., Vaccari, A., & Ferrari, E. (2015). Why eco-labels can be effective marketing tools: Evidence from a study on Italian consumers. *Business Strategy and the Environment*, 24(4), 252-265.
- Ticaret Bakanlığı. (2023). *Reklam Kurulu Kararları ve Tüketici Şikâyetleri Raporu*. <https://www.ticaret.gov.tr>
- TTK (2011) Rekabetin Korunması Hakkında Türk Ticaret Kanunu [TTK], No. 6102 (14 Şubat 2011). Resmî Gazete No. 27846. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6102.pdf>
- Walker, K., & Wan, F. (2012). The harm of symbolic actions and green-washing: Corporate actions and communications on environmental performance and their financial implications. *Journal of Business Ethics*, 109(2), 227-242.
- Zhang, L., Li, X., Wang, Y., & Zhou, W. (2025). The impact of green finance policies on corporate greenwashing: Evidence from China. *Energy Economics*, 129, 107487. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.107487>

2.5 E-Verimlilik Odaklı Sürdürülebilirlik Stratejileri

2.5.1 E-Verimlilik Nedir? Kavramsal Çerçeve ve Tanımlar

2.5.1.1 Dijital Verimlilik ve Güvenin Stratejik Önemi

Dijitalleşme çağında, e-verimlilik kavramı yalnızca hizmetlerin çevrimiçi ortamda etkin bir şekilde sunulmasını değil, aynı zamanda bu hizmetlere duyulan güvenin inşasını da içermektedir. Soleimani'nin (2022) e-ticaret platformları üzerine yaptığı kapsamlı literatür incelemesi, güvenin fiyat faktörlerinin ötesinde tüketici kararlarını doğrudan şekillendirdiğini göstermektedir. Çalışma, tüketicilerin yalnızca ürün ve hizmet kalitesine değil, aynı zamanda veri gizliliği, güvenlik altyapısı, platformların şeffaflığı ve kullanıcı deneyimine de önem verdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle güven, e-verimlilik kavramının merkezinde yer alan ve hizmetlerin sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen bir unsur olarak görülmektedir.

Pandemi süreci, güven–e-verimlilik ilişkisinin önemini daha da artırmıştır. Pawlicka ve arkadaşlarının (2022) çalışması, COVID-19 döneminde dijital becerilerin hem profesyonel hem de kişisel yaşamda daha yaygın hale geldiğini ve bu becerilerin güven algısıyla doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda dijital yeterlilik, yalnızca teknik bilgi düzeyi değil, aynı zamanda kullanıcıların eleştirel düşünme becerileri, dijital ortamlara yönelik tutumları ve fırsatları değerlendirme yetenekleriyle ilişkilendirilmiştir. Avrupa Parlamentosu'nun geliştirdiği Dijital Yeterlilik Çerçevesi (DigComp), bu ilişkiyi beş ana kategori ve 21 beceri üzerinden somutlaştırırken, Türkiye'de de dijitalleşme politikaları kapsamında benzer yönelimlerin hız kazandığı görülmektedir.

Türkiye özelinde, Ticaret Bakanlığı'nın Elektronik Ticaret Bilgi Sistemi (ETBİS) verileri, pandemi döneminde e-ticaret hacminin hızla büyüdüğünü ve güven–e-verimlilik ilişkisinin somut bir şekilde ortaya çıktığını göstermektedir. Ancak bu büyüme, aynı zamanda tüketicilerin gizlilik, veri güvenliği ve şeffaflık beklentilerini artırmış; platformların verimlilik stratejilerinde güvenin kritik rolünü pekiştirmiştir.

2.5.1.2 Türkiye'de E-Verimlilik ve Enerji Politikalarıyla Bağlantısı

E-verimlilik yalnızca ticaretle sınırlı bir kavram değildir. Angerer ve arkadaşlarının (2022) dijital sağlık üzerine yaptığı araştırma, dijitalleşmenin güven ve verimlilik ilişkisini sağlık sektöründe de dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır. Türkiye'de pandemi döneminde hızla benimsenen dijital sağlık uygulamaları (e-Nabız, HES kodu gibi) vatandaşların hizmetlere erişiminde hem verimliliği artırmış hem de güven boyutunu güçlendirmiştir. Bu örnek, e-verimlilik kavramının sektörler üstü bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017–2023) ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefleri, e-verimlilik kavramını stratejik bir politika boyutuna taşımaktadır. Akıllı sayaçlar, karbon izleme yazılımları ve dijital enerji yönetim platformları, hem güvenilir veri üretimi hem de enerji piyasasında şeffaflık açısından kritik araçlar haline gelmiştir. Bu bağlamda, Qing ve Jin'in (2023) çalışmasında vurgulanan dijital dönüşüm ile sürdürülebilirlik arasındaki bağlantı, Türkiye'nin enerji politikalarında doğrudan karşılık bulmaktadır. Dijitalleşme, yalnızca maliyetleri düşüren veya verimliliği artıran bir unsur değil; aynı zamanda güven inşası ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesi için stratejik bir araçtır.

2.5.1.3 Çevrimiçi Güvenin Çok Boyutlu Dinamikleri

Soleimani (2022), güvenin çevrimiçi ortamlarda hem somut faktörler (teknoloji altyapısı, güvenlik protokolleri, blokzincir uygulamaları) hem de soyut faktörler (marka itibarı, kullanıcı deneyimi, şeffaflık) aracılığıyla şekillendiğini belirtmektedir. Türkiye’de ise bu iki faktörün birleşimi, özellikle enerji ve finans sektörlerinde daha belirgin hale gelmektedir. Örneğin, Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) çerçevesinde alınan önlemler, tüketicilerin platformlara olan güvenini artırmıştır. Aynı şekilde, dijital finansman modelleri ve yeşil finans uygulamaları, hem küçük hem de orta ölçekli işletmelerin finansmana erişimini kolaylaştırarak güven-verimlilik ilişkisinin ekonomik boyutunu güçlendirmiştir.

Bu noktada, Wang ve Hou’nun (2024) çalışması da dikkat çekicidir. Araştırma, dijitalleşmenin yönetim ve sosyal boyutlarda kurumsal performansı artırdığını, ancak çevresel performans üzerindeki etkilerin daha karmaşık ve uzun vadeli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Türkiye’de enerji dönüşümü ve 2053 hedefleri kapsamında, dijitalleşme yatırımlarının yalnızca kısa vadeli verimlilik kazanımlarına değil; uzun vadeli güven ve sürdürülebilirlik stratejilerine de entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

2.5.1.4 Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Literatür genelinde görüldüğü üzere, güven unsuru e-verimlilik kavramının ayrılmaz bir parçasıdır (Soleimani, 2022; Pawlicka et al., 2022; Angerer et al., 2022; Qing ve Jin, 2023; Wang ve Hou, 2024). Türkiye’de dijitalleşme, yalnızca e-ticaret veya sağlık sektöründe değil, enerji ve kamu hizmetleri bağlamında da güven-verimlilik ilişkisini yeniden tanımlamaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın dijital dönüşüm projeleri, bu ilişkiyi ulusal politikaların bir parçası haline getirmiştir.

Gelecekte yapılacak araştırmaların, güven-e-verimlilik bağlantısını yalnızca tüketici davranışı perspektifinden değil; aynı zamanda enerji yönetimi, kamu hizmetleri ve sürdürülebilirlik politikaları bağlamında ele alması kritik olacaktır. Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Hedefleri doğrultusunda, dijitalleşme ve güvenin birlikte ele alınması, ulusal sürdürülebilirlik stratejilerinin başarısı için vazgeçilmezdir.

2.5.2 Enerji Yönetimi, Dijitalleşme ve Karbon Azaltım Stratejileri

Enerji yönetimi, dijitalleşme ve karbon azaltım stratejileri üzerine yapılan akademik çalışmalar, günümüzde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin sürdürülebilirlik politikalarını şekillendiren temel referans noktaları arasında yer almaktadır. Dijital teknolojilerin yaygınlaşması, yalnızca enerji verimliliği ve karbon azaltımı konularında teknik avantajlar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda kurumsal yönetim, kullanıcı davranışları ve politika tasarımları üzerinde de doğrudan etkiler yaratmaktadır. Türkiye özelinde ise, 2053 Net Sıfır Hedefleri doğrultusunda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından geliştirilen enerji dönüşüm politikaları, bu literatür bulgularıyla büyük ölçüde örtüşmektedir.

2.5.2.1 Dijital Dönüşüm ve Karbon Nötrlüğü

Huan Zhang (2023) tarafından gerçekleştirilen *"Pathways to carbon neutrality in major exporting countries: the threshold effect of digital transition"* başlıklı çalışma, dijitalleşmenin karbon nötrlüğe ulaşmadaki kritik rolünü matematiksel modeller aracılığıyla analiz etmektedir. Çalışmada, dijital geçişin belirli bir eşik üzerine çıkmadığı sürece karbon azaltımında sınırlı bir etki yarattığı, ancak bu eşik aşıldığında emisyon azaltımının daha belirgin hale

geldiği ortaya konulmaktadır. Zhang'ın bulguları, enerji yönetimi stratejilerinin kademeli, aşamalı ve bütünleşik bir yaklaşımla tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Türkiye bağlamında bu durum, dijitalleşmenin enerji sektöründe yalnızca kısmi çözümler değil, yapısal dönüşüm yaratabilecek bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle **Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017–2023)** ve **Türkiye Elektrik Piyasası Dijitalleşme Stratejisi** kapsamında geliştirilen akıllı şebeke projeleri, Zhang'ın ortaya koyduğu eşik etkisiyle doğrudan ilişkilendirilebilir. Bu projeler, enerji tüketiminin daha etkin yönetilmesini, arz-talep dengesinin dijital sistemlerle optimize edilmesini ve karbon emisyonlarının azaltılmasını hedeflemektedir.

Ancak, Türkiye'de teknolojik altyapının bölgesel farklılıkları, küçük ve orta ölçekli işletmelerin dijitalleşme kapasiteleri ve finansman engelleri dikkate alındığında, bu dönüşümün eş zamanlı olarak tüm sektörlerde etkin biçimde hayata geçirilmesi zorluk barındırmaktadır. Özellikle enerji yoğun sektörlerde dijital teknolojilerin hızlı bir şekilde benimsenmesi, karbon nötrlüğe giden yolun kritik bir parçası olacaktır.

Bu bağlamda, **Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedefleri**, dijitalleşmenin enerji yönetimi ve karbon azaltım stratejileriyle bütünleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Karbonsuzlaşma sürecinde dijital teknolojilerin kullanımı; akıllı şebekeler, IoT tabanlı enerji izleme sistemleri, yapay zekâ destekli tahminleme araçları ve blokzincir tabanlı karbon piyasası mekanizmaları gibi yenilikçi çözümlerle güçlendirilmelidir. 2053 yılına giden süreçte, dijital dönüşüm yalnızca enerji verimliliğini artıran bir araç değil; aynı zamanda Türkiye'nin küresel iklim politikalarıyla uyumunu, Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı'na entegrasyonunu ve uluslararası karbon pazarlarındaki rekabet gücünü artıracak stratejik bir kaldıraç olacaktır.

Sonuç olarak, Zhang'ın ortaya koyduğu eşik etkisi, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedeflerine ulaşabilmesi için dijital dönüşüm yatırımlarını hızlandırması gerektiğini açıkça göstermektedir. Bu hedef, yalnızca teknolojik altyapının güçlendirilmesiyle değil; aynı zamanda kamu politikaları, finansal destek mekanizmaları, özel sektörün adaptasyonu ve toplumsal farkındalıkla bütünleşik bir şekilde hayata geçirildiğinde başarılabılır.

2.5.2.2 Döngüsel Ekonomi ve Dijital Teknolojiler

Rohit Agrawal ve ark. (2023) tarafından yayımlanan "Are emerging technologies unlocking the potential of sustainable practices in the context of a net-zero economy?" başlıklı çalışma, yapay zekâ, büyük veri, siber-fiziksel sistemler, Nesnelerin İnterneti ve eklemeli üretim teknolojilerinin sürdürülebilir uygulamalardaki kritik rolünü ortaya koymaktadır. Çalışmada, bu teknolojilerin özellikle döngüsel ekonomi uygulamaları, geri dönüşüm sistemleri ve tahmine dayalı bakım süreçlerinde büyük kolaylık sağladığı belirtilmektedir.

Türkiye'de de benzer bir yönelim gözlenmektedir. Özellikle **Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı** tarafından desteklenen "Yeşil OSB" projeleri ve **Türkiye'nin Döngüsel Ekonomi Yol Haritası**, dijital teknolojilerin atık yönetimi, enerji tasarrufu ve kaynak verimliliği konularındaki rolünü güçlendirmektedir. Ancak literatürde de vurgulandığı gibi, bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasında veri güvenliği, personel eğitimi ve finansmana erişim gibi engeller bulunmaktadır. Dolayısıyla Agrawal'ın öne sürdüğü gibi, dijitalleşme yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda ekonomik ve kurumsal uyum mekanizmalarıyla desteklenmesi gereken bir süreçtir.

2.5.2.3 Akıllı Enerji Yönetimi ve Davranışsal Boyut

Baraa Hakawati ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen "Smart energy management in residential buildings: the impact of knowledge and behavior" başlıklı araştırma, akıllı enerji yönetim sistemlerinin yalnızca teknik kapasiteyle

değil, aynı zamanda kullanıcı davranışı ve farkındalığı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Çalışma, IoT tabanlı çözümlerle entegre edilen akıllı sistemlerin enerji verimliliğini artırdığını, ancak kullanıcı eğitimi ve bilinçlendirme olmaksızın bu potansiyelin tam olarak hayata geçirilemeyeceğini ortaya koymaktadır.

Türkiye özelinde bu bulgu, özellikle konutlarda enerji verimliliği projeleri açısından önem taşımaktadır. **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği"** ve belediyeler tarafından yürütülen akıllı bina projeleri, Hakawati'nin ortaya koyduğu sonuçlarla uyumludur. Ancak, Türkiye'de konut sahiplerinin ve kiracıların enerji verimliliği konusundaki bilinç düzeyleri farklılık göstermekte; bu da dijitalleşme yoluyla sağlanacak kazanımların eşit şekilde dağıtılmasını zorlaştırmaktadır.

2.5.2.4 Dijital Ekonomi ve Bölgesel Karbon Azaltımı

Tian Sun ve ark. (2024) tarafından yapılan *"Digital economy and carbon emission: The coupling effects of the economy in Qinghai region of China"* başlıklı makale, dijital ekonominin üretim, ulaşım ve tüketim süreçlerini optimize ederek enerji kullanımını azalttığını ve karbon emisyonlarını düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Araştırmada, akıllı cihazlar, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve veri analitiği uygulamalarının arz-talep yönetimini geliştirdiği ve karbon piyasalarının oluşumunu desteklediği belirtilmektedir. Bu bulgular, dijitalleşmenin yalnızca ekonomik süreçlerde değil, aynı zamanda iklim politikaları ve sürdürülebilirlik stratejilerinde de kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Türkiye açısından bu sonuçlar, hem ulusal enerji piyasasında hem de bölgesel düzeyde karbon azaltım stratejileri için son derece önemlidir. Özellikle **Türkiye Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)** hazırlıkları, dijitalleşmenin karbon piyasalarının şeffaflığı, izlenebilirliği ve işleyişi açısından vazgeçilmez bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde hayata geçirilen **akıllı trafik yönetim sistemleri ve dijital ulaştırma çözümleri**, karbon emisyonlarının azaltılmasına doğrudan katkı sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin ulusal ölçekte yaygınlaştırılabilmesi için altyapı yatırımlarının hızlandırılması, özellikle dijital altyapı ve veri entegrasyon kapasitesinin artırılması gerekmektedir.

Bu noktada **SECAP (Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı)** süreçleri Türkiye'de yerel düzeyde dijitalleşme ile karbon azaltımı arasındaki bağı güçlendiren önemli bir politika aracıdır. Belediyelerin hazırladığı SECAP planlarında, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji yatırımları ve düşük karbonlu ulaşım çözümleri gibi alanlarda dijital araçların entegrasyonu giderek daha fazla öne çıkmaktadır. Özellikle akıllı şehir uygulamaları, dijital enerji izleme platformları ve veri tabanlı karbon hesaplama sistemleri, SECAP çerçevesinde geliştirilen eylem planlarının etkinliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak, Sun ve diğerlerinin ortaya koyduğu bulgular, Türkiye'nin hem ulusal düzeyde ETS hazırlıkları hem de yerel düzeyde SECAP uygulamalarıyla birlikte dijital dönüşümü stratejik bir kaldıraç olarak değerlendirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda dijital ekonomi, yalnızca enerji ve ulaşım sektörlerinde değil; aynı zamanda yerel yönetimlerin sürdürülebilirlik politikalarında da karbon nötrliğe giden yolun en kritik araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

2.5.2.5 Sonuç ve Değerlendirme

Enerji yönetimi, dijitalleşme ve karbon azaltım stratejileri arasındaki ilişki, mevcut literatürde çok boyutlu bir şekilde ele alınmaktadır (Zhang, 2023; Agrawal et al., 2023; Hakawati et al., 2024; Sun et al., 2024). Ortak bulgu, dijital teknolojilerin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynadığı yönündedir.

Ancak, bu süreçlerin başarılı olabilmesi için yalnızca teknolojik çözümler yeterli değildir. Eğitim, farkındalık, finansal destek mekanizmaları ve kurumsal yönetim modelleri de bu sürecin ayrılmaz parçalarıdır.

Türkiye açısından bakıldığında, **2053 Net Sıfır Hedefleri** doğrultusunda dijitalleşme ve enerji yönetimi entegrasyonu, yalnızca ulusal politikaların değil, aynı zamanda yerel yönetimlerin, özel sektörün ve hane halklarının aktif katılımıyla mümkün olacaktır. Akademik literatür, bu süreçte hem fırsatları hem de zorlukları işaret etmekte; Türkiye'nin bu bağlamda stratejik uyum ve kapsayıcı politikalarla süreci desteklemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.5.3 Endüstriyel Sektörlerde E-Verimlilik Uygulamaları

Endüstriyel sektörlerde e-verimlilik uygulamaları, hem üretim süreçlerinin optimizasyonu hem de bakım faaliyetlerinin entegrasyonu açısından giderek daha kritik bir hale gelmektedir. Literatür bu alanda farklı yaklaşımları kapsamlı biçimde incelemekte, dijitalleşmenin ve yapay zekâ temelli çözümlerin endüstriyel süreçlerde sağladığı katkıları ortaya koymaktadır.

Rana Dünder ve arkadaşlarının (2021) "Machine scheduling with maintenance activities: Literature review" başlıklı çalışması, üretim çizelgelemesi ile bakım faaliyetlerinin entegrasyonuna odaklanmakta ve bu alandaki gelişmeleri sistematik bir şekilde değerlendirmektedir. Çalışmada, önleyici bakımın en çok araştırılan bakım türü olduğu, kestirimci bakımın ise yapay zekâ ve veri analitiği destekli yöntemler sayesinde hızla yükselişe geçtiği vurgulanmaktadır. Özellikle iş atölyesi (job shop) ve akış atölyesi (flow shop) ortamlarında, bakım ve üretim çizelgelemesinin entegrasyonunun verimliliği artırmada büyük bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmektedir.

2.5.3.1 Üretim ve Bakımın Entegrasyonu

Makalede, üretim ve bakım faaliyetlerinin birlikte planlanmasının, yalnızca maliyetlerin azaltılmasına değil, aynı zamanda üretim sürekliliğinin sağlanmasına da katkı sunduğu ortaya konmuştur. Üretim çizelgelemede en büyük tamamlanma zamanını (makespan) minimize etmeye odaklanan yöntemlerin, e-verimlilik uygulamalarıyla birlikte değerlendirildiğinde daha yüksek performans sunduğu bulgulanmıştır. Böylece, hem üretim hatlarının duruş süreleri azaltılmakta hem de bakım maliyetleri daha etkin bir şekilde yönetilebilmektedir.

Bu bulgu, Türkiye'de özellikle otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayi gibi yüksek teknoloji sektörlerinde büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu sektörlerde üretim sürekliliği ve düşük maliyet, rekabet avantajının temel belirleyicileri arasındadır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 2023 yılında yayımladığı "Dijital Türkiye Yol Haritası"nda da vurgulandığı üzere, üretim ve bakım entegrasyonunun dijital platformlar üzerinden yapılması, Türkiye'nin sanayi 4.0 dönüşümünde öncelikli hedefler arasında yer almaktadır.

2.5.3.2 Yöntemsel Çeşitlilik ve Gelişim

Dünder ve arkadaşlarının incelemesine göre, literatürde başlangıçta daha çok kesin çözüm yöntemleri (exact methods) ve matematiksel modellemeler tercih edilirken, son yıllarda sezgisel (heuristic) ve metasezgisel (metaheuristic) yöntemler öne çıkmaya başlamıştır. Bunun temel nedeni, endüstriyel sistemlerin giderek daha karmaşık hale gelmesi ve klasik yöntemlerin çözüm hızının yetersiz kalmasıdır. Genetik algoritmalar, tabu arama, parçacık sürü optimizasyonu gibi metasezgisel teknikler, büyük ölçekli ve dinamik endüstriyel sistemlerde hem esneklik hem de hız sağlamaktadır.

Türkiye’de de bu yöntemlerin uygulanmasına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Özellikle üniversite-sanayi işbirliklerinde, kestirimci bakım algoritmalarının ve yapay zekâ tabanlı çizelgeleme çözümlerinin savunma ve havacılık sanayinde test edilmeye başlandığı görülmektedir. Bu bağlamda, TÜBİTAK 1501 ve 1507 programları kapsamında desteklenen projeler, metasezgisel yöntemlerin gerçek zamanlı bakım yönetiminde uygulanabilirliğini araştırmakta ve bu alandaki bilgi birikimini artırmaktadır.

2.5.3.3 Önleyici ve Kestirimci Bakımın Rolü

Çalışmanın en önemli bulgularından biri, önleyici bakımın hâlâ literatürde en çok incelenen bakım türü olduğudur. Ancak, yapay zekâ destekli kestirimci bakım uygulamaları, geleceğin e-verimlilik çözümlerinde merkezi bir rol oynamaktadır. Veriye dayalı kestirimci bakım sayesinde, makinelerin arızalanmadan önce bakım ihtiyacının tespit edilmesi mümkün olmakta; bu da plansız duruşların önüne geçerek üretim verimliliğini artırmaktadır.

Türkiye’de özellikle organize sanayi bölgelerinde (OSB) pilot uygulamalar kapsamında kestirimci bakım çözümleri test edilmektedir. Örneğin, Bursa OSB’de yürütülen bazı dijitalleşme projelerinde, üretim hatlarında IoT sensörleri aracılığıyla toplanan veriler, kestirimci bakım algoritmalarıyla analiz edilmekte ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bu tür uygulamalar, hem maliyet etkinliği hem de karbon ayak izinin azaltılması açısından Türkiye’nin 2053 Net Sıfır hedefleriyle uyumlu çözümler sunmaktadır.

2.5.3.4 Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Yönelimler

Literatür, üretim ve bakım entegrasyonunun e-verimlilik için büyük bir fırsat sunduğunu göstermektedir. Ancak, çözüm yöntemlerinin gerçek zamanlı endüstriyel ortamlarda uygulanmasında bazı zorluklar devam etmektedir. Özellikle, sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin sağladığı hız ve esneklik avantajlarının, güvenilirlik ve genellenebilirlik açısından sınırları bulunmaktadır. Bu nedenle, hem akademik dünyada hem de sanayi uygulamalarında daha kapsamlı ve bütüncül modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Türkiye için ise en önemli noktalardan biri, küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) bu tür teknolojileri benimseme kapasitesidir. Büyük ölçekli işletmeler dijitalleşme yatırımlarına daha kolay erişebilirken, KOBİ’lerin finansman ve insan kaynağı açısından daha fazla desteğe ihtiyaç duyduğu açıktır. Bu nedenle, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın koordineli bir şekilde, KOBİ’lere yönelik e-verimlilik destek programları geliştirmesi kritik önemdedir.

2.5.3.5 Sonuç

Endüstriyel sektörlerde e-verimlilik uygulamaları, üretim ve bakım entegrasyonunun sağlanmasıyla verimlilik artışı, maliyet etkinliği ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır (Rana Dünder et al., 2021). Literatürün ortaya koyduğu bulgular, Türkiye’nin sanayi stratejileriyle büyük ölçüde örtüşmekte olup, bu süreçlerin daha geniş bir ölçeğe taşınmasıyla ülkenin sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılar sağlanabilecektir. Özellikle, dijitalleşme, yapay zekâ tabanlı kestirimci bakım ve veri analitiği çözümleri, Türkiye’nin sanayi 4.0 dönüşümünde ve 2053 Net Sıfır hedeflerine ulaşmasında en önemli araçlardan biri olacaktır.

2.5.4 Karbon Ayak İzi İzleme Sistemleri ve Dijital Yaklaşımlar

Karbon ayak izi izleme sistemleri ve dijital yaklaşımlar, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hem akademik literatürde hem de uygulamada giderek daha kritik bir alan haline gelmektedir. Bu sistemler, düşük maliyetli

sensörlerden akıllı binalara, tarımsal üretimden endüstriyel faaliyetlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmakta ve sera gazı emisyonlarının hesaplanması, izlenmesi ve azaltılmasında önemli katkılar sunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, teknolojik gelişmelerin karbon yönetimine entegrasyonunu ele alırken, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve etik boyutlara da dikkat çekmektedir.

2.5.4.1 Düşük Maliyetli Sensör Teknolojileri ve Madencilik Uygulamaları

Cacciuttolo ve arkadaşlarının (2023) çalışması, madencilik sektöründe düşük maliyetli sensörlerin sürdürülebilirlik ve güvenlik izleme amaçlı kullanımını kapsamlı şekilde ele almaktadır. Web of Science ve Scopus veritabanlarında gerçekleştirilen sistematik tarama, bu sensörlerin uygulama alanlarını, bağlantı yöntemlerini ve operasyonel modlarını detaylandırmıştır. Çalışma, mikrodenetleyici tabanlı sensörlerin geniş kapsama alanı ve maliyet avantajları sayesinde madencilik faaliyetlerinde hem emisyon izleme hem de iş güvenliği açısından kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, makale saha koşullarına entegrasyonda karşılaşılan sorunları da vurgulamaktadır. Özellikle sensörlerin zorlu madencilik ortamlarında dayanıklılığı, veri güvenliği ve gerçek zamanlı analiz kapasitesi hâlâ geliştirilmesi gereken alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu eksikliklere rağmen, sensör tabanlı izleme sistemlerinin madencilikte karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayabileceği ve sektörün dijital dönüşümünde önemli bir adım olabileceği ifade edilmektedir.

Türkiye bağlamında bu bulgular, özellikle kömür madenciliğinin yoğun olduğu Zonguldak, Manisa ve Soma bölgelerinde önemlidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın karbon azaltım stratejileri kapsamında, düşük maliyetli sensör tabanlı izleme sistemlerinin entegrasyonu, hem iş güvenliği hem de sera gazı emisyonlarının raporlanabilirliği açısından kritik bir katkı sunabilir.

2.5.4.2 Kontrollü Çevre Tarımı ve Dijital Yaklaşımlar

Kazimierczuk ve arkadaşlarının (2023) çalışması, kontrollü çevre tarımı (CEA) sistemlerinin iklim değişikliğiyle mücadeledeki rolünü ele almaktadır. CEA uygulamaları, toprak ve su kullanımını azaltarak gıda üretiminde çevresel faydalar sağlayabilmektedir. Ancak bu sistemler, yüksek enerji tüketimi nedeniyle karbon ayak izi açısından riskli olabilir. Çalışma, yenileyici tarım uygulamaları ve dijital teknolojilerin (örneğin sensör tabanlı sulama, veri analitiği ve akıllı otomasyon) entegrasyonu ile bu dezavantajların giderilebileceğini göstermektedir.

Ekonomik boyutta ise, çiftçilerin bu sistemleri benimsemelerinde maliyet ve ölçeklenebilirlik sorunlarının önemli bir engel oluşturduğu ifade edilmektedir. Dijital çözümlerin yaygınlaşabilmesi için yenilenebilir enerji kullanımı, enerji verimliliği optimizasyonu ve çiftçilere yönelik eğitim programlarının desteklenmesi gerektiği belirtilmektedir.

Türkiye'de seracılık faaliyetlerinin yoğun olduğu Antalya ve Mersin gibi bölgelerde, CEA sistemlerinin karbon azaltımına katkı sağlayacak şekilde dijitalleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın yürüttüğü **dijital tarım projeleri** ve sera modernizasyon programları, bu literatür bulgularıyla doğrudan ilişkilendirilebilir. Ayrıca, bu sistemlerin güneş enerjisi ve jeotermal gibi yerel yenilenebilir kaynaklarla desteklenmesi, hem karbon ayak izini düşürmekte hem de üretim maliyetlerini azaltmaktadır.

2.5.4.3 Akıllı Binalar, Pasif Kızılötesi Sensörler ve Makine Öğrenimi

Shokrollahi ve arkadaşlarının (2024) "Passive Infrared Sensor-Based Occupancy Monitoring in Smart Buildings" başlıklı çalışması, akıllı binalarda pasif kızılötesi sensörlerin işgücü ve insan varlığı izleme süreçlerindeki rolünü kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Çalışmada, 2015–2023 yılları arasında yayımlanan 4028 makale arasından seçilen 71 çalışma analiz edilmiştir. Bu sistemlerin konum belirleme, aktivite tanıma ve enerji tüketimi optimizasyonu gibi alanlarda önemli katkılar sağladığı ortaya konmuştur.

Makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonu sayesinde, insan hareketlerinin ve kullanım alışkanlıklarının doğru şekilde tespit edilmesi mümkün olmakta; bu da enerji tüketiminde önemli tasarruflar sağlamaktadır. Ancak, makale aynı zamanda veri gizliliği, kullanıcı mahremiyeti ve sensörlerin enerji verimliliği gibi konulardaki sınırlılıkları da tartışmaktadır.

Türkiye’de Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen “Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı (2020–2023)”, bu literatür bulgularıyla örtüşmektedir. Özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir’deki akıllı bina projelerinde sensör tabanlı enerji yönetim sistemleri kullanılmakta; bu uygulamalar, karbon ayak izinin azaltılmasında dijital yaklaşımların pratik katkısını göstermektedir.

2.5.4.4 Genel Değerlendirme ve Gelecek Araştırma Alanları

Karbon ayak izi izleme sistemleri ve dijital yaklaşımlar üzerine yapılan bu literatür taraması, sensör teknolojilerinden tarımsal üretim sistemlerine ve akıllı binalara kadar geniş bir uygulama alanını kapsamaktadır (Cacciuttolo et al., 2023; Kazimierczuk et al., 2023; Shokrollahi et al., 2024). Ortak bulgu, dijitalleşmenin karbon emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynadığı, ancak bu teknolojilerin saha uygulamalarında ölçeklenebilirlik, maliyet etkinliği ve etik konular açısından bazı sınırlılıklar barındırdığıdır.

Türkiye için bu literatür, 2053 Net Sıfır Hedefi kapsamında karbon ayak izinin izlenmesi ve yönetilmesinde önemli bir yol haritası sunmaktadır. Sensör tabanlı sistemlerin madencilik ve sanayide, CEA uygulamalarının tarımda ve akıllı bina teknolojilerinin şehirlerde yaygınlaştırılması, hem enerji verimliliği hem de karbon emisyonlarının azaltılması açısından kritik olacaktır. Ayrıca, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Tarım ve Orman Bakanlığı’nın koordineli politikalar geliştirmesi, bu dijital yaklaşımların başarıya ulaşması için belirleyici olacaktır.

2.5.5 Yapay Zekâ ile Süreç Optimizasyonu: E-Verimliliğe Katkılar

Yapay zekâ ile süreç optimizasyonu günümüzde dijitalleşme ve sürdürülebilirlik literatürünün kesişim noktasında en kritik konulardan biri olarak öne çıkmaktadır. Gelişen teknolojiler sayesinde, enerji yönetiminden üretim süreçlerine, bilimsel iletişimden kamu hizmetlerine kadar pek çok alanda verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılması mümkün hale gelmektedir. Literatür incelemeleri, yapay zekânın sunduğu fırsatların yanı sıra, beraberinde getirdiği toplumsal, etik ve yönetimsel zorlukları da ortaya koymaktadır.

2.5.5.1 Mobil Enerji Verimliliği ve Yapay Zekâ

2023 yılında Siemens ve ark. tarafından yayımlanan “The Two Faces of Artificial Intelligence in Green Mobile Computing: A Literature Review” başlıklı çalışma, yapay zekânın mobil enerji tüketimi üzerindeki rolünü kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bu çalışmada, özellikle mobil bulut bilişim ve bağlama duyarlı yazılım optimizasyonu gibi alanlarda yapay zekâ destekli tekniklerin enerji verimliliğini artırmadaki etkileri tartışılmaktadır. Çalışmaya göre,

yapay zekâ destekli offloading yöntemleri, kaynak yoğun görevlerin daha güçlü cihazlara veya bulut sistemlerine devredilmesi yoluyla enerji tüketimini azaltabilmektedir.

Araştırmada ayrıca Markov Karar Süreçleri ve Derin Q-Ağları gibi yöntemlerin, görevlerin en uygun zamanda ve koşullarda devredilmesine imkân tanıdığı, bunun da uzun vadeli enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğü vurgulanmaktadır. Çalışmanın ikinci bulgusu ise mobil yazılımların kullanıcı davranışına veya cihazın kullanım bağlamına göre dinamik olarak uyarlanmasıdır. Örneğin, kullanıcı hareketine göre video çözünürlüğünün otomatik olarak ayarlanması hem enerji tüketimini azaltmakta hem de kullanıcı deneyimini olumsuz etkilememektedir.

Türkiye açısından bu bulgular, özellikle mobil veri tüketiminin ve mobil cihaz kullanımının hızla arttığı bir toplumda kritik önem taşımaktadır. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu verilerine göre Türkiye’de mobil internet kullanımı her yıl düzenli olarak artmakta, bu da enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın dijitalleşme stratejileri çerçevesinde, mobil enerji verimliliği politikalarının yapay zekâ destekli çözümlerle desteklenmesi, 2053 net sıfır hedeflerine katkı sağlayabilir.

2.5.5.2 Üretim Alanında Yapay Zekâ ve Toplumsal Etkiler

Nelson ve ark. tarafından 2023 yılında yayımlanan “Applications and Societal Implications of Artificial Intelligence in Manufacturing: A Systematic Review” başlıklı makale, yapay zekânın üretim sektöründeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Makalede, lojistik koordinasyonu, tedarik zinciri yönetimi, önleyici bakım ve üretim süreçlerinin izlenmesi gibi alanlarda yapay zekâ tabanlı uygulamaların e-verimlilik üzerindeki katkıları detaylandırılmaktadır.

Çalışmaya göre, yapay zekâ üretim süreçlerinde daha az hata, daha az enerji tüketimi ve daha yüksek hız sağlamaktadır. Bununla birlikte, makale toplumsal etkiler konusunda dikkat çekici bulgular sunmaktadır. Özellikle iş gücü üzerindeki etkiler, mesleklerin dönüşümü, siber güvenlik açıkları ve çevresel sonuçlar, yapay zekânın sanayide yaygınlaşmasının beraberinde getirdiği riskler arasında gösterilmektedir.

Türkiye’de bu bulgular, özellikle otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayi gibi endüstriler açısından önem taşımaktadır. Organize sanayi bölgelerinde ve büyük üretim tesislerinde yapay zekâ tabanlı üretim süreçlerinin uygulanması, hem enerji verimliliğini artırabilir hem de karbon emisyonlarını azaltabilir. Ancak, iş gücünün dönüşümü konusunda gerekli eğitimlerin sağlanmaması durumunda, bu süreç toplumsal dengesizliklere yol açabilir. Dolayısıyla, Türkiye’de Mesleki Yeterlilik Kurumu ve Milli Eğitim Bakanlığı’nın yapay zekâ odaklı mesleki eğitim programlarını geliştirmesi kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

2.5.5.3 Operasyon Araştırmaları ve Yapay Zekâ

Fan ve ark. 2024 yılında yayımladığı “Artificial Intelligence for Operations Research: Revolutionizing the Operations Research Process” başlıklı çalışma, yapay zekânın operasyon araştırmaları alanına katkılarını ortaya koymaktadır. Çalışmaya göre, yapay zekâ yalnızca mevcut optimizasyon yöntemlerini geliştirmekle kalmamakta, aynı zamanda tamamen yeni çözüm yollarının ortaya çıkmasını da sağlamaktadır.

Makale, büyük ölçekli problemlerin çözümünde yapay zekâ destekli algoritmaların daha hızlı ve doğru sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Örneğin, hisse senedi hareketlerinin tahmin edilmesi ya da enerji piyasasında arz-talep dengesinin öngörülmesi, yapay zekâ destekli optimizasyon teknikleri sayesinde daha verimli şekilde

yapılabilmektedir. Bu, yalnızca ekonomik verimlilik değil, aynı zamanda çevresel verimlilik açısından da kritik sonuçlar doğurmaktadır.

Türkiye’de enerji piyasalarının serbestleşmesi ve karbon emisyon ticareti sisteminin kurulmasıyla birlikte, yapay zekâ destekli operasyon araştırmalarının bu alanlarda uygulanması büyük fırsatlar yaratmaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nun (EPDK) veri odaklı yaklaşımları, yapay zekâ ile bütünleştğinde, enerji yönetiminde verimliliği artırabilir ve karbon azaltımına katkı sağlayabilir.

2.5.5.4 Bilimsel İletişim, Veri Analizi ve Yapay Zekâ

Saeidnia ve ark. 2024 yılında gerçekleştirdiği çalışma, yapay zekânın bilimsel iletişimin ölçülmesi ve analizi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmaya göre, yapay zekâ scientometrics, webometrics ve bibliometrics gibi alanlarla entegrasyon sağladığında, araştırma analizleri daha nesnel ve güvenilir hale gelmektedir.

Makale, atıf analizleri, araştırma trendlerinin belirlenmesi, işbirliği ağlarının tespit edilmesi gibi konularda yapay zekâ tabanlı çözümlerin sunduğu avantajları detaylandırmaktadır. Bu durum, bilimsel üretimin kalitesinin artırılmasına ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

Türkiye bağlamında, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) ve TÜBİTAK’ın bilimsel yayın politikalarının yapay zekâ ile desteklenmesi, ulusal araştırma kapasitesinin daha etkin yönetilmesini sağlayabilir. Özellikle üniversitelerde yapay zekâ tabanlı atıf analiz sistemlerinin kurulması, Türkiye’nin akademik performansını uluslararası ölçekte güçlendirebilir.

2.5.5.5 Sürdürülebilir Kalkınma, Enerji Verimliliği ve Yapay Zekâ

Năstăsă ve ark. 2024 yılında yayımladığı çalışma, pandeminin etkisi altında yapay zekânın sürdürülebilir kalkınmadaki rolünü ele almaktadır. Çalışma, yapay zekânın enerji verimliliği ve alternatif enerji kaynaklarının teşvik edilmesi açısından sunduğu katkıları vurgulamaktadır. Aynı zamanda veri gizliliği, gözetim ve algoritmik önyargı gibi olumsuz etkilerin de göz ardı edilmemesi gerektiğine dikkat çekmektedir.

Makale, sağlık sektöründen enerji sektörüne kadar birçok alanda yapay zekânın krizlere karşı dayanıklılığı artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, enerji krizlerinde yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri, enerji talebinin daha doğru yönetilmesini sağlayabilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunu kolaylaştırabilir.

Türkiye için bu bulgular, özellikle 2053 net sıfır emisyon hedefleri bağlamında önemlidir. Yenilenebilir enerji yatırımlarının hızla arttığı bir dönemde, yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri hem üretim hem de tüketim tarafında karbon azaltımına doğrudan katkı sağlayabilir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı’nın dijital çözümlerle desteklenmesi, bu hedeflerin başarıya ulaşmasında belirleyici olacaktır.

2.5.5.6 Genel Değerlendirme

Yapay zekâ ile süreç optimizasyonuna dair literatür incelendiğinde, bu teknolojinin enerji verimliliği, üretim süreçleri, bilimsel iletişim ve sürdürülebilir kalkınma gibi alanlarda önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Bununla

birlikte, veri güvenliği, gizlilik, etik standartlar ve toplumsal etkiler gibi zorlukların da göz önünde bulundurulması gerektiği açıktır.

Türkiye açısından, yapay zekânın süreç optimizasyonuna entegrasyonu yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal faydalar da sağlayabilir. Sanayide, tarımda, enerji sektöründe ve akademik dünyada yapay zekânın yaygınlaştırılması, 2053 net sıfır hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır. Ancak, bu süreçte hem kamu kurumlarının hem de özel sektörün sorumluluk alması, gerekli eğitim programlarının geliştirilmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması büyük önem taşımaktadır.

2.5.6 E-Verimliliğin Ekonomik, Çevresel ve Sosyal Katkıları

E-verimlilik, yalnızca teknolojik bir dönüşüm süreci değil; aynı zamanda ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla sürdürülebilir kalkınmanın temel taşlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Literatürde bu alana yönelik yapılan çalışmalar, ülkelerin ve sektörlerin performans farklılıklarını, politika önceliklerini ve gelecekteki yönelimleri ortaya koymaktadır.

2.5.6.1 Avrupa Birliği Deneyimi ve Çevresel Verimlilik

Roman Lacko ve ark. tarafından kaleme alınan "Socioeconomic determinants of environmental efficiency: the case of the European Union" başlıklı çalışma, Avrupa Birliği'nin 2010–2018 yılları arasındaki çevresel verimliliğini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışma, ekonomik gelişme, turizm, enerji kullanımı, yaşam kalitesi ve döngüsel ekonomi gibi unsurların çevresel verimlilikle nasıl ilişkili olduğunu modellemiş ve Avrupa Birliği ülkeleri arasındaki farklı performans düzeylerini ortaya koymuştur (Lacko et al., 2023).

Araştırma, pandemi sonrası toparlanma ve enerji krizinin yaşandığı bir dönemde yayınlanmasıyla ayrı bir önem kazanmaktadır. Çünkü turizm sektörünün toparlanma süreci, yenilenebilir enerjiye geçiş ve yaşam kalitesinin artırılması gibi faktörler, çevresel verimliliğin hem ekonomik hem de sosyal boyutlarını doğrudan etkilemektedir. Çalışma ayrıca, sürdürülebilir turizmin ekonomik büyümeyi desteklemesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi sinerjik stratejilere işaret etmektedir.

2.5.6.2 Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi

Makale, Avrupa Birliği ülkeleri arasında farklı performans düzeylerinin gözlemlendiğini ortaya koyarken, bu farklılıkların politika yapıcılar açısından özel çözümler gerektirdiğini vurgulamaktadır. Örneğin, enerji yoğun ekonomilere sahip ülkeler için enerji verimliliği politikaları öncelikli iken; turizm odaklı ülkelerde sürdürülebilir turizm ve döngüsel ekonomi uygulamaları ön plana çıkmaktadır. Ancak çalışmanın eleştirel yönlerinden biri, önerilen politikaların pratikte uygulanabilirliğinin sınırlı tartışılmasıdır. Ayrıca, yapay zekâ ve ağ tabanlı teknolojilerin çevresel verimlilik analizine entegrasyonu gibi güncel yöntemlere yeterince yer verilmemiştir.

Bununla birlikte, metodolojik yeniliklerin kullanılması, özellikle küçük ölçekli bölgeler ya da tekil ülkeler için daha hassas politika önerileri geliştirilmesine imkân tanıyacaktır. Bu noktada, literatürde disiplinlerarası yaklaşımların artırılması gerektiği ve çevresel verimlilik analizlerinin yalnızca ekonomik göstergelerle sınırlı kalmayıp sosyal refah, halk sağlığı ve eğitim gibi faktörlerle de bütünleştirilmesi gerektiği öne çıkmaktadır.

2.5.6.3 Türkiye Bağlamında E-Verimlilik

Türkiye açısından bakıldığında, Avrupa Birliği'nin deneyimleri ve literatürde ortaya konan bulgular, önemli dersler içermektedir. Enerji yoğun sanayilerin güçlü olduğu Türkiye'de, e-verimlilik uygulamalarının enerji verimliliği, karbon ayak izinin azaltılması ve döngüsel ekonomi politikalarıyla bütünleşmesi kritik önemdedir. Özellikle Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yürüttüğü **Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017–2023)** ve 2023 sonrasında güncellenmesi beklenen yeni strateji belgeleri, bu literatür bulgularıyla doğrudan ilişkilendirilebilir.

Ayrıca, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedefi doğrultusunda, e-verimliliğin yalnızca enerji alanında değil; turizm, tarım ve sanayi sektörlerinde de benimsenmesi gerekmektedir. Örneğin, turizmde enerji verimliliği sağlayacak dijital uygulamaların artırılması, döngüsel ekonomiye dayalı atık yönetim sistemlerinin oteller ve tatil köylerinde hayata geçirilmesi, hem ekonomik hem de çevresel katkılar sağlayacaktır.

Sosyal boyutta ise, e-verimlilik uygulamalarının yaygınlaştırılması vatandaşların yaşam kalitesini doğrudan etkilemektedir. Akıllı şehirler kapsamında dijital enerji izleme sistemlerinin kurulması, ulaşımdan konuta kadar farklı alanlarda karbon emisyonlarını düşürürken aynı zamanda maliyetleri azaltmakta, toplumun genel refah düzeyini yükseltmektedir.

2.5.6.4 Sonuç

E-verimliliğin ekonomik, çevresel ve sosyal katkıları üzerine yapılan çalışmalar, bu kavramın yalnızca bir teknoloji veya enerji yönetim aracı olmadığını; aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmanın bütünsel bir unsuru olduğunu ortaya koymaktadır. Lacko ve ark. (2023) çalışması, Avrupa Birliği örneği üzerinden, çevresel verimlilikte ekonomik büyüme, turizm, enerji, yaşam kalitesi ve döngüsel ekonomi arasındaki güçlü etkileşimleri göstermiştir.

Türkiye için bu bulgular, 2053 Net Sıfır hedefleriyle uyumlu stratejilerin geliştirilmesi açısından yol göstericidir. E-verimlilik, yalnızca karbon emisyonlarını azaltma aracı değil, aynı zamanda ekonomik rekabet gücünü artıran, sosyal yaşam kalitesini yükselten ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bütüncül bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

2.5.7 Politika ve Teşvik Araçları: E-Verimlilik Odaklı Düzenlemeler

E-verimlilik odaklı düzenlemeler ve teşvik araçları, dijital ekonominin sürdürülebilir kalkınmaya katkısını anlamak için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan literatür incelemeleri, bilgi ve iletişim teknolojilerinin ekonomik büyüme, yaratıcılık, yenilikçilik ve yeşil dönüşüm üzerindeki etkilerini farklı boyutlarıyla ele almaktadır.

2.5.7.1 Dijital Ekonomi ve E-Verimlilik İlişkisi

Oloyede ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen "Measuring the impact of the digital economy in developing countries: A systematic review and meta-analysis" başlıklı çalışma, gelişmekte olan ülkelerde dijital ekonominin etkilerini sistematik biçimde analiz etmiştir. Çalışma, dijital altyapının ekonomik büyüme üzerindeki katkılarını, işgücü üzerindeki etkilerini ve dijital ekonominin gelişimi ile çevresel verimlilik arasındaki ilişkiyi kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle bilgi ve iletişim teknolojilerinin gelişiminin sanayi yapılarının güncellenmesinde, üretim süreçlerinin modernizasyonunda ve ekonomik verimlilik artışında kritik bir rol üstlendiği gösterilmiştir.

Araştırma, dijital altyapı yatırımlarının yalnızca ekonomik çıktıları artırmakla kalmadığını, aynı zamanda yeşil verimliliğe doğrudan katkı sunduğunu da ortaya koymaktadır. Dijital ekonominin etkin kullanımı sayesinde enerji tüketiminde azalma, kaynak kullanımında optimizasyon ve karbon emisyonlarının kontrol altına alınması mümkün hale gelmektedir. Bununla birlikte, dijital ekonominin gelişiminde karşılaşılan zorluklar, özellikle altyapı eksiklikleri, finansman sınırlılıkları ve düzenleyici çerçevelerin yetersizlikleri olarak öne çıkmaktadır.

2.5.7.2 Yaratıcı Endüstriler ve Dijital İnovasyon Politikaları

Zhao ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma ise dijital ekonominin yaratıcı endüstriler üzerindeki etkilerini ele almıştır. Çalışmada, kültürel ve yaratıcı endüstrilerin gelişiminin yalnızca piyasa dinamiklerine bağlı olmadığı, aynı zamanda hükümet destekleri ve teşvik mekanizmalarının da bu sürecin kritik belirleyicileri olduğu ifade edilmektedir.

Araştırma, devletin sağladığı teşviklerin ve politikaların, bölgesel yenilik ekosistemlerinin dayanıklılığını artırdığını ve yaratıcı endüstrilerde yenilikçilik kapasitesini geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, dijital inovasyon yönetimi ile devlet desteklerinin entegrasyonu, yaratıcı endüstrilerin sürdürülebilir büyümesini desteklemekte ve ekonomik çeşitliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle, dijital finansmana erişim imkânlarının genişletilmesi, küçük ve orta ölçekli girişimlerin yaratıcı sektörlerde rekabet gücünü artırarak, bu alanlarda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

2.5.7.3 Eğitim, Araştırma ve Geliştirme ile Ekonomik Verimlilik

Aljneibi ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen "Investigating the effects of information and communication technologies, education, and research and development on economic efficiency and technology heterogeneity: A cross-country analysis" başlıklı makale, eğitim, bilgi ve iletişim teknolojileri ve araştırma-geliştirme yatırımlarının ekonomik verimlilik üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, ekonomik verimliliğin özellikle gelişmekte olan ülkelerde artış gösterdiği, buna karşın teknoloji heterojenliğinin zamanla azaldığı ve ülkeler arasında yakınsamanın yaşandığı bulgusu dikkat çekmektedir.

Araştırmada kullanılan Bayesian veri zarflama analizi (DEA-Data Envelopment Analysis) ve iki aşamalı genelleştirilmiş momentler yöntemi (GMM- Generalized Method of Moments) regresyon teknikleri, metodolojik açıdan güçlü bir altyapı sunmaktadır. Bulgular, sabit genişbant aboneliklerinin ekonomik verimlilikte en yüksek katkısı sağladığını ve eğitimin bu süreçte önemli bir belirleyici olduğunu göstermektedir. Ayrıca, araştırma-geliştirme faaliyetlerinin ekonomik verimlilik üzerindeki etkisinin, özellikle gelişmekte olan ülkelerde uzun vadeli rekabet gücünü artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

2.5.7.4 Eleştirel Değerlendirme ve Gelecek Araştırmalar

Söz konusu çalışmaların ortak noktası, dijital ekonominin gelişimini destekleyen politika ve teşvik araçlarının, ekonomik verimlilik ve sürdürülebilir kalkınma için kritik bir rol oynadığı yönündedir. Ancak, literatürde uygulama örneklerinin sınırlı olduğu ve dijital altyapı yatırımlarının finansmanı, yönetim mekanizmaları ile ilgili zorlukların yeterince tartışılmadığı görülmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmalarda dışsal kontrol değişkenlerinin (ticaret, kurumsal faktörler, siyasi istikrar gibi) dikkate alınmaması, sonuçların genelleştirilebilirliğini kısmen

sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, gelecekte yapılacak araştırmalarda bu faktörlerin de değerlendirilmesi, politika ve teşvik araçlarının daha bütünsel ve etkili biçimde tasarlanmasına katkı sağlayacaktır.

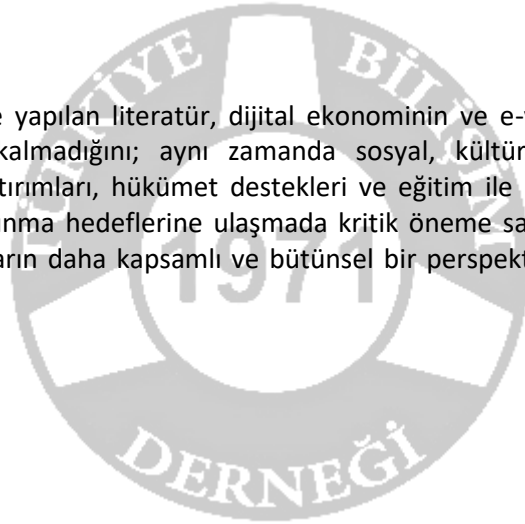
2.5.7.5 Türkiye Bağlamında E-Verimlilik ve Politika Araçları

Türkiye’de e-verimlilik odaklı politika ve teşviklerin geliştirilmesi, 2053 Net Sıfır hedefleri açısından stratejik öneme sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın yürüttüğü Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017–2023) ile başlayan süreç, dijital ekonominin e-verimlilik uygulamalarıyla daha güçlü bir şekilde bütünleştirilmelidir. Özellikle organize sanayi bölgelerinde dijital enerji izleme sistemlerinin kurulması, yeşil finansman mekanizmaları ile desteklenmesi ve küçük ve orta ölçekli işletmelerin dijitalleşme süreçlerine erişiminin kolaylaştırılması, Türkiye’nin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, Türkiye’nin yaratıcı endüstrilerdeki potansiyeli dikkate alındığında, devlet desteklerinin dijital inovasyon politikalarıyla entegre edilmesi, yerli üretim ve kültürel girişimlerin küresel ölçekte rekabet gücünü artırabilir. Eğitim ve araştırma-geliştirme yatırımlarının artırılması, genç nüfusun dijital dönüşüm süreçlerine aktif katılımını sağlayarak hem ekonomik verimliliği hem de toplumsal sürdürülebilirliği destekleyecektir.

2.5.7.6 Sonuç

Politika ve teşvik araçları üzerine yapılan literatür, dijital ekonominin ve e-verimlilik uygulamalarının yalnızca ekonomik performansla sınırlı kalmadığını; aynı zamanda sosyal, kültürel ve çevresel çıktılar ürettiğini göstermektedir. Dijital altyapı yatırımları, hükümet destekleri ve eğitim ile araştırma-geliştirme faaliyetlerinin entegrasyonu, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik öneme sahiptir. Türkiye için bu bulgular, e-verimliliği güçlendirecek politikaların daha kapsamlı ve bütünsel bir perspektifle ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.



3. Yaşam Döngüsü Yaklaşımıyla Karbon Ayak İzinin Azaltımı

3.1 Ürün Ve Hizmetlerin Yaşam Döngüsünde E-Verimlilik Etkisi Ve Sektörel Yaşam Döngüsü Analizi ,

Küresel dünyada, üretilen ürünlerin çevre etkisine dikkat çekmek için birçok girişim başlatılmıştır. Bunlardan en önemlilerinden biri Birleşmiş Milletler sürdürülebilir kalkınma planıdır. Sürdürülebilir kalkınma, insan ile doğa arasında denge kurarak doğal kaynakları tüketmeden, gelecek nesillerin ihtiyaçlarının karşılanmasına imkân verecek şekilde bugünün ve geleceğin yaşamını ve kalkınmasını programlama olarak tanımlanmaktadır (Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı-UNDP). Sürdürülebilir kalkınma dünya çapında önemli konulardan biri olmuştur. 17 hedef ve 169 alt hedeften oluşan 2030 UNDP Gündemi, küresel ihtiyaçları birbirleri ile ilişki içinde ve ortak kazanç anlayışı ile ele almaktadır. Küresel düzeydeki kalkınmanın 15 yıllık seyrini belirleyen



Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini aşağıdaki beş madde oluşturmaktadır:

- ❖ İnsanlık için açlık ve yoksullukla mücadele;
- ❖ Güçlü bir gezegen için doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi;
- ❖ İnsan haklarından ve sosyal adaletten temellerini alan bir refah anlayış;
- ❖ Küresel barış için korku ve şiddetten bağımsız bir yaşam;
- ❖ Tüm bunları gerçekleştirebilmek için küresel bir kararlılık ve çok paydaşlı bir işbirliği Son yıllarda sürdürülebilir kalkınmanın hedeflerine ulaşabilmesi için yeni bir yaklaşım olan döngüsel ekonomi modeli dikkat çekmektedir.

Döngüsel ekonomi, hammadde, bileşen ve ürünlerin değerlerini minimum şekilde kaybettiği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı kapalı döngülerden oluşan ekonomik bir sistemdir. Malların üretilip kullanıldığı sonrasında bertaraf edildiği doğrusal ekonomiden köklü bir kopuştur. Sınırlı kaynaklarımızın önemine vurgu yapan döngüsel bir ekonomiye geçiş, gelecekteki kalkınma ve refah için yeterli gıda, su, barınak, ısınma ve diğer ihtiyaçlara sahip olmamızı sağlamaya yardımcı olacaktır. Döngüsel ekonomi geri dönüşüm ve yeniden üretim için yeni pazarlar açmaktadır. Bu yeni pazarlar ve yeni gelir kanalları, mevcut firmaların kârını arttırmakta ve rakipleri arasında rekabet avantajı sağlamaktadır.

Şirketlere ek olarak, yerel yönetimlerde ve kamuda da maliyetlerini düşürebilir. Belediyeler, topladıkları ve geri dönüşüm işlerine sattıkları miktardan ilave karlar elde edebilirler. Atık bertarafı için ödemeleri gereken miktar asgariye indirildiği için halk döngüsel ekonomi 'den yararlanabilir. Sonuç olarak, finansal olarak karşılıklı bir ilişki formüle edilebilir.



3.1.1 Ürün Geliştirme Süreçleri

Ürün geliştirmede işletme içerisindeki her bölümün rolü önemli olmakla birlikte temel roller pazarlama, tasarım, üretim ve tedarikten oluşmaktadır. Yeni bir ürün geliştirilirken geçilen aşamalar şu şekilde sıralanabilir: Fikrin oluşması (fikir toplama), düşüncelerin açıklanması, konsept geliştirilmesi ve test edilmesi, işletme analizinin gerçekleştirilmesi, prototip geliştirilmesi, test pazarlaması ve pazara sürülmesi. Fikir toplama aşamasında işletmedeki her düzeyde çalışanlar ve müşteri, rakip, dağıtıcı ve tedarikçi gibi dış kaynakların da fikirleri göz önünde bulundurulmaktadır. Daha sonra ortaya konan bu fikirler üzerinde Pazar payı, fiyat, geliştirme süresi ve işletim amaçları değerlendirilerek fikirler elimine edilmektedir. Ardından bu ürünün tüketici tarafından ne kadar tercih edilebilir olduğu gibi sorular üzerine yoğunlaşarak ürünün imajı oluşturulur. Pazara sürümünden önce ise belli bir strateji geliştirilir. Bu aşamada öncelikle hedef Pazar tanımlanır ve gelecek dönemlere ilişkin satışlar ve karlar tahmin edilir. İlerleyen bölümde ürünün fiyatı ve pazarlama bütçeleri planlanır. Nihayetinde ise uzun vadeli kar hedeflerine uygun pazarlama karması stratejileri belirlenir. Bu aşamanın ardından tasarı fiziksel bir ürün haline dönüştürülür ve prototipler yapılır. Pazarlama testinde ürün küçük hedef pazarlarda test edilir. Sonuç olarak ne zaman ve nerede üretileceği belirlenerek ürün pazara sürülür.

Ürün geliştirme sürecinde ilk başta birçok yeni fikir ortaya atılmakta, ardından bu fikirlerin hedef ve kaynaklar doğrultusunda elimine edilmesiyle odak noktası giderek daralmaktadır. Sonuç olarak pazara sunulan yeni bir ürün ortaya çıkmaktadır. En sık uygulanan ürün geliştirme süreci "Stage-Gate Process" denilen, her aşamadan sonra bir kontrol ve sonraki aşamaya geçişi öngören bir süreçtir. Eğer süreçte amaç ürünün piyasaya sürülmesinin hızlandırılması ise, "Concurrent Engineering" denilen teknikte olduğu gibi aşamalar paralel olarak da uygulanabilmektedir. Belirsizliğin yüksek olduğu ortamlarda müşterinin ihtiyaçlarına daha iyi cevap verilebilmesi için ürün şartnamesinin belirlenmesi, tasarımın yapılması ve test edilmesi aşamaları birden çok defa tekrarlanabilir. Bu süreç ise "İteratif/Spiral Ürün



3.1.2 Yaşam Döngüsü Analizinin Temiz Üretim-Hizmet İle İlişkisi

Temiz Üretim, proses, ürün ve hizmetlerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkilerinin azaltılması ve üretimde verimliliğin artırılmasına yönelik önleyici bir yaklaşımdır. Bu kapsamda, üretimde enerji, su, kaynak verimliliğini iyileştirmek, açığa çıkan atık ve emisyonları azaltmak ve ortaya çıkan ürünlerin rekabet gücünü artırarak ekonomik fayda elde etmek için üretim sistemlerinde değişiklikler yapılmaktadır. Bu temiz üretim uygulamalarına teknoloji, ekipman proses girdi-çıktıları, tesis yönetimi ve bakımı, atık yönetimi ve ürün tasarımı üzerinde yapılan değişiklikler dahildir. Üretim ve ürün geliştirme aşamalarında yapılan değişiklikler, ürünlerin tüm değer zincirini etkilemektedir ve bu bağlamda temiz üretim kapsamında atılan adımların, bütünsel bir yaklaşım olan YDA (Yaşam Döngüsü Analizi) yöntemi ile değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu kavramı aşağıdaki örneklerle daha net görebiliriz:

- ❖ Üretimde sürdürülebilir hammaddelere geçiş yaparak, "hammadde eldesi" aşamasının iyileştirilmesi,
- ❖ Ar-Ge çalışmaları ile üretilen elektronik eşyaların enerji verimliliğini artırarak "kullanım" aşamasının karbon ayak izinin düşürülmesi,
- ❖ Ürün ambalajında değişiklikler yaparak, "ürün sevkiyat" aşamasının daha verimli hale getirilmesi ve buna bağlı hava emisyonlarının düşürülmesi,
- ❖ Daha kolay geri dönüştürülebilir ürünler tasarlayarak "nihai bertaraf" aşamasının çevresel etkilerinin azaltılması.

3.1.3 Yaşam Döngüsü Analizinin Sanayideki Yeri

Sürdürülebilir tüketim ve üretimi desteklemek için su, enerji ve bu bileşenlerin yoğun olduğu sektörler başta olmak üzere sanayide enerji ve kaynak verimliliğinin artırılması ve iklim değişikliğine yol açan sera gazları ve diğer baca gazı emisyonlarının azaltılması gerekmektedir. Bu kapsamda, sanayinin mevcut çevresel performansını değerlendirmek, uluslararası kabul gören performans göstergeleri ile ifade etmek ve iyileştirme stratejilerini geliştirmek için YDA yöntemi kullanılmaktadır. YDA ile sanayi ürünlerinin ve süreçlerinin asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, ekotoksisite ve fotokimyasal ozon oluşumu gibi çevresel etkileri ölçülebilmektedir. Analiz sonuçları, karar vericilerin ve sanayi kuruluşlarının bilimsel temellere dayanan kararlar alabilmeleri için önemli veriler sağlamaktadır. Böylece, sanayi ürünlerinin değer zincirinde yer alan fırsat ve riskler tespit edilerek uzun vadeli stratejiler geliştirilebilmektedir. Günümüzde dar kapsamlı ve kısa vadeli çözümler sunan yöntemlerin yerini, sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını içeren çevre yönetim sistemlerinin ve temiz üretim uygulamalarının almasıyla YDA'nın sanayideki rolü ön plana çıkmıştır. Geçtiğimiz yaklaşık 15 yıl içerisinde dünyada ve ülkemizde ivme kazanarak yaygınlaşan YDA uygulamaları çok sayıda farklı sektörleri kapsamaktadır.

Ülkemizde YDA kavramı önümüzdeki yıllardan itibaren ciddi bir ivme kazanacaktır. Bu bağlamda Kamu kurum ve kuruluşları ile özel sektörün üretim hizmet anlamında YDA analizlerinin sağlanması için ayrıca e- verimlilik politikalarının geliştirilmesi ve sürdürülebilir hale gelmesi için en önemli olan veri kaynakları , ürün ve hizmetlerin sağlıklı yaşam döngüsünün analiz edilmesi hakkında çok büyük rol oynamaları gerekmektedir. E- verimlilik kapsamında ürün ve hizmetlerin yaşam döngüsü muhasebesi ve analizi için şeffaf ve doğrulanmış verilere ihtiyaç duyulacaktır.

2025 yılı itibarı ile bazı özel sektör ve alt sektörlerinde müşteri beklentisinin karşılanması için YDA muhasebe ve analizi işlem görmeye başlamış ve yasal olarak da özellikle de AB komisyonunun yayınladığı mevzuat ve yeni yönetmelikler kapsamında bu konu ciddi bir ivme ve hız kazanmaya başlamaktadır.



3.1.4 Türkiye'deki Ar-Ge, Ür-Ge Çalışmaları Ve Plm Kullanımı, İhtiyaç Durumu

Ülkemiz son yıllarda otomotiv ve elektronik sanayisinde önemli bir gelişme göstermiştir. Buna bağlı olarak bilim ve inovasyon değerleri diğer ülkelere göre geride de kalsa, son yıllardaki gelişme gözden kaçmamaktadır. Ülkemizin, Koç, Sabancı gibi önde gelen kuruluşlarının, çok uluslu şirketlerle yapmış oldukları işbirliği sayesinde 60'lı yıllarda montaj sanayisi ile başlayan üretim, günümüzde Ar-Ge çalışmaları ile uluslararası firmalarla rekabet edecek duruma gelmiştir. Gelişmiş ülkelerin Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmaları konusunda yüz yılın üzerinde deneyimleri vardır. Ülkemizde kurumsallaşmış ulusal şirketlerimizde ise bu çalışmalarının geçmişi 20- 25 yıl kadardır. Son yıllarda uluslararası şirket ortaklıkları ve bilişim teknolojisindeki gelişmeler sayesinde Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmaları hız kazanmıştır. Türkiye'nin Ar-Ge çalışmalarına göz atılacak olursa, 2003'de gayri safi yurtiçi hasılanın sadece %0,48'i Ar-Ge'ye ayrılmış iken 2013 yılında bu oran %0,95'e yükselmiştir. Türkiye'de Ar-Ge'nin büyük bir kısmını üniversiteler gerçekleştirmektedir. Bu oran diğer ülkelere göre yüksektir.

PLM konusu Türkiye için oldukça yenidir. Ülkemizde gerek KOBİ'lerin ve gerekse kurumsallaşmış şirketlerin global pazarda rekabet edebilmeleri için ürün yaşam döngüsünü profesyonelce yönetmeleri gerekmektedir. Ülkemizde PLM bazı şirketler tarafından kısmen kullanılsa da tam bir farkındalık olduğu söylenemez.

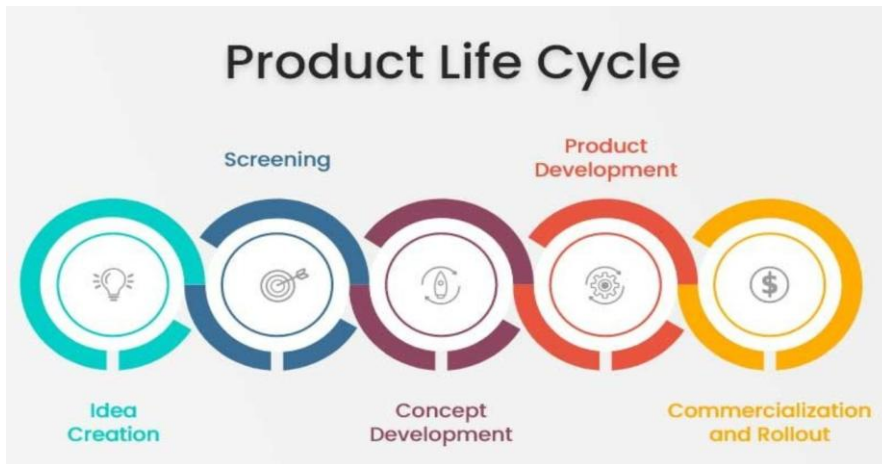
PLM (Product Lifecycle Management) İngilizce sözlü kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Ürün Yaşam Döngüsü, Ürün Yaşam Döngü Yönetimi, Ürün Çevrimi Yönetimi, Ürün Yaşam Süreç Organizasyonu, Ürün Süreç Organizasyon gibi literatürde farklı Türkçe karşılıkları bulunmaktadır

3.1.5 Plm Olmaksızın Yapılanlar: Artılar-Eksiler Plm'nin Yararları:

- ❖ Daha yenilikçi ürünlerin ve servislerin daha kısa sürede dağıtımına yardımcı olur.
- ❖ Pazara ulaşım süresini kısaltır.
- ❖ Müşteriler, tedarikçiler ve iş ortakları ile daha kapsamlı ve işbirlikçi ilişkiler kurulmasını sağlar.
- ❖ Departmanlar arası iletişimi güçlendirir.
- ❖ Yeni geliştirilen ürünlerin başarı oranını artırır. Verimlilik sayesinde maliyeti düşürür.

PLM olmaksızın ürün geliştirilen bir süreçte öncelikle her bir alanda yapılan küçük hatalar, ürünün geliştirilmesinde büyük bir soruna dönüşecek, bu durum ürünün pazara ulaşım süresi uzatacaktır. İşbirliği içinde olmayan farklı disiplinler ve çalışanlar arasında iletişim kopukluğu olacak ve sonuçta üretkenlik, verimlilik ve ürün kalitesi düşecektir.

PLM sayesinde; Üretim aşamalarının belirlenmesi, bu süreçte olası aksaklıkları, getirisi olmayan aşamaların tespit edilerek kaldırılması,



Organizasyonda öngörülen, çeşitli nedenlerden dolayı fonksiyonu bulunmayan ya da verimli olmayan üretim birimlerinin sonradan ortaya çıkmasının önlenmesi, Mal ve hizmet üretimi ile ilgili firma haklarının korunması, Mal ve hizmet üretimi aşamalarında ilgili birimlerin iş akışlarını yetki ve sorumluluk kapsamında kontrol edebilecek şekilde yönetilebilmesi, Mal ve hizmet üretiminde ilgili iç ve dış birimlerin doğrudan işbirliğinin sağlanması, Ürün ile bilgilerin dijital ortamda kaydedilmesi ve bu sayede gerekli bilgilere kısa sürede ulaşılması ve iç dış birimlerle paylaşılması, mümkün olmaktadır. Şirketler için stratejik öneme sahip olan PLM, bilgisayar destekli yazılımlardan faydalanılarak gerçekleştirilen şirket içi ve dışı çok disiplinli ve katılımlı bir organizasyondur. Serbest piyasada satılabilir iyileştirilmiş ve veya yeni ürün tasarımlarının piyasaya yüksek kazançlı bir şekilde sürülmesine olanak vermektedir. Şirketin rekabet gücünü, geleceğini, YDA çalışmalarında ürünlerin tüm yaşam döngüleri çevresel etkileri bazında incelenmekte ve farklı üretim ve yaşam sonu senaryoları karşılaştırılarak en iyi alternatifler uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle ambalajların geri dönüşümünün katı atık depolama ve yakma işlemlerinden daha az çevresel etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber, YDA metodolojisi ile farklı geri dönüşüm teknikleri de kıyaslanarak, çevresel performansı en yüksek olan yöntem seçilebilmekte, bu yolla proseslerde yapılacak iyileştirmeler belirlenebilmektedir.

Sonuç olarak Ülkemizde Sürdürülebilir yaşam için yeterli doğal kaynak olup olmadığı sorusu, tüketicilerin zihninde yaygınlaşmaya başlamıştır. Yeteri kadar kaynak olmadığını düşünen tüketiciler, yeşil tüketici haline dönüşmüştür. Yeşil tüketici, diğer tüketicilere göre satın alma ve tüketimlerine çevreci endişeleri daha fazla yansıtan tüketicilerdir. Bununla birlikte yeşil tüketici, üretim, tüketilen kaynakların kıtlığı ve ürünlerin kullanım sonrası işlemleri ile de ilgilenmektedir.



Ülkemizde de çevre bilinci ve çevresel kaygı taşıyan tüketici sayısında son yıllarda hızlı bir artış göstermesine rağmen, çevreci ürünlerin, şu an için, tüketici davranışlarında kalıplaşmış eylemlere neden olacak kadar etkin olmadığı söylenebilir. Ancak, çevre ve gelecek kaygısı taşıyan tüketicilerde beklenen artış görülmemektedir. Bu bağlamda, tüketici davranış kalıplarında kalıcı değişiklik sağlanması da yakın gelecekte olanaklı gözükmemektedir. Yeşil tüketici baskısı ve yönlendirmesinin yetersiz kalmasıyla, işletmelerin pazarlama anlayışında değişiklik de gecikecek ve yeşil üretim konusunda toplumsal ve sosyal sorumluluk bilinci kazanmaları da zaman alacaktır. Çevre bilinci olan tüketici, çevre kirliliğine karşı kendi etkinliğini kavrayan, kaynak kullanımında gelecek nesiller ve tüm insanlık için duyarlı bir tutum içinde olan sorumlu bir "ekolojist" olarak tanımlanabilir. Çevre bilinci kazanmış sorumlu tüketiciler, çevredeki kaynakların varlığı, kullanım maliyeti, kullanımın çevreye ve kendilerine olan etki boyutlarını değerlendirebilirler. Çevre bilinci çevreyi koruyucu, çevre kirliliğini önleyici çalışmalar için önemli bir koşul olmakla birlikte tek başına yeterli değildir. Buna tüm toplumun katılımı gerekir. Birey ve ailenin tek tek katılımı olmadıkça, yanlış alışkanlıklar değiştirilmedikçe sorunların çözülmesi güçtür. Çevresine sorumluluk duyan kişi günlük yaşantısında üretirken veya tüketirken çevreye en az olumsuz yol ve yöntemi seçen kişidir. Çevrenin bazı ihtiyaçları karşılamak için akılcı kullanılması, yanlış kullanmanın doğurduğu tüketim ve kirliliğin önlenmesi için çevre eğitimi gereklidir.

Bilinçlenme ve eğitimin yanında yeşil ürünün ulaşılabilirliği, eldesi ve ederi de göz önünde tutulmalıdır. Her ne kadar araştırma sonuçları, tüketicilerin, genel olarak, çevreye zarar vermeyen mallar için, %10'a kadar daha fazla fiyat ödemeye razı olacaklarını ortaya koysa da, bu ürünlere henüz yeterince güven duyulmamaktadır. Ayrıca ürün tedariki ve bulunabilirliği de henüz kolaylaştırılamamıştır. Bu bağlamda, yeşil ürün tüketiminin artırılması sözü edilen kısıtların giderilmesini de gerektirmektedir.

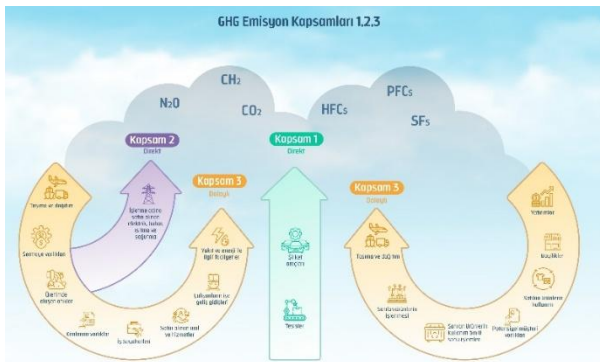
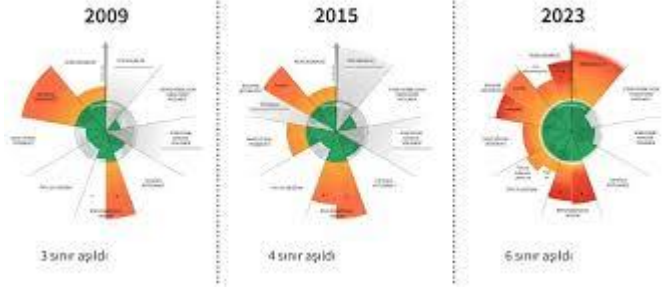
3.1.6 Ürün Ve Hizmetlerin Yda (Yaşam Döngüsü Analizi) Yapılması Ve E-Verimlilik

Ürün ve hizmetin e- verimlilik çevrimi içindeki döngüsel bağlantının en önemli konularından birisi Kurumsal Bireysel Karbon Ayak izi Hesaplamasıdır.

Dünyada üretim ve tüketimin artması, sanayi sektörünün hızla gelişmesi kentleşme ve çevre sorunlarını arttırmaktadır. Doğal yapının bozulması, iklim değişikliği, çölleşme ve bazı biyolojik türlerin giderek azalması ciddi tehlike oluşturmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı ile ortaya çıkan sera gazları, toprak ve arazinin düzensiz kullanımı iklim değişikliğine neden

olan etkenlerin başında gelmektedir ve orman alanlarının azaltılması kullanımı karbon tutma potansiyelini azaltmaktadır. Yirminci yüzyılın ikinci yarısı ile birlikte sanayileşme, enerji tüketimi vb. durumlardan kaynaklanan küresel ısınma etkisini göstermiş, önlem alınmazsa daha sonraki dönemlerde de etkisinin süreceği ve bu etkinin telafisi olmayan bir durum getireceği belirtilmiştir. Fosil yakıtların bilinçsiz ve verimsizce kullanılması küresel ısınmanın kaynağı CO2 başta olmak üzere atmosferdeki sera gazlarını artışına sebep olmaktadır. Ülkeler sera gazı salınımlarını azaltma amacına yönelik hedef koyamaması ve gerekli alt yapıyı hazırlayamaması sebebiyle bir sözleşmeye gerek duyulmuş ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ile bu durum giderilmiştir. Protokol kapsamında çeşitli mekanizmalar oluşturulmuştur . Tüm bu ifade edilen sorun ve öneriler, yaklaşımlar, oluşturulan mekanizmalar; karbon salınımını azaltmaya yönelik ülkelere, kurum ve kuruluşlara, yatırımcılara, üreticilere farkındalık oluşturmuştur ve karbon ayak izini belirleme çalışmaları hız kazanmıştır . Ülkemizde, Avrupa Birliği uyum süreci kapsamında sera gazı salınımı takibi hakkında yönetmelik 2014 yılında yürürlüğe girmiştir. Üretim ve tüketim safhasında gerçekleşen CO2 gazının atmosfere etkisinin, üretimin her aşamasında hesaplanması gelişmekte olan ülkemizde etraflıca değerlendirilmelidir.

Karbon ayak izi hesabı, bir kişinin bir yıl içerisinde doğa ortamına saldırdığı CO2 miktarının belirlenmesi ile bulunur. Ulaşım, ısınma, yeme, içme vb. aktiviteler ile üretilen ve tüketilen ürünler sonucunda oluşan karbon miktarı karbon ayak izini belirlemektedir. Kişilerin küresel ısınmadaki payının ölçüsünü karbon ayak izi belirler. Bir başka ifade ile bir karbon ayak izi kişinin, kurumların veya herhangi bir üründen kaynaklı olarak doğaya bırakılan sera gazlarının genel toplam içindeki oranıdır. Karbon ayak izi hesabı, araçlarla kat edilen toplam yol, ısıtma amaçlı kullanılan enerji miktarı vb. birçok parametreyi içerisine almaktadır. Bu bakımdan karbonun birincil ve ikincil izleri belirlenirken dikkat edilmelidir. Karbon ayak izi doğrudan (birincil) ve dolaylı (ikincil) olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Evsel enerji tüketimi, ulaşım, fosil yakıt kullanımı ile meydana gelebilecek CO2 salınımları belirlemede birincil ayak izi, tüm yaşam boyunca kullandığımız ürünlerin imalatı ve son olarak bozulmasına kadar atmosfere salınan CO2'yi belirlemede ise ikincil ayak izi kullanılır.



3.2 Tüketim, Üretim, Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyon

3.2.1 Dijital Optimizasyonun Temelleri

Dijital optimizasyon, sürdürülebilirlik politikalarının ve döngüsel ekonomi yaklaşımının en önemli araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Tüketim, üretim ve atık süreçlerinde yaşanan hızlı büyüme, çevresel baskıları artırmış; enerji, su, hammadde gibi doğal kaynakların verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu noktada dijital teknolojiler, **kaynakların izlenebilirliği, süreçlerin şeffaflığı ve emisyonların azaltılması** için temel çözüm alanı sunmaktadır.



Dijital optimizasyonun temelleri, **ölçüm – analiz – otomasyon – geri bildirim** döngüsüne dayanır. IoT sensörleri, yapay zekâ destekli algoritmalar, dijital ikizler ve veri analitiği araçları ile süreçlerin hem ekonomik hem çevresel etkileri en aza indirilebilir. Böylece geleneksel yönetim yöntemlerinden farklı olarak, kararlar sezgilere değil, **veriye dayalı gerçek zamanlı bilgilere** oturtulmaktadır.

Dijital optimizasyon, yalnızca enerji veya üretim hatlarını daha verimli kılmakla sınırlı değildir; tüketim davranışlarının izlenmesi, atıkların döngüsel ekonomiye kazandırılması ve karbon ayak izinin azaltılması gibi bütüncül bir yapıyı içerir. Sürdürülebilirlik artık yalnızca çevresel değil aynı zamanda **ekonomik rekabet gücü** açısından da kritik hale gelmiştir.

Bu nedenle dijital optimizasyonun temelleri üç boyutta ele alınabilir:

Teknolojik Boyut: IoT, yapay zekâ, veri analitiği, bulut ve edge bilişim çözümleri.

Çevresel Boyut: Karbon emisyonlarının izlenmesi, kaynak verimliliği, atık azaltımı.

Ekonomik Boyut: İşletmeler için maliyetlerin düşürülmesi, sürdürülebilir iş modellerinin geliştirilmesi.

Kriter	Geleneksel Yaklaşım	Dijital Optimizasyon Yaklaşımı
Veri Yönetimi	Manuel ölçüm, dönemsel raporlama	IoT sensörleri ile gerçek zamanlı veri
Karar Alma	Deneyime dayalı, sezgisel	Yapay zekâ destekli, öngörücü analiz
Müdahale Yeteneği	Reaktif (sorun sonrası)	Proaktif (anlık uyarı ve otomatik aksiyon)
Kaynak Kullanımı	Tek yönlü, lineer ekonomi	Döngüsel ekonomi, kaynak geri kazanımı
Şeffaflık	Sınırlı raporlama	İzlenebilir ve doğrulanabilir süreçler
Sürdürülebilirlik	Sınırlı karbon yönetimi	Emisyonların azaltılması, çevre dostu yaklaşım

3.2.2 Dijital Optimizasyonun Temel Unsurları

a) Veri Toplama ve Analiz

Süreçlerin dijital optimizasyonunda ilk adım, sahadan doğru verilerin toplanmasıdır. Akıllı sayaçlar, sensörler ve SCADA tabanlı izleme sistemleri, enerji, su, basınç, sıcaklık gibi kritik parametreleri sürekli kaydeder. Bu veriler büyük veri analitiği ve makine öğrenmesi ile işlenerek, hangi süreçlerin verimli, hangilerinin kayıplı çalıştığı ortaya çıkarılır.

b) Gerçek Zamanlı İzleme ve Müdahale

Geleneksel sistemlerde sorunlar genellikle ancak faturalar geldiğinde veya üretim kaybı yaşandığında anlaşılır. Dijital sistemlerde ise veriler anlık işlenir. Örneğin, bir üretim hattında elektrik tüketiminde olağan dışı artış gözlemlendiğinde sistem yöneticiyi uyarır, gerekirse otomatik olarak makineyi düşük modda çalıştırır.

c) Otomasyon ve Yapay Zekâ

Dijital optimizasyon yalnızca gözlem değil, aynı zamanda otomatik aksiyon almayı da içerir. Yapay zekâ algoritmaları, geçmiş verilerden öğrenerek üretim planlaması yapabilir, bakım ihtiyacını önceden tahmin edebilir veya atıkların ayrıştırılmasında karar destek sağlayabilir.

d) Şeffaflık ve İzlenebilirlik

Sürdürülebilirlik hedeflerinin başarısı için süreçlerin şeffaf olması gerekir. Bu noktada blokzincir tabanlı atık izleme sistemleri veya dijital karbon muhasebesi öne çıkar. Bu sistemler sayesinde raporlanan veriler güvenilir, doğrulanabilir ve politika yapıcılar için kullanılabilir hale gelir.

Örnekler;

Akıllı Atık Yönetimi

RFID tabanlı dijital izleme sistemlerinin belediyelerde atık toplama maliyetlerini %20'ye kadar düşürdüğü belirtilmiştir. Bu sistemlerde çöp konteynerlerine yerleştirilen sensörler doluluk oranını ölçmekte ve toplama araçları yalnızca dolu konteynerleri boşaltmaktadır.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Atık Yönetimi Sistemleri (2022)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ij3dptdi/issue/70246/1101621>

Enerji Verimliliği ve IoT

Endüstriyel tesislerde IoT tabanlı enerji izleme çözümlerinin %15–25 arasında enerji tasarrufu sağladığı rapor edilmiştir. Özellikle organize sanayi bölgelerinde kullanılan LoRaWAN tabanlı sayaçlar, merkezi kontrol imkânı sunarak kaynak kayıplarını azaltmaktadır.

Kaynak: Dergipark – Endüstri 4.0 ve Enerji Yönetimi (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumusfenbil/issue/64044/950240>

Dijital İkiz Teknolojisi

Üretim tesislerinde dijital ikiz uygulamalarının bakım maliyetlerini %30 azalttığına dair bulgular paylaşılmıştır. Gerçek zamanlı veriyle entegre edilen sanal modeller, arızaları önceden tahmin ederek plansız duruşların önüne geçmektedir.

Kaynak: Dergipark – Dijital İkiz Teknolojisinin Uygulamaları (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ij3dptdi/issue/56297/773147>

Stratejik Katma Değer

Dijital optimizasyonun temelleri yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal dönüşüm yaratır:

Ekonomik Fayda: İşletmelerde maliyetlerin %10–30 oranında azaltılması, rekabet avantajı.

Çevresel Fayda: Enerji ve su tüketiminin düşmesi, atıkların geri dönüşüm oranının artması, karbon emisyonlarının azalması.

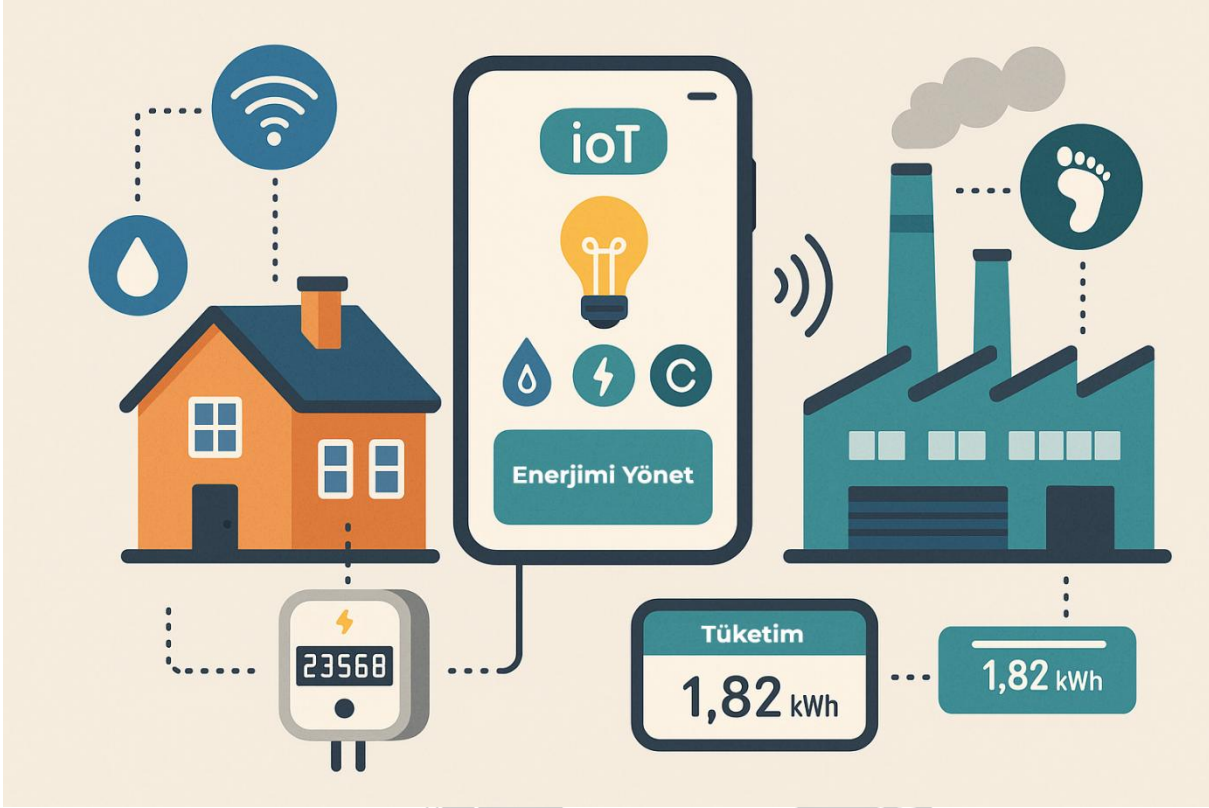
Toplumsal Fayda: Daha şeffaf süreçler, güvenilir raporlama, toplumda çevre bilincinin gelişmesi.

Sonuç

Dijital optimizasyonun temelleri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir araçtır. Ölçümden analize, otomasyondan şeffaf raporlamaya kadar tüm süreçleri kapsayan bu yaklaşım, hem **işletmeler için ekonomik fayda**, hem **çevre için sürdürülebilirlik**, hem de **toplum için şeffaflık** sağlar. Döngüsel ekonomi ve dijital dönüşüm birlikte ele alındığında, Türkiye'nin ve dünyanın sürdürülebilirlik yolculuğuna güçlü katkılar sunulacaktır

3.2.3 Tüketim Süreçlerinde Dijital Optimizasyon

Tüketim süreçleri, enerji, su ve hammaddelerin son kullanıcıya ulaşarak harcanması aşamalarını kapsar. Geleneksel tüketim alışkanlıklarında verimlilikten çok kolaylık ön planda tutulurken; dijitalleşme ile birlikte kaynakların **daha doğru, ölçülü ve sürdürülebilir** kullanımına imkân veren yeni bir döneme geçilmiştir. Akıllı sayaçlar, tüketici davranış analizi, mobil uygulamalar ve yapay zekâ destekli karar sistemleri sayesinde tüketim süreçleri hem bireysel hem de kurumsal ölçekte optimize edilmektedir.



3.2.3.1 Tüketim Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri

Enerji ve Su Verimliliği: Tüketimin anlık ölçülerek kayıpların önlenmesi.

Maliyet Azaltımı: Gereksiz kullanımın tespit edilip düşürülmesi.

Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Emisyonların dijital ölçümü ve raporlanması.

Bilinçli Tüketici Davranışı: Dijital platformlar üzerinden kullanıcıya geri bildirim sağlanması.

Döngüsel Ekonomi ile Uyum: Kullanım sonrası ürün ve hizmetlerin geri kazanıma yönlendirilmesi.

3.2.3.2 Teknolojik Altyapılar

a) Akıllı Sayaçlar ve IoT Sensörleri

Elektrik, su ve doğal gaz sayaçlarının dijitalleşmesi, tüketimin anlık olarak ölçülmesine imkân verir. Böylece yüksek tüketim dönemleri belirlenir, enerji yoğun cihazlar otomatik kontrol altına alınır.

Örneğin, konutlarda akıllı sayaçlar sayesinde gece ve gündüz kullanım farkları analiz edilerek tüketiciye dinamik fiyatlandırma uygulanabilir.

b) Yapay Zekâ Destekli Karar Sistemleri

Tüketim süreçlerinden elde edilen veriler, yapay zekâ algoritmaları tarafından işlenir. Böylece gelecekteki tüketim desenleri öngörülür ve kullanıcıya tasarruf önerileri sunulur.

Örnek: Bir apartman kompleksinde ısıtma sistemleri, dış hava sıcaklığı ve kullanım alışkanlıklarına göre otomatik olarak ayarlanarak %15'e varan tasarruf sağlanabilir.

c) Mobil ve Web Tabanlı Platformlar

Kullanıcıların tüketimlerini izleyebilmeleri, dijital paneller ve mobil uygulamalar üzerinden kolayca sağlanır. Bu şeffaflık, tüketim davranışlarını olumlu yönde değiştirir.



Örnekler;

Enerji Tüketimi Optimizasyonu

IoT tabanlı enerji izleme sistemlerinin hanelerde elektrik tüketimini %12–18 aralığında azalttığı belirlenmiştir.

Kaynak: Dergipark – Nesnelerin İnterneti ile Akıllı Enerji Yönetimi (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/67146/1019469>

Su Yönetimi Çalışmaları

Akıllı su sayaçları ile yapılan bir çalışmada, hane halkı tüketiminin %20'ye kadar azaltılabildiği gösterilmiştir.

Sistemde, kaçak tespit ve anlık bildirim mekanizmaları yer almıştır.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Şebekeler ve Su Yönetimi (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ij3dptdi/issue/56073/755861>

Tüketici Davranışı ve Dijitalleşme

Dijital platformlar üzerinden kullanıcıya gönderilen tüketim bildirimlerinin, bireysel enerji tasarrufunu %10 artırdığı görülmüştür.

Kaynak: Dergipark – Enerji Tüketiminde Dijital Davranış Analizi (2022)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/73049/1134735>

Araç / Teknoloji	Kullanım Alanı	Sağladığı Katkı
Akıllı Sayaçlar	Elektrik, su, gaz	Anlık izleme, kaçak tespiti, tüketim kontrolü
IoT Sensörleri	Evler, ofisler, sanayi	Ortam verilerine göre otomatik optimizasyon
Yapay Zekâ Algoritmaları	Enerji planlaması	Geleceğe dönük tüketim tahmini, tasarruf önerileri
Mobil Uygulamalar	Bireysel tüketim yönetimi	Kullanıcı farkındalığı, davranış değişikliği
Dijital Platformlar	Kurumsal raporlama	Karbon ayak izi hesaplama, sürdürülebilirlik raporu

3.2.4 Üretim Süreçlerinde Dijital Optimizasyon

Üretim süreçleri, sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerinin en kritik alanlarından biridir. Sanayi sektöründe enerji yoğunluğu, hammadde kullanımı ve atık üretimi, toplam çevresel etkinin büyük bölümünü oluşturur. Geleneksel

üretim modelleri çoğunlukla doğrusal (lineer) ekonomi anlayışına dayanırken; dijital optimizasyon, **kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını, atıkların azaltılmasını ve üretim hatlarının esnekleştirilmesini** mümkün kılar.

Bu bağlamda dijital optimizasyon, sadece işletmeler için maliyet avantajı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe ve rekabet gücüne de katkı sunar.



3.2.4.1 Üretim Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Amaçları

Enerji ve Kaynak Verimliliği: Daha az enerjiyle daha fazla üretim.

Atıkların Azaltılması: Geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerinin dijitalleştirilmesi.

Karbon Emisyonlarının Düşürülmesi: Endüstriyel emisyonların izlenmesi ve azaltılması.

Esnek Üretim: Talebe göre dinamik üretim planlama.

Maliyet Azaltımı: İş gücü, bakım ve hammadde maliyetlerinde düşüş.

3.2.4.2 Dijital Optimizasyon Araçları

a) SCADA ve IoT Tabanlı İzleme

Üretim hatlarında kurulu sensörler, makinelerin enerji tüketiminden proses sıcaklığına kadar çok sayıda parametreyi sürekli ölçer. Bu veriler SCADA sistemlerinde toplanarak üretimin hangi aşamalarda kaynak kaybı yaşadığını ortaya çıkarır.

b) Yapay Zekâ ile Tahmine Dayalı Bakım

Üretim tesislerinde makinelerin plansız duruşları, hem maliyet hem de kaynak israfı açısından büyük sorun yaratır. Yapay zekâ destekli analizlerle, ekipmanların arıza ihtimali önceden tahmin edilerek bakım faaliyetleri planlanır. Böylece hem enerji israfı önlenir hem de üretim sürekliliği sağlanır.

c) Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM)

Ürün geliştirme sürecinde dijital optimizasyon, tasarımdan geri dönüşüme kadar tüm aşamaları kapsar. PLM (Product Lifecycle Management) yazılımları sayesinde:

Üretim hataları en aza indirilir.

Geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı teşvik edilir.

Tasarım aşamasında çevresel etki hesaplamaları yapılır.

d) Otomasyon ve Robotik Sistemler

Endüstri 4.0 kapsamında üretim hatlarında kullanılan otomasyon sistemleri, insan kaynaklı hataları azaltır. Robotlar ve yapay zekâ destekli otomasyon sistemleri, üretim hızını artırırken enerji tüketimini optimize eder.

Örnek:

Ürün Yaşam Döngüsü (PLM) ve Çevresel Fayda

Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi uygulamaları sayesinde geri dönüştürülebilir malzeme kullanımının %30 arttığı, karbon salımının ise %12 azaldığı gösterilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Sürdürülebilirlik (2019)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijar/issue/47853/607441>

Araç	Kullanım Alanı	Sağladığı Katkı
IoT Sensörleri & SCADA	Üretim hattı izleme	Kaynak kayıplarının tespiti, enerji verimliliği
Yapay Zekâ Destekli Analiz	Tahmine dayalı bakım	Arıza önleme, süreklilik sağlama
PLM Yazılımları	Ürün yaşam döngüsü yönetimi	Çevresel etki analizi, geri dönüşüm oranlarının artışı
Robotik ve Otomasyon	Seri üretim, montaj hatları	İnsan hatalarının azaltılması, üretim hızının artışı
Veri Analitiği	Süreç optimizasyonu	Dinamik üretim planlama, maliyet düşüşü

Atık yönetimi, sürdürülebilirlik hedeflerinin en kritik unsurlarından biridir. Doğrusal ekonomi modelinde üretim ve tüketim süreçlerinin sonunda ortaya çıkan atıklar, çoğunlukla bertaraf edilmekte; bu ise hem ekonomik kayıplara hem de çevresel zararlara yol açmaktadır. Dijital optimizasyon, atıkların **kaynağında azaltılması, geri dönüşüm oranlarının yükseltilmesi, lojistik süreçlerinin planlanması ve döngüsel ekonomiye kazandırılması** açısından temel araçlar sunar.

Dijitalleşme sayesinde atık yönetimi artık yalnızca bertaraf etme değil, **izleme – analiz – geri kazanım – yeniden kullanım** aşamalarını kapsayan bütünsel bir sürece dönüşmüştür.

3.2.4.3 Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri

Atık Miktarının Azaltılması: Kaynakta ayrıştırma ve yeniden kullanım.

Lojistik Verimliliği: Atık toplama güzergâhlarının dijital olarak optimize edilmesi.

Geri Dönüşüm Oranlarının Artırılması: Akıllı sınıflandırma ve izleme teknolojileri.

Şeffaflık ve İzlenebilirlik: Atığın kaynaktan bertarafa kadar takip edilmesi.

Ekonomik Katkı: Geri dönüştürülebilir malzemelerin yeniden ekonomiye kazandırılması.

3.2.4.4 Dijital Optimizasyon Araçları

a) Akıllı Atık Toplama Sistemleri

Konteynerlere yerleştirilen IoT sensörleri, doluluk oranlarını sürekli ölçerek merkezi sisteme bildirir. Böylece araçlar yalnızca dolu konteynerleri boşaltır, yakıt ve iş gücü tasarrufu sağlanır.

b) RFID ve QR Kod Tabanlı İzleme

Atık torbalarına veya geri dönüşüm kutularına eklenen RFID/QR kodlar, atığın türünü ve miktarını izlenebilir kılar. Bu sayede geri dönüşüm merkezlerine doğru veri aktarımı sağlanır.

c) Yapay Zekâ Destekli Ayrıştırma Sistemleri

Atıkların türlerine göre otomatik sınıflandırılması, manuel ayrıştırmaya kıyasla hem hız hem de doğruluk sağlar. Görüntü işleme algoritmaları, plastik, metal, cam gibi malzemeleri yüksek doğruluk oranıyla ayırabilir.

d) Blokzincir ile Atık İzleme

Blokzincir tabanlı sistemler, atığın kaynaktan son bertaraf veya geri dönüşüm noktasına kadar şeffaf ve doğrulanabilir şekilde takip edilmesine olanak tanır. Bu özellikle sanayi atıklarında çevresel raporlama ve yasal uyum için önemlidir.

Örnekler;

Akıllı Atık Toplama

Bir çalışmada, sensör tabanlı atık toplama sistemlerinin yakıt tüketimini %18, operasyonel maliyetleri %22 azalttığı rapor edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Şehirlerde Atık Yönetimi Uygulamaları (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56509/768152>

RFID ile Atık İzleme

RFID tabanlı izleme teknolojileri sayesinde geri dönüşüm oranının %30 arttığı, kayıp ve kaçakların %40 azaldığı tespit edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – RFID Teknolojisinin Atık Yönetimine Katkısı (2019)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jss/issue/45697/572833>

Yapay Zekâ Destekli Ayırıştırma

Yapay zekâ tabanlı görüntü işleme algoritmaları ile çalışan otomatik sınıflandırma sistemlerinin doğruluk oranı %95 seviyesine ulaşmıştır. Bu sistemler özellikle plastik geri dönüşümünde önemli avantaj sağlamaktadır.

Kaynak: Dergipark – Yapay Zekâ ile Atık Ayırıştırma (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bbd/issue/63548/940245>

Araç / Teknoloji	Kullanım Alanı	Sağladığı Katkı
IoT Sensörleri	Konteyner doluluk takibi	Yakıt tasarrufu, toplama optimizasyonu
RFID / QR Kod	Atık torbası, kutu izleme	Tür/miktar takibi, şeffaf veri
Yapay Zekâ	Ayırıştırma tesisleri	Hızlı ve doğru sınıflandırma
Blokzincir	Sanayi ve belediye atıkları	İzlenebilirlik, yasal uyum, şeffaf raporlama

Atık süreçlerinde dijital optimizasyon, klasik bertaraf odaklı anlayışı değiştirerek **döngüsel ekonomiyi destekleyen, şeffaf ve izlenebilir** bir yönetim modeli sunmaktadır. Sensörler, yapay zekâ ve blokzincir gibi teknolojiler sayesinde hem çevresel hem de ekonomik kazanımlar elde edilmektedir. Atıkların artık yalnızca “yok edilmesi gereken kalıntılar” değil, **geri kazanılabilir değerler** olarak görülmesi, dijital optimizasyonun sürdürülebilirlikte oynadığı rolün en somut göstergesidir.

3.2.5 Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyon



Atık yönetimi, sürdürülebilirlik hedeflerinin en kritik unsurlarından biridir. Doğrusal ekonomi modelinde üretim ve tüketim süreçlerinin sonunda ortaya çıkan atıklar, çoğunlukla bertaraf edilmekte; bu ise hem ekonomik kayıplara hem de çevresel zararlara yol açmaktadır. Dijital optimizasyon, atıkların **kaynağında azaltılması, geri dönüşüm oranlarının yükseltilmesi, lojistik süreçlerinin planlanması ve döngüsel ekonomiye kazandırılması** açısından temel araçlar sunar.

Dijitalleşme sayesinde atık yönetimi artık yalnızca bertaraf etme değil, **izleme – analiz – geri kazanım – yeniden kullanım** aşamalarını kapsayan bütünsel bir sürece dönüşmüştür.

3.2.5.1 Atık Süreçlerinde Dijital Optimizasyonun Hedefleri

Atık Miktarının Azaltılması: Kaynakta ayrıştırma ve yeniden kullanım.

Lojistik Verimliliği: Atık toplama güzergâhlarının dijital olarak optimize edilmesi.

Geri Dönüşüm Oranlarının Artırılması: Akıllı sınıflandırma ve izleme teknolojileri.

Şeffaflık ve İzlenebilirlik: Atığın kaynaktan bertarafa kadar takip edilmesi.

Ekonomik Katkı: Geri dönüştürülebilir malzemelerin yeniden ekonomiye kazandırılması.

3.2.5.2 Dijital Optimizasyon Araçları

a) Akıllı Atık Toplama Sistemleri

Konteynerlere yerleştirilen IoT sensörleri, doluluk oranlarını sürekli ölçerek merkezi sisteme bildirir. Böylece araçlar yalnızca dolu konteynerleri boşaltır, yakıt ve iş gücü tasarrufu sağlanır.

b) RFID ve QR Kod Tabanlı İzleme

Atık torbalarına veya geri dönüşüm kutularına eklenen RFID/QR kodlar, atığın türünü ve miktarını izlenebilir kılar. Bu sayede geri dönüşüm merkezlerine doğru veri aktarımı sağlanır.

c) Yapay Zekâ Destekli Ayrıştırma Sistemleri

Atıkların türlerine göre otomatik sınıflandırılması, manuel ayrıştırmaya kıyasla hem hız hem de doğruluk sağlar. Görüntü işleme algoritmaları, plastik, metal, cam gibi malzemeleri yüksek doğruluk oranıyla ayırabilir.

d) Blokzincir ile Atık İzleme

Blokzincir tabanlı sistemler, atığın kaynaktan son bertaraf veya geri dönüşüm noktasına kadar şeffaf ve doğrulanabilir şekilde takip edilmesine olanak tanır. Bu özellikle sanayi atıklarında çevresel raporlama ve yasal uyum için önemlidir.

Örnek;

Akıllı Atık Toplama

Bir çalışmada, sensör tabanlı atık toplama sistemlerinin yakıt tüketimini %18, operasyonel maliyetleri %22 azalttığı rapor edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Şehirlerde Atık Yönetimi Uygulamaları (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56509/768152>

RFID ile Atık İzleme

RFID tabanlı izleme teknolojileri sayesinde geri dönüşüm oranının %30 arttığı, kayıp ve kaçakların %40 azaldığı tespit edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – RFID Teknolojisinin Atık Yönetimine Katkısı (2019)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jss/issue/45697/572833>

Yapay Zekâ Destekli Ayırıştırma

Yapay zekâ tabanlı görüntü işleme algoritmaları ile çalışan otomatik sınıflandırma sistemlerinin doğruluk oranı %95 seviyesine ulaşmıştır. Bu sistemler özellikle plastik geri dönüşümünde önemli avantaj sağlamaktadır.

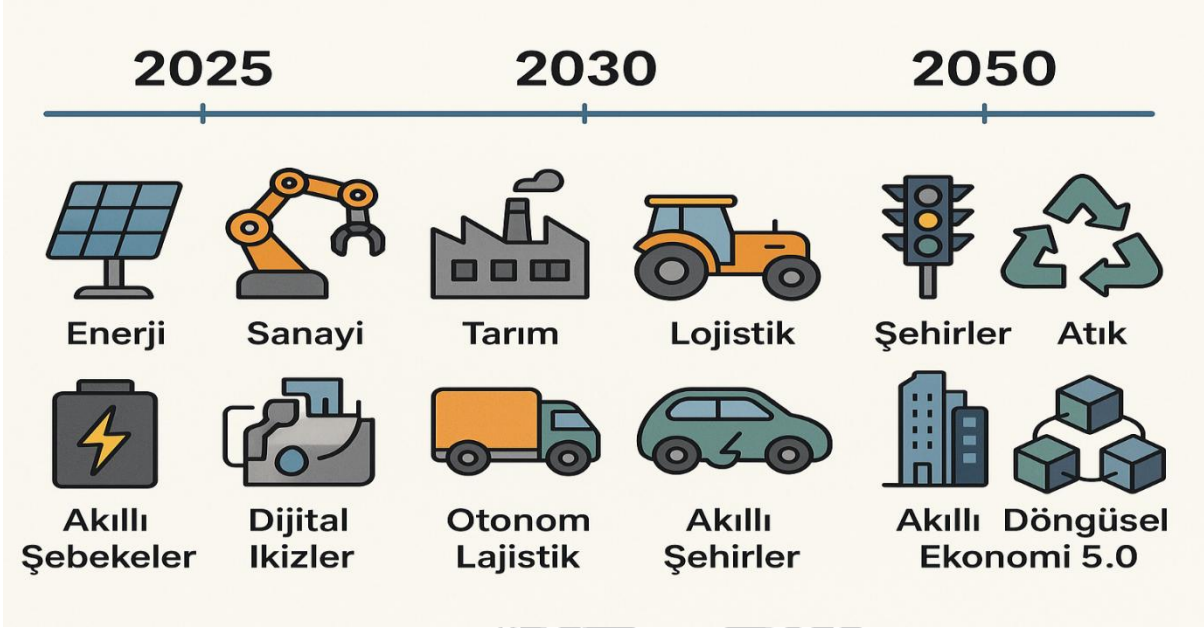
Kaynak: Dergipark – Yapay Zekâ ile Atık Ayırıştırma (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bbd/issue/63548/940245>

Araç / Teknoloji	Kullanım Alanı	Sağladığı Katkı
IoT Sensörleri	Konteyner doluluk takibi	Yakıt tasarrufu, toplama optimizasyonu
RFID / QR Kod	Atık torbası, kutu izleme	Tür/miktar takibi, şeffaf veri
Yapay Zekâ	Ayırıştırma tesisleri	Hızlı ve doğru sınıflandırma
Blokzincir	Sanayi ve belediye atıkları	İzlenebilirlik, yasal uyum, şeffaf raporlama

Atık süreçlerinde dijital optimizasyon, klasik bertaraf odaklı anlayışı değiştirerek **döngüsel ekonomiyi destekleyen, şeffaf ve izlenebilir** bir yönetim modeli sunmaktadır. Sensörler, yapay zekâ ve blokzincir gibi teknolojiler sayesinde hem çevresel hem de ekonomik kazanımlar elde edilmektedir. Atıkların artık yalnızca “yok edilmesi gereken kalıntılar” değil, **geri kazanılabilir değerler** olarak görülmesi, dijital optimizasyonun sürdürülebilirlikte oynadığı rolün en somut göstergesidir.

3.2.6 Gelecek Trendleri



Dijital optimizasyon, yalnızca bugünün kaynak verimliliğini artırmakla kalmayıp, gelecekteki sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada da kritik bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde 2030 sürdürülebilir kalkınma hedefleri (SDG'ler) ve 2050 karbon nötrlüğü vizyonu, tüketim, üretim ve atık yönetimi süreçlerinin dijital çözümlerle yeniden yapılandırılmasını zorunlu hale getirmektedir.

Gelecek trendleri incelendiğinde, her sektör için ortak bir nokta öne çıkmaktadır: **ölçülebilirlik, şeffaflık ve otomasyon**. Enerjiden tarıma, sanayiden lojistiğe kadar her alanda dijital optimizasyon, hem ekonomik büyümeyi hem de çevresel sürdürülebilirliği aynı anda destekleyen bir araç haline gelmektedir.

3.2.6.1 Enerji Sektöründe Gelecek Trendleri

3.2.6.2 Akıllı Şebekeler ve Dağıtık Enerji Kaynakları

Enerji sektörü, dijital optimizasyon trendlerinin en hızlı geliştiği alanlardan biridir. Akıllı şebekeler (smart grids), enerjiyi tüketici ile üretici arasında çift yönlü olarak yönetebilmekte; güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir kaynakların şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Dağıtık enerji kaynakları (DER – Distributed Energy Resources) sayesinde evler, fabrikalar ve hatta küçük işletmeler kendi elektriğini üretilip fazlasını şebekeye aktarabilmektedir.

- **Öngörü:** 2030 yılına kadar AB ülkelerinde akıllı şebekeler aracılığıyla enerji kayıplarının %15 azaltılması hedeflenmektedir.
- **Türkiye Perspektifi:** Organize sanayi bölgelerinde yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştıracak mikro şebeke projeleri öne çıkacaktır.

3.2.6.3 Enerji Depolama ve Dijital Optimizasyon

Rüzgâr ve güneş gibi kaynakların değişken yapısı, enerji depolamayı kritik hale getirmiştir. Gelecekte dijitalleşme, batarya sistemlerini şebeke ile entegre ederek:

- Talep dalgalanmalarını dengeleyecek,
- Karbon yoğun enerji tüketimini azaltacak,
- Elektrik fiyatlarını daha öngörülebilir hale getirecektir.

3.2.6.3.4 Yapay Zekâ ile Enerji Talep Tahmini

Yapay zekâ algoritmaları, tüketim verilerini, hava durumu raporlarını ve ekonomik göstergeleri kullanarak enerji talebini önceden tahmin edecektir. Bu sayede:

- Pik yükler önlenecek,
- Yenilenebilir kaynaklardan maksimum verim alınacak,
- Enerji maliyetleri düşürülecektir.

Bulgular

Bir araştırmada yapay zekâ destekli enerji talep tahmin sistemlerinin elektrik üretim planlama hatalarını %20 oranında azalttığı bulunmuştur.

Kaynak: Dergipark – Yapay Zekâ ile Enerji Talep Tahmini (2021)
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/67146/1019480>

3.2.6.3.5 Sanayi ve Üretim Sektöründe Gelecek Trendleri

3.2.6.3.6 Dijital İkizlerin Yaygınlaşması

Sanayi tesislerinde dijital ikizler, üretim hatlarının sanal bir kopyasını oluşturarak gerçek zamanlı senaryoların test edilmesine olanak tanıyacaktır.

- **Öngörü:** 2030 yılına kadar dünya genelindeki büyük üretim tesislerinin %60'ında dijital ikiz teknolojilerinin kullanılması beklenmektedir.
- Enerji tüketimi, hammadde kayıpları ve bakım süreçleri bu sanal modeller üzerinden optimize edilecektir.

3.2.6.3.7 Yapay Zekâ Destekli Üretim Planlama

Üretim hatlarının kapasite, talep ve maliyet parametrelerine göre yapay zekâ algoritmaları tarafından dinamik olarak planlanması, **karbonsuz üretim** hedeflerine katkı sağlayacaktır.

3.2.6.3.8 Karbonsuz Üretim Hedefleri

Avrupa Birliği'nin CBAM düzenlemeleri ile birlikte karbon yoğun üretim yöntemleri maliyetli hale gelecek, dijital optimizasyon sanayi kuruluşlarının rekabet gücünü koruması için bir zorunluluk olacaktır.

Bulgular

Yapay zekâ tabanlı üretim planlama yazılımlarının enerji verimliliğini %18 artırdığı ve üretim kayıplarını %12 azalttığı rapor edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Endüstri 4.0 ve Yapay Zekâ Uygulamaları (2020)
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56073/755885>

3.2.6.4 Tarım ve Gıda Sektöründe Gelecek Trendleri

3.2.6.4.4 Hassas Tarım (Precision Agriculture)

Tarımda dijital optimizasyonun en önemli trendi, **hassas tarım** uygulamalarıdır. IoT sensörleri, uydu görüntüleri ve drone teknolojileri sayesinde toprak nemi, sıcaklık, besin seviyeleri ve hava koşulları anlık olarak takip edilebilmektedir.

- Çiftçiler, sulama ve gübreleme kararlarını veri odaklı alabilmekte, su tüketimi %30'a kadar azaltılabilmektedir.
- Hastalık tespitinde yapay zekâ tabanlı görüntü işleme teknolojileri ile ürün kayıpları önceden tahmin edilebilmektedir.

Bulgular

Bir çalışmada sensör destekli hassas tarım uygulamalarının verimliliği %25 artırdığı, su tüketimini ise %30 azalttığı rapor edilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Hassas Tarımda IoT Uygulamaları (2021)
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/67146/1019463>

3.2.6.5 Gıda Tedarik Zinciri ve Dijital İzlenebilirlik

Gıda üretiminden tüketiciye ulaşıncaya kadar geçen süreçlerde tedarik zinciri şeffaflığı önem kazanmaktadır.

- Blokzincir teknolojisi, gıda ürünlerinin **çiftlikten sofraya** kadar tüm yolculuğunu izlenebilir kılar.
- Soğuk zincir lojistiğinde IoT tabanlı sensörler sayesinde gıdaların sıcaklık koşulları sürekli izlenir, bozulmalar önlenir.

3.2.6.5.4 Gıda Atıklarının Dijital Yönetimi

Birleşmiş Milletler verilerine göre dünyada üretilen gıdanın yaklaşık %30'u israf edilmektedir. Dijital çözümler bu kaybı azaltmayı hedefler:

- Yapay zekâ destekli stok yönetimi, gıda işletmelerinde raf ömrünü daha iyi planlar.
- Akıllı mutfak sistemleri, evsel tüketimde yiyecek israfını azaltır.

Bulgular

Türkiye'de yapılan bir çalışmada, dijital stok yönetimi sistemlerinin gıda atıklarını %18 azalttığı belirlenmiştir.

Kaynak: Dergipark – Gıda İsrafının Dijital Yöntemlerle Azaltılması (2020)
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56073/755879>

Teknoloji	Kullanım Alanı	Sağladığı Katkı
IoT Sensörleri	Sulama, gübreleme	Su tüketiminde %30 azalma
Drone & Görüntü İşleme	Bitki hastalık tespiti	Ürün kayıplarında azalma
Blokzincir	Tedarik zinciri	Gıda güvenliği, şeffaflık
Yapay Zekâ	Stok yönetimi	Gıda israfında %15–20 azalma

3.2.6.6 Ulaşım ve Lojistikte Gelecek Trendleri

3.2.6.6.4 Otonom ve Elektrikli Araçlar

Ulaşımında karbon emisyonlarını azaltmak için elektrikli araçların yaygınlaşması kritik bir trenddir. Bunun yanında, **otonom araçlar** ile lojistik operasyonlarının daha verimli planlanması mümkün hale gelecektir.

- Otonom kamyon filoları, yakıt tüketimini optimize ederek karbon salımını %10–15 azaltabilir.
- Elektrikli otobüsler ve paylaşımlı araç platformları, şehir içi ulaşımında emisyonları düşürür.

Bulgular

Bir araştırmada elektrikli otobüslerin dizel otobüslere kıyasla yıllık karbon salımını %40 azalttığı ortaya konmuştur.

Kaynak: Dergipark – Elektrikli Araçların Ulaşımında Çevresel Etkileri (2021)
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/67146/1019474>

3.2.6.7 Akıllı Lojistik Ağları

Dijital optimizasyon, lojistikte rotaların daha etkin planlanmasını sağlamaktadır.

- IoT sensörleriyle araç konumları ve yük durumları izlenebilir.
- Yapay zekâ destekli rota optimizasyonu, hem yakıt tüketimini hem de teslimat sürelerini kısaltır.

2030'a kadar lojistik firmalarının %70'inin yapay zekâ destekli rota planlama yazılımlarını kullanacağı tahmin edilmektedir.

3.2.6.8 Blokzincir ile Şeffaf Tedarik Zinciri

Küresel lojistik ağlarında sahtecilik, gecikme ve kayıpları önlemek için blokzincir tabanlı sistemler giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sistemler:

- Malların üretimden teslimata kadar izlenmesini,
- Karbon ayak izinin hesaplanmasını,
- Tedarik zinciri risklerinin yönetilmesini sağlamaktadır.

Bulgular

Türkiye'de yapılan bir çalışmada blokzincir tabanlı tedarik zinciri izleme sistemlerinin, kayıp oranlarını %25 azalttığı, teslimat güvenilirliğini ise %30 artırdığı belirtilmiştir.

Kaynak: Dergipark – Blokzincir ile Lojistikte Dijitalleşme (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56073/755867>

Teknoloji	Kullanım Alanı	Katkı
Elektrikli Araçlar	Şehir içi ulaşım, lojistik	Karbon salımında %40 azalma
Otonom Araçlar	Uzun yol taşımacılık	Yakıt optimizasyonu, güvenlik
Yapay Zekâ Rota Planlama	Lojistik ağları	Yakıt tüketiminde %15 azalma
Blokzincir	Tedarik zinciri izleme	Kayıp oranlarında %25 azalma, şeffaflık

3.2.6.9 Bina ve Şehir Yönetiminde Gelecek Trendleri

3.2.6.9.4 Akıllı Şehirler ve Dijital Altyapı

Şehirleşmenin hızla artması, enerji tüketimini ve çevresel baskıyı artırmaktadır. **Akıllı şehir konsepti**, dijital optimizasyonun en yoğun uygulama alanlarından biridir.

- Akıllı aydınlatma sistemleri sayesinde elektrik tüketiminde %30'a varan tasarruf sağlanabilmektedir.
- Trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik akıllı kavşak ve sinyalizasyon sistemleri, yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını düşürmektedir.
- Akıllı su yönetimi çözümleri, şehirlerdeki kayıp-kaçak oranlarını azaltmaktadır.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Şehirlerde Enerji Yönetimi (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/67146/1019475>

3.2.6.9.5 IoT Tabanlı Bina Otomasyon Sistemleri

Gelecekte binalar yalnızca yaşam alanları değil, aynı zamanda **enerji üreticileri ve yöneticileri** olacak.

- Akıllı sensörler sayesinde bina içi sıcaklık, nem ve aydınlatma otomatik olarak ayarlanabilecek.
- Güneş panelleri ve enerji depolama sistemleriyle entegre edilen akıllı binalar, şebekeye enerji satabilecek.
- Yapay zekâ tabanlı otomasyon, binalarda %20–25 enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Kaynak: Dergipark – Akıllı Binalarda IoT Uygulamaları (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/56073/755888>

3.2.6.9.6 Atık Su Yönetimi

Şehirlerde su tüketimi ve atık su yönetimi kritik bir sorun olmaya devam etmektedir. Dijital optimizasyon ile:

- Atık su arıtma tesislerinde enerji tüketimi %15 azaltılabilir.
- Su geri kazanım oranları artırılabilir.
- Akıllı şebekeler sayesinde su kayıp-kaçak oranı düşürülebilir.

Kaynak: Dergipark – Su Yönetiminde Dijital Çözümler (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/67146/1019479>

Teknoloji	Kullanım Alanı	Katkı
Akıllı Aydınlatma	Şehir sokakları	%30 enerji tasarrufu
Akıllı Kavşak Sistemleri	Trafik yönetimi	Yakıt tüketiminde azalma
IoT Sensörleri	Bina otomasyonu	%20–25 enerji tasarrufu
Akıllı Su Yönetimi	Şebeke & arıtma	Kayıp-kaçak oranında düşüş

3.2.6.10 Atık ve Döngüsel Ekonomi Perspektifi

3.2.6.10.4 Yapay Zekâ Tabanlı Atık Ayrıştırma

Atık yönetiminin geleceğinde yapay zekâ destekli sınıflandırma sistemleri öne çıkacaktır. Görüntü işleme algoritmaları sayesinde plastik, cam, metal gibi materyaller %95 doğrulukla ayrıştırılabilmektedir.

Kaynak: Dergipark – Yapay Zekâ ile Atık Yönetimi (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bbd/issue/63548/940245>

3.2.6.10.5 Blokzincir ile Atık ve Karbon İzlenebilirliği

Blokzincir tabanlı sistemler sayesinde:

- Atıkların kaynaktan geri dönüşüme kadar izlenmesi,
- Sanayi atıklarının yasal uyumluluk denetimi,
- Karbon kredilerinin şeffaf ticareti mümkün hale gelecektir.

Kaynak: Dergipark – Blokzincir ile Döngüsel Ekonomi (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56073/755876>

3.2.6.10.6 Döngüsel Ekonomi 5.0

Gelecekte döngüsel ekonomi yalnızca geri dönüşüm değil, **atığın hammaddeye dönüşmesi** prensibiyle çalışacaktır.

- Plastik atıklardan yeni ürünler üretmek,
- Endüstriyel atık ısını enerjiye çevirmek,
- Tarımsal atıkları biyogaz üretiminde kullanmak ön planda olacaktır.

Kaynak: World Economic Forum – Circular Economy Transition Report (2021) [https://www.wcoomd.org/-](https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/research/report/circular-economy-report-en.pdf)

[/media/wco/public/global/pdf/topics/research/report/circular-economy-report-en.pdf](https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/research/report/circular-economy-report-en.pdf)

Teknoloji	Kullanım Alanı	Katkı
Yapay Zekâ Ayırıştırma	Geri dönüşüm tesisleri	%95 doğrulukla sınıflandırma
Blokzincir İzleme	Atık & karbon yönetimi	Şeffaflık, yasal uyum
Enerji Geri Kazanımı	Endüstriyel atıklar	Atık ısının enerjiye dönüştürülmesi
Biyoenerji Çözümleri	Tarımsal atık	Yenilenebilir enerji üretimi

3.2.6.11 Politika ve Eğitim Boyutu

3.2.6.11.4 Küresel Politikalar

- **AB Yeşil Mutabakatı:** Karbon yoğun ürünler için sınırda vergilendirme (CBAM).
- **Paris Anlaşması:** 2050'ye kadar karbon nötrlüğü.
- **Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Hedefi:** Dijital karbon muhasebesi zorunluluklarını gündeme getirmektedir.

Kaynak: Dergipark – Türkiye’de Yeşil Mutabakat ve Dijitalleşme (2021)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/67146/1019292>

3.2.6.11.5 Eğitim ve İnsan Kaynağı

- Üniversitelerde **akıllı şehirler, dijital enerji, endüstri 4.0** programları yaygınlaşacak.
- Meslek dönüşümleri: klasik bakım teknisyenlerinin yerini **dijital bakım uzmanları** alacak.
- Sürekli öğrenme kültürü, dijital okuryazarlık ve yapay zekâ ile çalışabilme becerisi kritik hale gelecek.

Kaynak: Dergipark – Dijital Dönüşüm ve İnsan Kaynağı (2020)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijss/issue/56073/755873>

Alan	Trend	Katkı
Politika	CBAM, Yeşil Mutabakat	Karbonsuz üretim teşviki
Eğitim	Dijital mühendislik programları	Nitelikli iş gücü
Meslek Dönüşümü	Dijital bakım uzmanlığı	Verimlilik, yeni istihdam alanları

Gelecek trendleri, dijital optimizasyonun her sektörde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada vazgeçilmez bir araç olacağını göstermektedir. Enerji sektöründen sanayiye, tarımdan lojistiğe, şehir yönetiminden atık ekonomisine kadar geniş bir alanda **ölçülebilirlik, şeffaflık, otomasyon ve yapay zekâ** dört temel eksen olarak öne çıkmaktadır.



- Enerjide **akıllı şebekeler** ve **yapay zekâ tahminleri**,
- Sanayide **dijital ikiz** ve **karbonsuz üretim**,
- Tarımda **hassas sulama** ve **gıda israfının azaltılması**,
- Lojistikte **otonom** ve **elektrikli araçlar**,
- Şehirlerde **akıllı altyapılar**,
- Atık yönetimde **blokzincir** ve **döngüsel ekonomi 5.0**,
- Politika ve eğitimde **dijital karbon muhasebesi** ve **yeni meslekler**

geleceğin dijital optimizasyon stratejilerini şekillendirecektir.



İklim, Çevre Ve Sürdürülebilirlik Odağında E-Verimlilik

4. E-Verimlilik Ve Akıllı Enerji Sistemleri

4.1 Akıllı Enerji Yönetimi Ve İot Destekli İzleme Sistemleri

Akıllı Enerji Yönetim Sistemlerinin Temelleri

4.1.1 Tanım ve Temel Prensipler

Günümüz dünyasında enerji, ekonomik kalkınmanın, teknolojik gelişmenin ve toplumsal refahın en temel unsurlarından biri. Ancak enerjiye olan talebin hızla artması, **kaynakların tükenme riski, maliyet baskıları ve iklim değişikliği** gibi büyük zorlukları da beraberinde getiriyor. Bu tablo, enerji yönetiminin artık yalnızca maliyet düşürme amacıyla yapılan teknik bir faaliyet olmaktan çıkıp, **stratejik bir sürdürülebilirlik ve verimlilik yaklaşımına dönüşmesini** zorunlu kılıyor. İşte **akıllı enerji yönetimi** bu dönüşümün merkezinde yer alıyor.

4.1.1.1 Akıllı Enerji Yönetimi Nedir?

En yalın tanımıyla akıllı enerji yönetimi, **enerjiyi doğru zamanda, doğru yerde ve doğru miktarda kullanmak için dijital teknolojilerden yararlanan bütünleşik bir sistem yaklaşımıdır**. Bu sistem, **enerji tüketimini sürekli izler, analiz eder ve gerekli durumlarda otomatik olarak iyileştirmeler yapar**. Böylece hem enerji verimliliği artar, hem maliyetler düşer hem de çevresel etkiler azaltılır.

Klasik enerji yöntemleri çoğunlukla **manuel ölçüm, periyodik raporlama ve geriye dönük analizler** üzerine kuruluken, akıllı enerji yönetimi **gerçek zamanlı veriler, otomasyon ve öngörüselsel analizler** kullanarak enerji kullanımını proaktif bir şekilde yönetir.

Bu yaklaşımın arkasında **Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği, bulut bilişim** ve bazı durumlarda **yapay zeka** gibi teknolojiler vardır. Bu teknolojiler sayesinde enerji sistemleri, sadece tüketim miktarını kaydeden basit altyapılar olmaktan çıkıp, **karar verebilen, esnek ve kendini geliştirebilen akıllı sistemlere dönüşür**.

Örneğin, bir fabrikanın üretim tesisinde kullanılan akıllı enerji yönetim sistemi, makinelerin enerji tüketimini gerçek zamanlı izleyerek, **en yüksek verimlilik sağlanacak şekilde otomatik ayarlamalar** yapabilir. Gerekğinde yöneticilere uyarı gönderir, hatta bazı durumlarda **müdahaleyi kendi kendine gerçekleştirebilir**.

4.1.1.2 Neden Akıllı Enerji Yönetimi?

Akıllı enerji yönetim sistemlerinin ortaya çıkışını zorunlu kılan nedenler birkaç başlıkta özetlenebilir:

- **Artan enerji maliyetleri:** Enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar, işletmeler için ciddi bir bütçe riski oluşturuyor.
- **Sürdürülebilirlik hedefleri:** Karbon emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğiyle mücadele, enerji kullanımının daha kontrollü olmasını gerektiriyor.
- **Regülasyonlar:** Ulusal ve uluslararası mevzuatlar, enerji verimliliğini artırmayı ve emisyonları azaltmayı zorunlu kılıyor.
- **Teknolojik imkanlar:** IoT sensörleri, akıllı sayaçlar ve veri işleme sistemleri, eskiden mümkün olmayan düzeyde detaylı ve gerçek zamanlı izleme imkanı sunuyor.

Bu unsurlar, enerji yönetimini yalnızca operasyonel bir süreç olmaktan çıkarıp, **kurumsal stratejilerin merkezine yerleştiren** akıllı sistemlere geçişi kaçınılmaz hale getiriyor.

4.1.2 Akıllı Enerji Yönetiminin Temel Prensipleri



Akıllı enerji yönetimi yalnızca gelişmiş teknolojilerden ibaret değildir; onu değerli kılan, altında yatan **temel prensiplerdir**. Bu prensipler sistemi anlamak için bir yol haritası niteliğindedir:

A. Veriye Dayalı Karar Alma

Enerji yönetiminde **"ölçemediğinizi yönetemezsiniz"** ilkesi çok önemlidir. Akıllı enerji yönetimi, tüketim ve üretim verilerini sürekli toplar, işler ve anlamlı hale getirir. Bu sayede, hangi süreçlerin gereksiz enerji harcadığı veya hangi cihazların düşük verimle çalıştığı net biçimde ortaya çıkar. Veriler sadece izleme için değil, aynı zamanda **karar destek mekanizmaları** oluşturmak için de kullanılır.

B. Gerçek Zamanlı İzleme ve Hızlı Tepki

Geleneksel sistemlerde sorunlar genellikle **sonradan fark edilirken**, akıllı sistemlerde **anında müdahale** mümkündür. Örneğin bir makinedeki anormal enerji artışı, sistem tarafından algılanır ve kullanıcıya otomatik uyarı gönderilir; hatta gerekirse makine güvenli moda durdurulur. Böylece enerji kaybı ve olası arızalar önlenir.

C. Otomasyon ve Öngörü

Akıllı enerji yönetimi sadece anlık duruma tepki vermez, aynı zamanda geleceği de öngörür. Yapay zeka destekli analizler sayesinde sistem, **tüketim trendlerini tahmin eder**, üretim planlarına veya enerji fiyatlarındaki değişimlere göre **önceden hazırlık yapar**. Bu, özellikle büyük sanayi tesislerinde ciddi maliyet avantajı sağlar.

D. Esneklik ve Uyum Yeteneği

Enerji piyasaları ve üretim koşulları hızla değişebilir. Akıllı enerji sistemleri, bu değişimlere **hızla uyum sağlayacak esneklikte** tasarlanmıştır. Gerektiğinde farklı enerji kaynaklarına (örneğin yenilenebilir enerjiye) geçiş yapılabilir veya kullanım senaryolarını yeniden optimize edebilir.

E. Sürdürülebilirlik Odaklılık

Enerji yönetiminin artık yalnızca maliyet kontrolü için yapılmadığı, aynı zamanda **karbon ayak izini azaltmak ve çevresel etkileri minimize etmek** için de kritik olduğu bir dönemdeviz. Akıllı enerji sistemleri, sürdürülebilirlik hedefleriyle entegre çalışarak, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç haline gelmiştir.

F. Kullanıcı Dostu ve Erişilebilirlik

Teknolojinin en büyük değeri, karmaşık verileri ve süreçleri kullanıcı için basitleştirebilmesidir. Akıllı enerji yönetimi, **grafik arayüzler, mobil uygulamalar ve otomatik raporlama** gibi özelliklerle, uzman olmayan kişilerin bile sistemden kolayca yararlanabilmesini sağlar.

4.1.3 Akıllı Enerji Yönetimi

4.1.3.1 Sadece Teknoloji Değil, Bir Dönüşüm

Bu noktada vurgulanması gereken önemli bir unsur şudur: Akıllı enerji yönetimi yalnızca bir yazılım veya cihaz yatırımı değildir; aynı zamanda **kurumsal ve operasyonel bir dönüşüm sürecidir**. Enerji verimliliği hedeflerinin, işletme stratejilerinin ve çalışan alışkanlıklarının yeniden tasarlanmasını da içerir.

Örneğin, üretim süreçlerinde enerji tüketim hedefleri belirlemek, tüketim davranışlarını değiştirmek ve çalışanlara bu sistemin nasıl kullanılacağını öğretmek, en az teknolojinin kendisi kadar önemlidir.

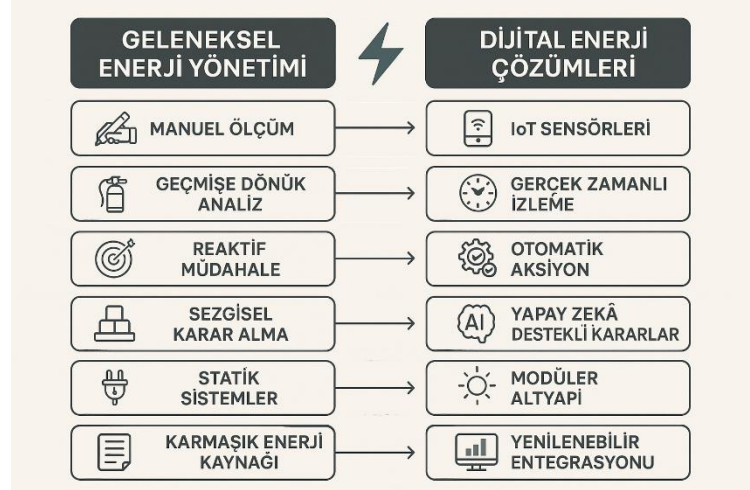
4.1.3.2 Neden Bu Prensipler Önemli?

Akıllı enerji yönetimi, yalnızca enerji tasarrufu değil, **daha sürdürülebilir, rekabetçi ve geleceğe uyumlu bir işletme modeli** anlamına gelir. Veriye dayalı karar alma, gerçek zamanlı izleme, otomasyon, esneklik ve sürdürülebilirlik gibi prensipler, sistemin başarısını belirleyen temel yapı taşlarıdır.

Bu sayede işletmeler ve kurumlar yalnızca **bugünün ihtiyaçlarına değil**, aynı zamanda **gelecekteki enerji ve iklim zorluklarına da hazırlıklı** olur.

4.1.4 Geleneksel enerji yönetimi ile dijital çözümler arasındaki farklar

Enerji yönetimi, uzun yıllar boyunca işletmeler ve kamu kurumları için büyük ölçüde **manuel süreçlere** dayanan bir faaliyet olarak yürütüldü. Ancak son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, bu alanda köklü bir dönüşümü beraberinde getirdi. **Dijital çözümler** sayesinde enerji yönetimi artık yalnızca ölçüm ve raporlama odaklı bir operasyon olmaktan çıkıp, **dinamik, öngörülü ve otomatikleşmiş bir sisteme** dönüşüyor. Peki, geleneksel enerji yönetimi ile dijital çözümler arasındaki temel farklar neler?



A. Veri Yönetimi: Dönemsel Ölçümlerden Gerçek Zamanlı İzlemeye

Geleneksel enerji yönetimi, çoğunlukla **aylık ya da yıllık tüketim raporları** üzerinden yürütülür. Ölçümler genellikle manuel olarak alınır ve geçmişe dönük analizler yapılır. Bu yaklaşım, enerji tüketimindeki ani artışları ya da verimlilik sorunlarını **ancak geriye dönük olarak** fark etmeyi mümkün kılar. Dijital çözümler ise bu süreci tamamen değiştirir. **IoT sensörleri, akıllı sayaçlar ve bulut tabanlı yazılımlar** sayesinde enerji tüketimi **anlık olarak izlenir** ve veriler sürekli işlenir. Böylece yöneticiler yalnızca geçmişi değil, mevcut durumu görebilir ve gerektiğinde anında müdahale edebilir.

B. Müdahale Yeteneği: Reaktif Yaklaşımdan Proaktif Yönetim

Geleneksel sistemlerde enerji yönetimi genellikle **reaktif** bir süreçtir; yani sorun ortaya çıktıktan sonra çözüm aranır. Örneğin, yüksek enerji faturası geldiğinde verimlilik sorunu fark edilir ve müdahale edilir. Dijital çözümler bu yaklaşımı **proaktif** hale getirir. Gerçek zamanlı izleme, anormal tüketim davranışlarını anında tespit eder. Dahası, **otomatik kontrol mekanizmaları** sayesinde sistem, bir sorun fark edildiğinde **kendi kendine aksiyon alabilir** (örneğin aşırı enerji tüketen bir cihazı düşük moda alabilir). Bu hem kayıpları önler hem de operasyonel sürekliliği artırır.

C. Karar Alma: Deneyime Dayalı Yaklaşımdan Veriye Dayalı Stratejiye

Geleneksel yöntemlerde enerji yönetimi büyük ölçüde **uzmanların deneyimlerine ve sezgilerine** dayanır. Bu da özellikle karmaşık tesislerde enerji verimliliğini sınırlayan bir unsur olabilir.

Dijital çözümler ise **büyük veri analitiği** ve **yapay zeka destekli karar mekanizmaları** ile çalışır. Veriler, yalnızca geçmiş performansı göstermek için değil, aynı zamanda **gelecekteki tüketim trendlerini öngörmek ve stratejik kararları desteklemek** için de kullanılır.

D. Esneklik: Statik Sistemlerden Uyarlanabilir Altyapılara

Geleneksel enerji yönetimi sistemleri genellikle **katı ve tek yönlü** yapılara sahiptir; değişen üretim planlarına, piyasa fiyatlarına veya enerji kaynaklarındaki çeşitliliğe hızlı uyum sağlayamazlar.

Dijital çözümler ise **esnek ve modülerdir**. Akıllı enerji yönetimi, talebe göre üretim planını optimize edebilir, enerji maliyetlerini düşürmek için **fiyat dalgalanmalarına göre tüketim stratejisi** geliştirebilir ve gerektiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarını devreye alabilir.

E. Kullanıcı Deneyimi: Karmaşık Raporlardan Etkileşimli Panellere

Geleneksel yöntemlerde hazırlanan raporlar genellikle teknik ve anlaşılması zor belgelerden oluşur. Bu da üst yönetim veya saha çalışanları için kullanım kolaylığını sınırlar.

Dijital sistemler, kullanıcı dostu arayüzlerle çalışır. **Etkileşimli paneller, mobil uygulamalar ve otomatik raporlar** sayesinde enerji yönetimi herkes için anlaşılır hale gelir.

4.1.4.1 Dönüşümün Katma Değeri

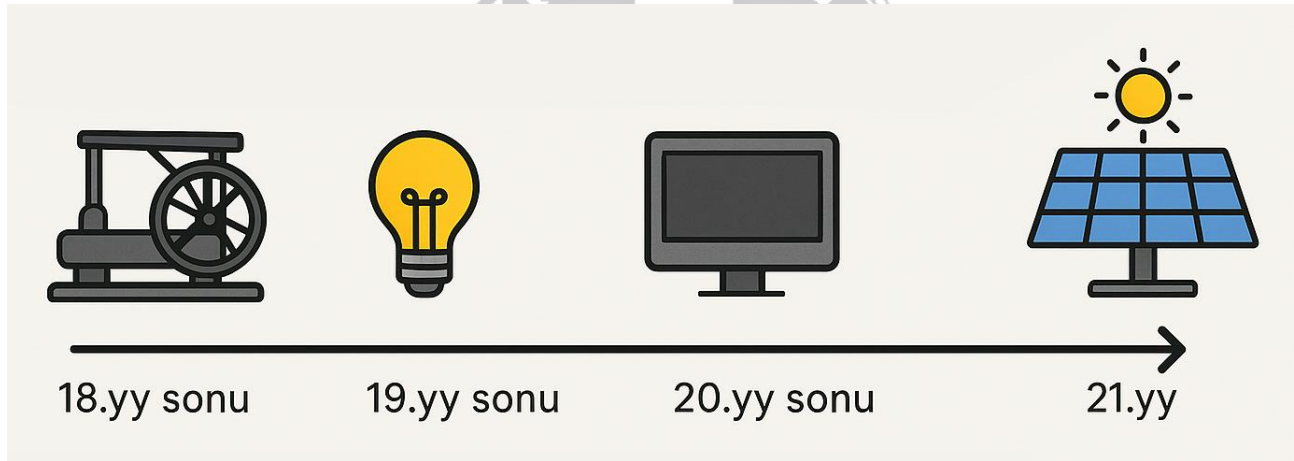
Geleneksel yöntemler enerji yönetiminde temel bir çerçeve sunsa da, **hız, esneklik ve sürdürülebilirlik açısından yetersiz** kalır. Dijital çözümler ise **gerçek zamanlı izleme, otomasyon, öngörü ve kullanıcı dostu tasarım** sayesinde enerji yönetimini stratejik bir avantaja dönüştürür. Bu dönüşüm yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda **karbon emisyonlarının düşürülmesine ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına** da katkı sağlar.

Kriter	Geleneksel Enerji Yönetimi	Dijital Enerji Yönetimi
Veri Yönetimi	Dönemsel ölçümler (aylık/yıllık), manuel veri toplama	Gerçek zamanlı izleme, IoT sensörleriyle sürekli veri akışı
Analiz ve Raporlama	Geçmişe dönük, sınırlı analizler	Büyük veri analitiği, öngörülü ve detaylı raporlama
Müdahale Yeteneği	Sorun sonrası reaktif müdahaleler	Anlık uyarılar, otomatik aksiyon alma (proaktif yönetim)
Karar Alma	Deneyime dayalı, sezgisel kararlar	Veriye dayalı, yapay zeka destekli stratejik kararlar

Esneklik	Statik sistemler, değişen koşullara yavaş uyum	Modüler ve uyarlanabilir altyapı, dinamik optimizasyon
Enerji Kaynak Yönetimi	Tek tip enerji kaynağına odaklı	Farklı enerji kaynaklarının (yenilenebilir vb.) entegre yönetimi
Kullanıcı Deneyimi	Teknik, karmaşık raporlar	Etkileşimli paneller, mobil uygulamalar, kullanıcı dostu arayüzler
Sürdürülebilirlik Katkısı	Sınırlı karbon yönetimi	Karbon emisyonlarını düşüren ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşım
Maliyet Yönetimi	Sorun sonrası maliyet azaltma	Önleyici optimizasyon, uzun vadede daha düşük işletme maliyetleri

4.1.5 Enerji 4.0 Ve Endüstriyel Dönüşüm

Enerji, sanayi devrimlerinden bu yana ekonomik ve teknolojik gelişmenin merkezinde yer aldı. Buhar makinesinin icadıyla başlayan birinci sanayi devriminden günümüzün dijitalleşmiş fabrikalarına kadar, her dönemde enerji üretimi ve kullanımı büyük dönüşümler geçirdi. İşte **Enerji 4.0**, bu dönüşümün en güncel aşamasını temsil ediyor.



Peki, nedir Enerji 4.0? Bunu anlamak için önce kısaca geçmişe bakalım.

4.1.5.1 Sanayi Devrimleri ve Enerjinin Evrimi

Sanayi devrimleri yalnızca üretim yöntemlerini değil, enerji kullanım biçimlerini de kökten değiştirdi:

Sanayi Devrimi	Dönem	Enerji Kaynağı	Öne Çıkan Özellik
1. Sanayi Devrimi	18. yy sonları	Buhar gücü, kömür	Mekanikleşme, buharlı makineler
2. Sanayi Devrimi	19. yy sonları	Elektrik, petrol	Seri üretim, montaj hatları

3. Sanayi Devrimi	20. yy sonları	Nükleer enerji, otomasyon	Bilgisayarlar, elektronik sistemler
4. Sanayi Devrimi	21. yy	Yenilenebilir enerji, dijital altyapılar	IoT, yapay zeka, akıllı sistemler

Enerji 4.0, işte bu son aşamada ortaya çıkıyor. Dijital teknolojilerin (Nesnelerin İnterneti, yapay zeka, büyük veri) enerji yönetimine entegre edilmesiyle, enerji sistemleri **daha akıllı, esnek ve sürdürülebilir** hale geliyor.

4.1.5.2 Enerji 4.0 Nedir?

Enerji 4.0, **Endüstri 4.0'ın enerji alanındaki yansımasıdır**. Yani akıllı makineler, sensörler ve yazılımlar, enerji altyapısında da kullanılmaya başlıyor. Bu sayede enerji üretiminden tüketimine kadar tüm süreçler, dijital teknolojilerle izlenebiliyor, analiz edilebiliyor ve gerektiğinde otomatik olarak optimize edilebiliyor.

Örneğin:

- Bir fabrika, enerji talebini gerçek zamanlı olarak takip ederek üretim programını **enerji fiyatlarının düşük olduğu saatlere kaydırabilir**.
- Bir akıllı şehirde, trafik lambalarından bina iklimlendirme sistemlerine kadar birçok altyapı, **otomatik olarak en düşük enerjiyle çalışacak şekilde ayarlanabilir**.

Bu yaklaşım, enerji maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda **karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadele**ye de katkı sağlar.

4.1.5.3 Endüstriyel Dönüşüm

Enerji 4.0 yalnızca teknolojik bir yenilik değil; aynı zamanda işletmelerin çalışma biçiminde köklü bir paradigma değişimidir. Geleneksel fabrikalarda işler çoğunlukla insan gücüne ve mekanik sistemlere dayanırdı. Kontroller elle yapılır, bilgiye ulaşmak uzun zaman alırdı. Enerji ise çoğunlukla petrol, kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilirdi ve yönetim çoğunlukla tahmine, geçmiş veriler üzerinden yapılan çıkarımlara dayanırdı.

Bugün ise fabrikalarda ve enerji tesislerinde **"akıllı sensörler", "veri analizi", "yapay zeka" ve "nesnelerin interneti (IoT)"** sayesinde makineler ve sistemler milyarlarca veriyi anlık olarak toplar, analiz eder ve kendi kendine en verimli çalışma şeklini belirler. Örneğin; bir üretim bandının, o anki ihtiyaç ve enerji fiyatına göre hızını veya çalışma şeklini otomatik olarak değiştirdiğini düşünün. Ya da elektrik şebekesinde talebe göre üretimin, akıllıca artırılıp azaltıldığını, arızanın anında tespit edilip çözüldüğünü hayal edin:

- Veriye dayalı karar alma:** Anlık verilerle tüketim alışkanlıkları analiz edilir ve geleceğe dönük tahminler yapılır.

- **Otomasyon:** İnsan müdahalesine gerek kalmadan sistemler kendi kendini optimize eder.
- **Esneklik:** Üretim ve enerji kullanımı piyasa fiyatları veya yenilenebilir kaynakların durumu gibi değişkenlere göre hızlıca ayarlanabilir.

Bu, işletmeler için yalnızca enerji maliyetlerini düşürmek değil, aynı zamanda **rekabet gücünü artırmak ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak** anlamına gelir.

4.1.5.4 Enerji 4.0'ın Faydaları

- **Maliyet Avantajı:** Enerji israfı azalır, verimlilik artar.
- **Sürdürülebilirlik:** Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu kolaylaşır, karbon ayak izi düşer.
- **Esnek Üretim:** Enerji arzındaki dalgalanmalara karşı hızlı uyum sağlanır.
- **Rekabet Gücü:** Dijitalleşen işletmeler piyasada avantaj kazanır.

Geleceğe Açılan Kapı

Enerji 4.0, yalnızca bir teknoloji yatırımı değil, aynı zamanda **kurumsal bir dönüşüm yolculuğudur**. Bu paradigma, enerji tüketen her sektörde –sanayiden belediyelere, ulaşımdan konutlara kadar– yeni bir çağı başlatıyor.

Akademik araştırmalar da bu dönüşümün etkisini ortaya koyuyor. Örneğin, **International Energy Agency (IEA)** raporlarına göre dijitalleşmenin enerji yönetimine entegrasyonu, küresel ölçekte %15–20'ye varan enerji tasarrufu potansiyeli sunuyor (IEA, *Digitalization & Energy*, 2017).

Kaynak: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>

4.1.6 Sistem Mimarisi ve Bileşenleri



Akıllı enerji yönetimi, gündelik yaşamda, fabrikalar da ya da büyük tesislerde ve Akıllı şehirler de enerjinin hem verimli hem de tasarruflu bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu teknolojinin başarısı, arka plandaki sistem mimarisinin uyumlu çalışmasına bağlıdır. Sistem mimarisi ise donanım (fiziksel bileşenler), yazılım (veri toplama, analiz ve izleme platformları) ve bu ikisini birleştiren bulut veya yerel çözüm altyapılarından oluşur. Her bölümün nasıl çalıştığını ve birbirine nasıl bağlandığını açıklayalım.

4.1.6.1 Donanım Altyapısı: Sensörler, Akıllı Sayaçlar, Veri Toplama Üniteleri

Sensörler ve Akıllı Sayaçlar:

Enerji yönetiminde en büyük ihtiyacımız, hangi cihazın ne kadar enerji harcadığını, ne zaman harcadığını ve toplamda maliyetin neden arttığını öğrenmektir. Sistemlerinin en önemli bileşeni, **sahadan veri toplayan donanım cihazlarıdır**. Bu cihazlar, sistemin **hem “gözleri” hem de “kulakları”** olarak düşünülebilir.

Akıllı sayaçlar,

- klasik sayaçlardan farklı olarak tüketimi sürekli izler, verileri dijital ortamda saklar ve merkezle paylaşır.

- Bu sayaçlar; konut, sanayi, alışveriş merkezi gibi işletmelerde elektrik, doğalgaz ya da suyu anlık olarak izler ve analiz edilmesini sağlar.
- Gerçek zamanlı takip sonucu, gereksiz enerji harcayan cihazlar hızlıca tespit edilir, tasarruf önlemleri alınabilir.
- Enerji izleme için kullanılan enerji analizörleri ve diğer ölçüm cihazları da tüketimi anlık olarak gösterir ve gereksiz tüketimi fark etmeyi kolaylaştırır.

Çevresel Parametre Sensörleri (Sıcaklık, Nem, Işık Düzeyi,Vd)

Sadece enerji değil, ortam şartlarının sürekli izlenmesi de hem konfor hem tasarruf için önemlidir. Burada devreye "çevresel sensörler" girer:

- **Sıcaklık ve nem sensörleri** ortamın iklimlendirme ihtiyacını tespit eder, gereksiz ısıtma/soğutma önlenir.
- **Işık düzeyi sensörleri**, günışığına göre aydınlatmayı optimize eder.
- Diğer sensör türleri arasında havadaki CO₂ oranını, hava kalitesini veya basıncı ölçenler de vardır.
- Bu sensörlerle elde edilen veriler, bir enerji yönetim yazılımına veya otomasyon sistemine gider, böylece ısıtma, soğutma ve aydınlatma otomatik ayarlanır.

Örnek: Bir ofiste sıcaklık, ışık ve hareket sensörleriyle hem gereksiz aydınlatma hem de fazla enerji tüketimi önlenir.

4.1.6.2 Yazılım Platformları ve Veri İşleme Sistemleri

Donanım cihazları sahadan veri toplar, ancak **bu verilerin işlenmesi ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesi** için güçlü yazılımlara ihtiyaç vardır. İşte bu noktada devreye **yazılım platformları** girer.

a) Veri İşleme ve Analiz

Toplanan veriler büyük miktarda olduğu için ham haliyle anlamlı değildir. Yazılım platformları bu verileri:

- **Analiz eder:** Örneğin enerji tüketiminde ani bir artış olup olmadığını belirler.
- **Raporlar oluşturur:** Kullanıcılar için anlaşılır grafikler ve tablolar sunar.
- **Uyarılar üretir:** Belirlenen eşik değerler aşıldığında sistem otomatik olarak alarm verir.

b) Karar Destek ve Otomasyon

Yazılım platformları yalnızca izleme yapmakla kalmaz, **önerilerde bulunur veya otomatik aksiyon alır.**

- Örneğin, bir soğutma sisteminin gereksiz enerji harcadığını tespit eden yazılım, bunu optimize edecek şekilde cihaz ayarlarını değiştirebilir.
- Enerji fiyatlarının düşük olduğu saatlerde üretimi yoğunlaştırarak **maliyet avantajı sağlayabilir.**

c) Kullanıcı Arayüzleri

Bu yazılımlar, farklı kullanıcılar için (yöneticiler, teknisyenler, enerji yöneticileri) özelleştirilmiş paneller sunar. Bu sayede teknik bilgiye sahip olmayan kişiler bile **sistemi kolayca takip edebilir**.

Örnek: Bir belediye binasında enerji yöneticisi, yazılım arayüzünden hangi odaların gereksiz enerji tükettiğini görerek anında müdahale edebilir.

4.1.6.3 Bulut Tabanlı ve Yerel (On-Premise) Çözüm Alternatifleri

Enerji yönetiminde günümüzde iki temel çözüm yaklaşımı öne çıkıyor: bulut tabanlı platformlar ve yerel (on-premise) kurulan çözümler.

Bulut Tabanlı Sistemler:

Donanımdan gelen veriler internet üzerinden bir bulut platformuna aktarılır.

- Kullanıcılar bilgisayar, tablet veya cep telefonu ile dünyanın her yerinden sisteme erişip enerji tüketimini görebilirler.
- Bulut sistemleri büyüyen veriler için esnek depolama, düzenli yazılım güncellemesi ve kolay entegrasyon imkanı sunar.
- Çok şubeli veya kurumlar için tüm verinin tek merkezde birikmesi önemli bir avantaj sağlar.
- Güvenlik ve veri gizliliği bulut sağlayıcısına emanet edilir.

Avantajları:

- **Her yerden erişim:** Yöneticiler internet bağlantısı olan herhangi bir cihazdan sisteme ulaşabilir.
- **Düşük başlangıç maliyeti:** Donanım yatırımı minimum düzeydedir.
- **Güncellemeler:** Sistem yazılımları otomatik olarak güncellenir.

Dezavantajları:

- İnternet bağlantısına **bağımlılık**.
- Verilerin üçüncü taraf sunucularda depolanmasından kaynaklı **güvenlik kaygıları**.

Yerel (On-Premise) Sistemler:

Veriler tesis veya binanın kendi ağında depolanır, işler ve işletilir.

- Özellikle kritik endüstriyel tesislerde **güvenlik, hız veya mevzuat gereklilikleri için tercih edilir**.
- Tüm kontrol ve veri kullanıcıda kalır, dış bağlantıya gerek olmadan **hızlı hizmet sağlar**.
- Yüksek ilk yatırım ve bakım gerektirebilir.

- Büyük veri analizleri için yerel donanımın performansı kısıtlayıcı olabilir.

Avantajları:

- Daha yüksek veri güvenliği (**özellikle hassas bilgilerin korunmasında önemlidir**).
- İnternet bağlantısına **bağımlı olmadan çalışabilme**.

Dezavantajları:

- Daha yüksek kurulum ve **bakım maliyeti**.
- Yazılım güncellemelerinin manuel yapılması gerekebilir.

Bulut Tabanlı ve Yerel Enerji Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırması

Özellik	Bulut Tabanlı	Yerel (On-Premise)
Erişim	Her yerden, internetle	Sadece lokal ağda
Güncelleme	Otomatik, sağlayıcı tarafından	Kullanıcı veya IT ekibi
Veri Güvenliği	Sağlayıcıya emanet	Tamamen kullanıcı kontrolünde
İlk Yatırım	Düşük	Yüksek
Ölçeklenebilirlik	Çok esnek	Sınırlı donanım ile sınırlı
Hız / Gecikme	Ağ bağlantısına bağlı	Genellikle daha hızlı
Yedekleme	Otomatik	Kullanıcıya bağlı
Uzaktan Yönetim	Kolay	Kısıtlı veya ek kurulum gerek

Çoğu işletme **hibrit çözümleri** tercih eder; yani kritik veriler yerel olarak saklanırken, diğer veriler bulut üzerinden yönetilir.

Neden Bu Mimari Önemli?

Bu sistem mimarisi sayesinde:

- Enerji kayıpları hızla tespit edilir ve önlenir.
- Karar alma süreçleri hızlanır, işletmeler daha çevik hale gelir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları kolayca entegre edilebilir.
- Karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlanır.

ve Günlük Hayattan Örnekler

Bir fabrikada bütün makinelerden, binadaki aydınlatma ve iklimlendirmeden sensörlerle veri alınır. Bu bilgiler veri toplama ünitelerinde toplanır ve ister bulut ister yerel sunucuya gönderilerek analiz edilir. Analiz ları, enerjinin hangi noktalarda israf edildiğini gösterir ve yazılım otomasyon sayesinde sistemi doğrudan yönetir: Gereksiz yanan lambalar söndürülür, cihazlar enerji verimli moda geçirilir. **Bu döngü sürekli çalışır ve enerji maliyetleri ile karbon ayak izi gözle görülür biçimde azalır**

4.1.7 IoT Destekli İzleme ve Kontrol Sistemleri

Enerji yönetimi, günümüz dünyasında yalnızca "tüketimi ölçmek" anlamına gelmiyor; artık bu süreç **gerçek zamanlı veri toplama, analiz ve otomatik kontrol** ile desteklenen akıllı sistemlere dayanıyor. Bu dönüşümün arkasında ise **IoT (Nesnelerin İnterneti)** teknolojileri var. IoT, basitçe söylemek gerekirse, cihazların internet veya özel iletişim protokolleri üzerinden birbirleriyle haberleşmesini sağlayan bir altyapıdır.

Bu teknolojiler sayesinde enerji tüketiminden çevresel koşullara kadar pek çok veri **anlık olarak toplanıyor**, işleniyor ve gerektiğinde otomatik müdahaleler gerçekleştirilebiliyor. Bu sistemin kalbinde ise **sensörler, akıllı sayaçlar ve kablosuz iletişim protokolleri** bulunuyor.

4.1.7.1 Sensör Teknolojileri: Sistemin Gözleri

Sensörler, akıllı enerji yönetiminin en temel bileşenidir. Onlar sayesinde sahadaki her türlü bilgi, **dijital ortama taşınır ve analiz edilebilir hale gelir**.

a) Enerji Tüketimi Ölçüm Sensörleri ve Akıllı Sayaçlar

Enerji yönetiminde ilk adım, **hangi cihazın ne kadar enerji tükettiğini** bilmekten geçer.

- **Enerji tüketim sensörleri**, cihaz veya makinelerin elektrik kullanımını sürekli izler. Bu sayede hangi süreçlerin fazla enerji harcadığı kolayca anlaşılır.
- **Akıllı sayaçlar**, elektrik, gaz ve su tüketimini **gerçek zamanlı** kaydeder ve bu verileri merkezi sisteme gönderir. Geleneksel sayaçlardan farklı olarak, **tüketim alışkanlıklarını detaylı şekilde raporlar** ve çift yönlü iletişim kurarak enerji sağlayıcı ile kullanıcı arasında etkileşim sağlar.

Örnek: Bir fabrikanın üretim hattındaki makineler, akıllı sayaçlar sayesinde hangi vardiyada daha fazla enerji tükettiğini raporlar. Bu bilgiyle yöneticiler, enerji tasarrufu için üretim planlarını yeniden düzenleyebilir.

b) Çevresel Parametre Sensörleri

Enerji tüketimi yalnızca cihazlardan değil, **çevresel koşullardan** da etkilenir.

- **Sıcaklık sensörleri:** Klima ve ısıtma sistemlerinin ortam sıcaklığına göre otomatik olarak çalışmasını sağlar.
- **Nem sensörleri:** Özellikle gıda, tekstil veya ilaç sektöründe nem seviyesinin korunması hayati önem taşır.
- **Işık sensörleri:** Ortamdaki doğal ışık miktarını algılayarak, aydınlatma sistemlerinin otomatik olarak ayarlanmasına yardımcı olur.

Örnek: Bir ofis binasında ışık sensörleri, güneş ışığının yeterli olduğu saatlerde aydınlatmayı otomatik olarak kısar; böylece enerji tasarrufu sağlanır.

4.1.7.2 Veri Toplama: Ham Veriden Anlamalı Bilgiye

Sensörlerin topladığı veriler tek başına anlamlı değildir. Bu bilgiler, **veri toplama üniteleri** aracılığıyla bir merkeze iletilir ve işlenir.

Bu noktada devreye **gateway cihazları** girer. Bu cihazlar:

- Sahadaki sensörlerden gelen bilgileri toplar,
- Gerektiğinde **ön işleme** tabi tutar (gereksiz veriyi ayıklar),
- Merkezi yönetim platformuna iletir.

Bu sürecin amacı, **ham veriyi anlamlı ve kullanılabilir bilgiye dönüştürmektir**. Örneğin, farklı makinelerden gelen enerji tüketim verileri tek bir ekranda görselleştirilebilir.

4.1.7.3 Kablosuz İletişim Protokolleri: Verinin Yolculuğu

Sensörlerden gelen veriler, kablosuz iletişim protokolleriyle taşınır. Bu protokoller, verinin **güvenli, hızlı ve düşük maliyetle** iletilmesini sağlar.

a) Wi-Fi

- **Avantajları:** Yaygın altyapı, yüksek veri aktarım hızı.
- **Dezavantajları:** Enerji tüketimi yüksek; çok sayıda cihazın bağlı olduğu ortamlarda bağlantı sorunları yaşanabilir.
- **Kullanım alanı:** Ofis binaları, küçük tesisler.

b) Zigbee

- **Avantajları:** Düşük enerji tüketimi, düşük maliyet, ağ içinde cihazların birbirine bağlanabilmesi.
- **Dezavantajları:** Veri aktarım hızı sınırlı.
- **Kullanım alanı:** Akıllı ev sistemleri, aydınlatma kontrolü, küçük ölçekli enerji izleme.

c) LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

- **Avantajları:** Çok düşük enerji tüketimi, uzun mesafede veri iletimi (10–15 km'ye kadar).
- **Dezavantajları:** Düşük veri aktarım hızı; büyük dosya aktarımı için uygun değil.
- **Kullanım alanı:** Geniş kampüsler, tarımsal enerji yönetimi, şehir ölçeğinde izleme.

İLETİŞİM PROTOKOLLERİ KARŞILAŞTIRMA TABLOSU			
	 Wi-Fi	 Zigbee	 LoRaWAN
Kapsama alanı	Düşük	Kısa	Geniş
Enerji tüketimi	Yüksek	Düşük	Düşük
Veri hızı	Yüksek	Düşük	Düşük
Kullanım alanı	Ev, ofis	Akıllı ev	Nesnelerin interneti

Örnek: Türkiye’de bazı organize sanayi bölgelerinde, LoRaWAN teknolojisi kullanılarak **fabrika sayaçlarının merkezi olarak izlenmesi** sağlanıyor. Bu sayede büyük alanlarda **kablo** çekme **maliyeti ortadan kalkıyor**.

Pratikten Bir Senaryo

Küçük bir işletmede tüm lambaların, klimanın, prizlerin ve ortamdaki sıcaklığın sensörlerle izlendiğini düşünelim:

- Akıllı sayaçlar ve enerji analizörü ile elektrik tüketimi **anlık izlenir**.
- Ortama dağıtılan sıcaklık ve ışık sensörleriyle **gereksiz enerji harcaması tespit edilir**.
- Tüm bu sensörler Zigbee veya Wi-Fi ile veri toplama ünitesine bağlanır.
- Tesisin enerji yönetim yazılımında veriler analiz edilir, yüksek tüketim otomatik uyarılır veya cihazlar gerektiğinde **otomatik olarak kapatılır**.
- Çok büyük tesislerde veya şehircenelinde ise LoRaWAN ile kilometrelerce uzaklıktaki sayaçlar merkezden **tek panelde izlenebilir**.

Yazılım-Yönetim ve Faydaları

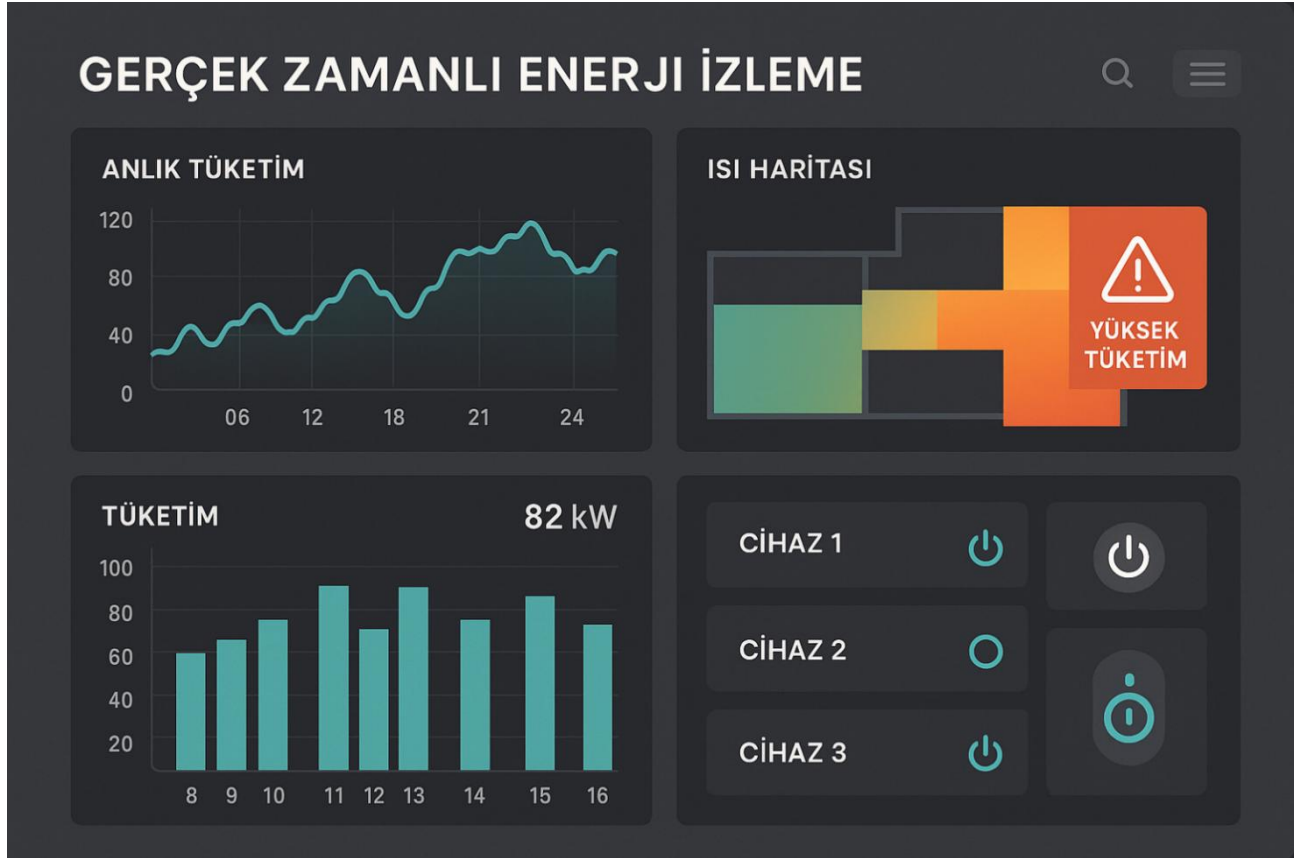
Toplanan tüm veriler buluttaki veya yerel bir yönetim yazılımında analiz edilir. Kullanıcılar bilgisayar, tablet ya da telefon ile bu verilere dilediği yerden erişebilir. Gerçek zamanlı raporlar, anlık uyarılar, tüketim analizleri ve öneriler bu yazılımlar sayesinde kullanıcının karar almasını ve tasarruf yapmasını sağlar.

- Anında problem tespiti ve müdahale
- Gereksiz harcamaları azaltma, maliyet ve karbon ayak izinde düşüş
- Uzaktan yönetim ve otomasyon

IoT tabanlı izleme ve kontrol sistemleri, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik için vazgeçilmezdir. Doğru sensörlerle donatılmış ve ihtiyaca göre kablosuz protokollerle iletişim kuran sistemler sayesinde, her ölçekteki işletme ve kuruluş **enerji verimliliğinde büyük avantaj** elde eder. Kablosuz haberleşme teknolojilerinin çeşitliliği, sistem kurarken uygulama sahasına, ölçeğe ve enerji gereksinimlerine göre seçim yapma imkanı sunar.

Sistemin başarısı, iyi seçilmiş sensörler, uygun iletişim protokolü ve gelişmiş veri yönetimi ile bütünleştiğinde, **hem ekonomik hem çevreci kazanımlar elde etmek mümkündür**.

4.1.8 Gerçek Zamanlı İzleme ve Analiz



Enerji yönetimi, artık yalnızca aylık faturaları kaydetmek veya dönemsel tüketimleri ölçmekten çok öte bir anlam taşıyor. Günümüzün dinamik ve rekabetçi ortamında, işletmeler, kamu kurumları ve hatta bilinçli bireyler için enerjiyi **stratejik bir kaynak** olarak görmek ve bu kaynağı **anlık olarak yönetebilmek** kritik önem kazandı. İşte bu

dönüşümün merkezinde, güçlü **Gerçek Zamanlı Enerji İzleme ve Analiz Sistemleri** yer alıyor. Bu sistemler, enerji yönetimini pasif bir izleme faaliyetinden, proaktif ve akıllı bir karar verme mekanizmasına dönüştürüyor.

Anlık Takibin ve Görselleştirmenin Önemi:

Bu sistemlerin temel işlevi, enerji kullanımını **anlık olarak takip** etmektir. Akıllı sayaçlar, sensörler ve veri toplama cihazları aracılığıyla tesis genelindeki, belirli hatlardaki veya hatta kritik ekipman bazındaki enerji tüketimi saniyeler, dakikalar mertebesinde yakalanır. Ancak ham veri tek başına yeterli değildir. Sistemlerin gerçek gücü, bu devasa veri akışını **anlaşılır, sezgisel görselleştirmelere** (grafikler, gösterge panoları, ısı haritaları) dönüştürmesidir. Kullanıcı dostu arayüzler sayesinde, karmaşık enerji akışları ve tüketim kalıpları kolayca yorumlanabilir hale gelir. Bu, enerji yönetimini yalnızca mühendislik birimlerinin değil, ilgili tüm karar vericilerin anlayabileceği ve katkıda bulunabileceği anlaşılır bir süreç haline getirir.

Proaktif Uyarılar ve Uzaktan Müdahale İmkânı:

Gerçek zamanlı sistemlerin bir diğer devrimci yönü, **proaktif olabilme** yeteneğidir. Sistemler, önceden tanımlanmış eşik değerlerin aşılması (aşırı tüketim), anormal tüketim kalıplarının ortaya çıkması (potansiyel arıza belirtisi) veya kalite parametrelerindeki sapmalar (gerilim düşüşü, harmonik bozulma) gibi durumları anında tespit edebilir. Bu tespit, **otomatik uyarı mekanizmalarını** (e-posta, SMS, uygulama bildirimi) devreye sokar. Böylece sorunlar oluşmadan veya büyümeden önce müdahale şansı doğar.

Daha da ileri giderek, birçok sistem **uzaktan kontrol** olanağı sunar. Yetkili personel, mobil uygulamalar veya web arayüzleri aracılığıyla, coğrafi konumundan bağımsız olarak belirli ekipmanları açıp kapatabilir, yükü dengeleyebilir veya enerji tüketim profillerini optimize edebilir. Bu, özellikle birden fazla lokasyona sahip işletmeler veya acil durum müdahalesi gerektiren senaryolar için paha biçilmez bir esneklik ve hız sağlar.

Analitik Güç ile Stratejik Kararlara Uzanan Yol:

Toplanan anlık veriler, yalnızca mevcut durumu göstermekle kalmaz; güçlü **analitik motorlar** için değerli bir ham madde oluşturur. Sistemler, tarihsel verilerle karşılaştırma yapabilir, tüketim trendlerini analiz edebilir, farklı vardiyaların, üretim hatlarının veya dış etkenlerin (hava sıcaklığı) enerji kullanımı üzerindeki etkisini ölçebilir. Bu derinlemesine analizler:

Maliyet Optimizasyonu:

Anlamsız tüketim noktalarını, verimsiz ekipmanları veya uygun olmayan tarifeleri belirleyerek doğrudan enerji faturalarında düşüş sağlar.

Arıza Önleme ve Bakım Optimizasyonu:

Anormal enerji tüketimi genellikle mekanik bir arızanın erken belirtisidir. Gerçek zamanlı izleme, bakımları planlamaya ve pahalı beklenmedik arızaları önlemeye yardımcı olur.

Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkı:

Karbon ayak izinin azaltılması, enerji verimliliği artışı gibi hedeflerin izlenmesi ve raporlanması bu sistemlerle mümkün ve kolay hale gelir.

Hızlı ve Bilinçli Karar Alma:

Enerjiye dair tüm veriler anlık ve görsel olarak erişilebilir olduğunda, yatırım kararları (verimli ekipman alımı), operasyonel değişiklikler (vardiya planlaması) veya enerji satın alma stratejileri çok daha sağlam verilere dayandırılabilir.

Veriye Dayalı Enerji Zekası

Gerçek Zamanlı Enerji İzleme ve Analiz Sistemleri, **enerjiyi "görünmez"** bir maliyet kalemi olmaktan çıkarıp, yönetilebilir ve optimize edilebilir stratejik bir varlık haline getiriyor. Anlık takip, sezgisel görselleştirme, otomatik uyarılar, uzaktan kontrol ve derin analitik yeteneklerin bir araya gelmesi, işletmeler ve kurumlar için daha düşük **operasyonel maliyetler, artan üretkenlik**, gelişmiş sürdürülebilirlik performansı ve rekabet avantajı anlamına geliyor. Bu teknoloji, enerji yönetiminde sadece bir araç değil, veriye dayalı karar alma kültürünü besleyen ve sürekli iyileşmeyi mümkün kılan bir **"enerji zekası"** platformu sunarak, kaynakların daha akıllı ve sorumlu kullanıldığı bir geleceğin temelini atıyor.

4.1.8.1 Anlık Enerji Tüketimi Takibi ve Görselleştirme

Geleneksel yöntemlerle aylık faturalar üzerinden tüketim alışkanlıklarını anlamaya çalışmak, günümüz koşullarında oldukça yetersiz kalıyor. Çünkü enerji kullanımı **saatlik, hatta dakikalık dalgalanmalara** sahiptir. Gerçek zamanlı enerji takibi, hangi cihaz veya süreç ne kadar enerji harcıyor, bu tüketim nasıl zaman içinde değişiyor sorularının anında cevaplanmasını sağlar. Bu veriler, genellikle görselleştirme panelleri (dashboard) aracılığıyla grafikler, göstergeler ve raporlar halinde sunulur

Neden Önemli?

- **Ani dalgalanmaları tespit etmek:** Örneğin bir makinedeki arıza nedeniyle enerji tüketimi kısa sürede iki katına çıkabilir. Bu fark ancak anlık izleme ile görülebilir.

- **Kayıpları önlemek:** Kaçaklar veya gereksiz enerji tüketimi, anlık takip sayesinde hemen fark edilip engellenebilir.
- **Kapasite planlama:** Özellikle büyük tesislerde, anlık tüketim bilgisiyle pik yüklerin ne zaman oluştuğu belirlenir ve buna göre üretim veya enerji satın alma planları yapılır.

Görselleştirme: Veriyi Anlamlı Hale Getirmek

Ham enerji verileri anlaşılması zor olabilir. Bu yüzden modern sistemler, veriyi **grafikler, ısı haritaları ve gösterge panelleri** halinde sunar.

- **Gösterge panelleri (dashboard):** Enerji verileri renk kodları, grafikler ve uyarılarla desteklenerek kolayca yorumlanabilir. Örneğin, enerji tüketiminizin aniden yükseldiği saatler kırmızı renkle gösterilir, bu da hızlı müdahale imkanı sunar.
- **Isı haritaları:** Özellikle büyük tesislerde, hangi bölümlerin daha fazla enerji tükettiği renklerle görselleştirilir.
- **Bölgelere Ayrılmış İzleme:** Özellikle büyük işletmelerde üretim hatları, binalar veya departmanlar ayrı ayrı izlenebilir. Bu sayede sorunlu veya verimsiz enerji kullanımı gösterilir.
- **Performans ve Verimlilik Raporları:** Zaman bazlı (günlük, haftalık, aylık) raporlar sayesinde şirket yöneticileri ve enerji uzmanları tüketim trendlerini takip eder, hedeflerle karşılaştırma yapar.

4.1.8.2 Otomatik Uyarı ve Müdahale Sistemleri

Gerçek zamanlı izleme yalnızca "görmek" değil, aynı zamanda **anında tepki verebilmeyi** de gerektirir. İşte bu noktada **otomatik uyarı ve müdahale mekanizmaları** devreye girer.

- **Anomali Tespiti:** Sistem, tüketimde beklenmeyen yükselişler veya düşüşleri algoritmalar sayesinde anında tespit eder.
- **Otomatik Uyarı:** Enerji kullanımında aşırı artış, cihazda arıza veya enerji kaybı olduğunda SMS, e-posta veya uygulama bildirimleriyle ilgililere haber verir.
- **Hizmet Durdurma ve Kontrollü Müdahale:** Bazı ileri sistemlerde, sistem otomatik olarak enerji tüketen ekipmanları kapatarak enerji israfını önler. Örneğin, boş olan bir odadaki ışıklar otomatik söndürülür.
- **Talep Yanıtı:** Şebeke üzerindeki yük pik yaptığında, sistem önceden tanımlanan senaryolara göre yükü azaltacak müdahale stratejilerini uygular.

4.1.8.3 Uzaktan Erişim ve Kontrol İmkanları

Akıllı enerji yönetiminde en çok değer katan unsurlardan biri de **uzaktan erişim** özelliğidir. Artık yöneticiler veya enerji uzmanları, sahada olmadan da sistemlere müdahale edebilir.

Avantajları

- **Zaman tasarrufu:** Özellikle büyük tesislerde veya farklı lokasyonlarda bulunan altyapılarda anlık müdahale imkanı sağlar.
- **Kriz yönetimi:** Acil durumlarda hızlı aksiyon almayı mümkün kılar.
- **Esnek çalışma:** Yönetim süreçlerini sahaya bağımlı olmaktan çıkarır.

Modern enerji izleme sistemleri, internete bağlı cihazlar sayesinde kullanıcıya uzaktan erişim ve kontrol kolaylığı sağlar.

- **Mobil ve Web Uygulamaları:** Enerji tüketimini cep telefonundan veya web üzerinden izleyebilir, raporları inceleyebilir ve gerektiğinde alarm durumlarına müdahale edebilirsiniz.
- **Cihaz Kontrolü:** Sadece izlemekle kalmayıp, klima, aydınlatma, makineler gibi enerji tüketen sistemler uzaktan açılıp kapatılabilir veya enerji tasarrufu moduna alınabilir.
- **Çok Noktalı Erişim:** Birden fazla tesis ya da şube varsa, tüm noktalar tek platformda merkezi olarak yönetilebilir.
- **Bulut Tabanlı Veri İşleme:** Veriler buluta aktarılır, güçlü analiz ve raporlama kapasiteleri sunulur, bakım gerektirmeyen merkezi sistem avantajı sağlanır.

Örnek: Türkiye’de Akıllı Şehir projeleri kapsamında, İstanbul’un bazı belediye binalarında kullanılan sistemlerle, enerji tüketimi ve iklimlendirme sistemleri uzaktan yönetilmekte, gerçek zamanlı raporlar belediye yöneticilerine sunulmaktadır.

Geleneksel Enerji Takibi ve Gerçek Zamanlı İzleme Karşılaştırması

Özellik	Geleneksel Enerji Takibi	Gerçek Zamanlı Enerji İzleme
Veri Toplama	Periyodik, elle/manuel	Sürekli, otomatik
Görselleştirme	Genellikle yazılı raporlar	Grafiksel, interaktif dashboardlar
Uyarı ve Müdahale	Manuel tespit, gecikmeli müdahale	Otomatik uyarı, anında müdahale
Enerji Tasarrufu Potansiyeli	Sınırlı	Yüksek (anlık müdahale imkanı)
Uzaktan Erişim ve Kontrol	Yok veya sınırlı	Tüm cihazlar üzerinden tam kontrol
Karbon Ayak İzinin Azaltılması	Gecikmeli ve dolaylı	Anlık takiple hızlı etki

4.1.8.4 Karar Destek Sistemleri: Veriden Stratejiye

Anlık veriler yalnızca operasyonel müdahale için değil, **stratejik karar alma** süreçleri için de kullanılır.

a) Trend Analizleri

Sistemler, enerji tüketimindeki uzun vadeli eğilimleri analiz eder.

Örneğin:

- Hangi vardiyada tüketim daha yüksek?
- Mevsimsel dalgalanmalar nasıl etkiliyor?
- Hangi departmanlar en fazla enerji tüketiyor?

Bu bilgiler, hem maliyet planlaması hem de **enerji tasarrufu yatırımlarının yönlendirilmesi** için kritik veriler sağlar.

b) Tahmine Dayalı Analiz

Yapay zeka destekli sistemler, geçmiş verilerden öğrenerek geleceğe yönelik tahminler yapar.

- **Talep tahmini:** Gelecek haftalarda enerji tüketiminin ne olacağı öngörülür.
- **Bakım tahmini:** Enerji tüketimindeki anormallikler üzerinden ekipman arızaları önceden tespit edilir.

Gerçek zamanlı izleme ve analiz, geleneksel enerji yönetimi yöntemlerinden şu açılardan ayrılır:

Kriter	Geleneksel Yöntemler	Gerçek Zamanlı Sistemler
Tepki Süresi	Sorun sonrası müdahale	Anlık tespit ve otomatik aksiyon
Karar Alma	Deneyime dayalı	Veriye dayalı, öngörülü stratejiler
Maliyet Yönetimi	Fatura sonrası analiz	Proaktif optimizasyon, anlık tasarruf
Kontrol İmkanları	Saha bazlı müdahale	Uzaktan erişim ve otomasyon

Neden Gerçek Zamanlı İzleme Vazgeçilmezdir?

Günümüzde enerji, maliyetlerin en büyük kalemlerinden biri olmanın ötesinde, **iklim hedeflerine ulaşmak için yönetilmesi gereken stratejik bir kaynak** haline geldi. Gerçek zamanlı izleme ve analiz sistemleri, bu süreci **daha görünür, daha hızlı ve daha etkili** hale getiriyor.

İster bir kamu binası, ister bir üretim tesisi, isterse bir şehir altyapısı olsun: Bu sistemler sayesinde **enerji kayıpları önleniyor, maliyetler düşüyor ve sürdürülebilirlik hedeflerine bir adım daha yaklaşıyor**.

Akademik araştırmalar da bu yaklaşımın önemini destekliyor. Örneğin, **Lawrence Berkeley National Laboratory**'nin 2022'de yayınladığı bir çalışmaya göre, gerçek zamanlı enerji izleme sistemlerinin entegre edildiği

sanayi tesislerinde **%12–18 oranında enerji tasarrufu** sağlandığı gözlemlenmiştir (Kaynak: LBNL, *Real-Time Energy Management in Industrial Facilities*, 2022).

Kaynak: <https://buildings.lbl.gov/sites/default/files/2022-06/EMIS%20evaluation%20protocol-2022.05.pdf>

4.1.9 Türkiye'deki Uygulama Örnekleri

Türkiye’de IoT Tabanlı Enerji Yönetimi Çözümleri ve Sanayi ile Kamu Sektörü Uygulamaları

Enerji yönetimi, Türkiye’de yalnızca maliyet odaklı bir faaliyet olmaktan çıkıp, **stratejik bir rekabet ve sürdürülebilirlik aracı** haline gelmiş durumda. Özellikle artan enerji fiyatları, dışa bağımlılık ve karbon emisyonu azaltma hedefleri, sanayi ve kamu sektöründe dijitalleşmeye dayalı enerji çözümlerini ön plana çıkarıyor. Bu çözümler, özellikle sanayi tesislerinde ve kamu sektöründe kapsamlı **verimlilik artırıcı projeler (VAP)** ile **otomatik sayaç okuma sistemleri (OSOS)** ve SCADA tabanlı uzaktan kontrol altyapıları aracılığıyla uygulanıyor.

IoT Tabanlı Enerji Yönetimi Çözümleri ve Sanayi Tesislerindeki VAP Uygulamaları

Sanayi, Türkiye’de **toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %40’ını oluşturuyor**. Bu oran, sanayi tesislerinde yapılacak enerji verimliliği çalışmalarının ulusal düzeyde büyük etki yaratabileceğini gösteriyor. İşte bu nedenle özellikle organize sanayi bölgeleri (OSB) ve büyük ölçekli tesisler, IoT tabanlı çözümler ve devlet destekli projelerle dönüşüme öncülük ediyor.

IoT tabanlı enerji yönetimi, fabrikalar ve sanayi tesislerinde enerji tüketiminin gerçek zamanlı izlenmesi, analiz edilmesi ve otomatik optimizasyonunu sağlar. Bu sistemlerde sensörler ve akıllı sayaçlar; sıcaklık, elektrik, gaz ve su kullanımını takip ederken, yazılım platformları performansı değerlendirir ve tasarruf için öneriler sunar.

Türkiye’de büyük ölçekli sanayi tesislerinde **VAP (Verimlilik Artırıcı Projeler)** olarak adlandırılan projeler, enerji verimliliğini artırmak amacıyla bu dijital çözümleri entegre ediyor.

Türkiye İçin Stratejik Önemi

Bu projelerin ortak noktası, yalnızca bireysel işletmelere veya kurumlara değil, **ülke ekonomisine ve iklim hedeflerine** katkı sağlamasıdır:

- **Enerji bağımsızlığı:** Dijitalleşen enerji yönetimi, enerji yoğun sektörlerde dışa bağımlılığı azaltır.
 - **Karbon azaltımı:** Akıllı çözümlerle elde edilen enerji tasarrufu, Türkiye’nin Paris Anlaşması çerçevesindeki hedeflerine katkı sağlar.
 - **Ekonomik rekabet gücü:** Enerji maliyetlerini düşüren işletmeler, global pazarda daha rekabetçi hale gelir.
- Karşılaştırmalı Bakış: Endüstriyel ve Kamu Uygulamaları

Kriter	Endüstriyel Uygulamalar	Kamu Sektörü Projeleri
Öncelikli Amaç	Maliyet düşürme, rekabet avantajı	Kamu bütçesinde tasarruf, hizmet kalitesi
Öne Çıkan Sistem	IoT tabanlı enerji yönetimi, VAP projeleri	OSOS, SCADA
Tasarruf Potansiyeli	%10–30	%8–20
Ek Katkılar	Karbon azaltımı, üretim verimliliği	Kayıp-kaçak önleme, kriz yönetimi

Türkiye’de akıllı enerji yönetimi çözümleri, hem sanayi tesislerinde hem de kamu sektöründe **stratejik bir dönüşüm aracı** olarak yaygınlaşıyor. IoT tabanlı çözümler, VAP projeleri, OSOS ve SCADA altyapıları sayesinde **maliyetler düşüyor, hizmet kalitesi artıyor ve karbon emisyonları azaltılıyor**.

Bu projeler, yalnızca bugünün değil, aynı zamanda **geleceğin enerji yönetimi anlayışının da temellerini atıyor**. Türkiye’nin dijitalleşen enerji altyapısı, hem ekonomik kalkınma hem de sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritik bir kaldıraç görevi görüyor.

Örneğin:

a) Borusan Boru: Yardımcı Tesislerde Yeşil Dönüşüm Projesi Özeti

Kaynak: <https://www.borusan.com/Uploads/raporlar/entegre-faaliyet/2024/2024-entegre-faaliyet-raporu.pdf>

1. Basınçlı Hava Sisteminde Verimlilik Değişim: Kompresör yerine fan kullanımı. Kazanımlar: 655 ton karbon emisyon tasarrufu, 1.508.400 kW enerji tasarrufu, 172.388 USD maliyet tasarrufu.	2. Ekipman Modernizasyonu Değişim: Eski vidalı kompresör → Turbo kompresör; Eski kazan → Yeni tip skoç kazan. Kazanımlar: 858 ton karbon emisyon tasarrufu, 1.000.200 kW enerji tasarrufu, 215.268 m ³ doğal gaz tasarrufu, 202.549 USD maliyet tasarrufu.
3. Soğutma Kulelerinde Fan Optimizasyonu Değişim: Geleneksel fanlar → E-glass ayarlanabilir fanlar. Kazanımlar: 86 ton karbon emisyon tasarrufu, 175.000 kW enerji tasarrufu, 54.200 USD maliyet tasarrufu.	4. Hava Kaçaklarının Önlenmesi Aksiyon: İşletme içi hava kaçaklarının tespiti ve tamiri. Kazanımlar: 977 ton karbon emisyon tasarrufu, 2.225.850 kW enerji tasarrufu, 257.811 USD maliyet tasarrufu.

5. Pnömatik Sistem Bakımı Aksiyon: Arızalı pnömatik valf ve pistonların tamiri. Kazanım: 75.850 USD maliyet tasarrufu.	6. Su Yönetimi İyileştirmeleri Aksiyonlar: Soğutma kulelerine geri kazanılmış atık su kullanımı, Yangın hatlarının lokasyon bazlı izolasyonu. Kazanımlar: 36.200 ton su tasarrufu, 60.000 USD maliyet tasarrufu.

TOPLAM MALİYET TASARRUFU YILLIK TOPLAM: 822.798 USD

ÇEVRESEL ETKİ ÖZETİ

Toplam Karbon Emisyon Tasarrufu: **2.576 ton/yıl**

Toplam Enerji Tasarrufu: **4.909.450 kW/yıl**

Toplam Su Tasarrufu: **36.200 ton/yıl**

b) Zorlu Holding Sürdürülebilirlik Projeleri Özeti

<https://www.zorluenerji.com.tr/uploads/pdf/pdflist/yillik-entegre-faaliyet-raporu-5.pdf>

1. Kızıldere Enerji Verimliliği Yatırımları Aksiyon: Soğutma kulesi fan kanat sistemi yenilenmesi (Kızıldere 3). Aydınlatma sistemlerinin LED'e dönüştürülmesi (Kızıldere I). Kazanımlar: 105.540 kWh/yıl elektrik tasarrufu (95.040 kWh + 10.500 kWh). 15.831 USD/yıl tasarruf	2. OEPSAŞ Doğal Gaz Tasarrufu Aksiyon: Doğal gaz tüketim optimizasyonu. Kazanımlar (2023): 13.443,65 m ³ doğal gaz tasarrufu (141.830,50 kWh) 538 USD tasarruf
3. OEPSAŞ Eskişehir Ofis Enerji Verimliliği Aksiyon: Enerji verimliliği odaklı iyileştirmeler. Kazanımlar (2023): 459.095,59 kWh enerji tasarrufu. 68.864 USD tasarruf	4. Electrip ile Elektrikli Araç Dönüşümü Aksiyon: Fosil yakıtlı araç kullanımının azaltılması. Kazanımlar (2023): 11.954,69 ton CO ₂ emisyonu önlendi. 956.375 USD tasarruf
5. Dijital Abonelik Sistemi Aksiyon: Abonelik işlemlerinin tam dijitalleştirilmesi. Kazanımlar (2023): 54 ton kağıt, 1.430.423 litre su tasarrufu. 70 ton CO ₂ emisyonu engellendi. 1.071 ağaç kurtarıldı. 70.000 USD tasarruf *(70 ton CO ₂ × 80 USD/ton)*. Operasyonel tasarruf: 2,1 milyon TL (70.000 USD).	

TOPLAM MALİYET TASARRUFU

Proje	Tasarruf (USD)	ÇEVRESEL ETKİ ÖZETİ (2023)
		Elektrik Tasarrufu: 564.635,59 kWh
Kızıldere Enerji Verimliliği	15.831	Doğal Gaz Tasarrufu: 13.443,65 m ³
		Önlenen CO ₂ Emisyonu: 12.024,69 ton
OEPSAŞ Doğal Gaz Tasarrufu	538	Su Tasarrufu: 1.430.423 litre
OEPSAŞ Eskişehir Ofisi	68.864	Kağıt Tasarrufu: 54 ton
Electrip CO ₂ Tasarrufu	956.375	Kurtarılan Ağaç: 1.071 adet
Dijital Abonelik (CO ₂ + Operasyon)	140.000	
Toplam	1.181.608	

4.1.9.1 Belediyelerimizin Başarılı örnekleri; Belediye Projeleri Tablosu

Belediye	Proje	Kaynak
Ankara Gölbaşı Belediyesi	Akıllı Şehirler Projesi – Güvenli Toplum, Temiz Çevre, Afet Yönetimi, Karbon Ayak İzi Azaltma, Yenilenebilir Enerji, Verimli Kaynak Kullanımı	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340030003000
Ankara Yenimahalle Belediyesi	Enerji Üreten Pazar Yerleri – 26.394 m ² çatı paneli, 4.4 MW enerji üretimi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400350034003200
Balıkesir BŞB	Akıllı Durak Enerji Yönetimi – Enerji tasarruflu duraklar	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=330039003400

Bursa BŞB

Hava Kalite İstasyonu – Hava kalitesi, gürültü, yağmur, rüzgar ölçümü	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340031003600
Karizma Kapalı Pazar Yeri Güneş Enerjisi Santrali – Fazla enerji satışı ile gelir elde edilmesi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340031003900
Veriye Dayalı Kent Yönetimi – Kamu hizmetlerinde veri kullanımı	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340032003000
İçme Suyu Dağıtım İzleme Projesi – Sürdürülebilir su yönetimi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340032003000
Akıllı Kanalizasyon ve Akarsu Takip Sistemi – Sensörlerle atık su ve pH ölçümü	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100340039003400
Atık Isıyla Bölgesel Isıtma – Sanayi atık ısısının konut/tessilere aktarımı	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100350030003800
nSEB Uyum Planı – Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar için uyum planı	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100350030003900
Çevre Yönetim Merkezi – Çevresel verilerin anlık takibi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100350031003800
Akıllı Şehir Yönetim Merkezi – Tüm merkezlerin tek çatı altında toplanması	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100350036003800
Dijital Enerji Yönetim Platformu – Enerji altyapısının geliştirilmesi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100350039003900

	Yeşil Mutabakat Eylem Planı – Sürdürülebilir kalkınma	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100360030003000
<i>Bursa Gürsu Belediyesi</i>	Akıllı Yeşil Alan ve Peyzaj Yönetimi – Dijital teknolojilerle yeşil alanların yönetimi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400370038003300
<i>Bursa İnegöl Belediyesi</i>	Elektronik Belge Yönetim Sistemi ve E-imza – Dijital dönüşüm, kırtasiye maliyetlerinde azalma	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3300380039003000
<i>Bursa Mustafa Kemal Paşa Belediyesi</i>	Analitik YBS Otomasyonu – Web tabanlı, modüler yönetim bilgi sistemi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400300039003700
<i>Düzce Belediyesi</i>	Entegre Katı Atık Ayrıştırma ve Enerji Üretim Tesisi – ATY ürünleri, karbon sertifikası	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=310032003600
<i>Eskişehir Tepebaşı Belediyesi</i>	Düşük Karbon Ayak İzi İçin Enerji Etkin Bina – 20.425 m ² hizmet binasında enerji verimliliği	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340036003900
<i>İstanbul BŞB</i>	Ortak Akıllı Sayaç Altyapısı – Elektrik, su, doğalgaz sayaçlarının uzaktan okunması	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=340036003100
	Hal ve Pazar Yeri Atıklarından Elektrik ve Kompost Üretimi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=360033003300
	Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) – İş süreçlerinde otomasyon	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100340037003400
	Akıllı Enerji Yönetimi Sistemi – İBB binalarında enerji takibi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100360030003300

	Akıllı Aydınlatma Sistemleri – Dış mekan aydınlatmalarının takibi	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100360030003400
	LoRaWAN Tabanlı Sayaç ve IoT Haberleşme Şebekesi	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3300390035003900
	Yeşil ve Karbon Nötr Binaya Geçiş Rehberi (Build4GreenIST)	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400340034003200
<i>İstanbul Büyükçekmece Belediyesi</i>	Dijital İkiz Projesi – Kentsel planlama için dijital modelleme	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400350030003200
<i>İzmir BŞB</i>	IoT Aydınlatma Kontrol ve Network Altyapısı – LoRaWAN üzerinden aydınlatma ve sulama yönetimi	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3200300030003200
	Karbon Haritası – İzmir il sınırları içinde karbon ayak izi hesaplama	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3200300030003300
<i>Kayseri Talas Belediyesi</i>	Yeşil Dünya İçin Enerji Üreten Kaldırımlar – Piezoelektrik tabanlı kaldırımlar	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400350030003600
<i>Kocaeli BŞB</i>	Atıksu SCADA – Atıksu altyapısının yönetimi ve analizi	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=350037003400
<i>Konya BŞB</i>	Bakım Onarım SCADA Sistemi – Kesintisiz belediye hizmetleri	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3200350038003700
	Akıllı Bina Seyir Defteri – Akıllı binalarda performans izleme	https://akillishirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3300300030003600

	Anomali Tespiti – Görüntü/ses işleme ile yangın, deprem, trafik kazası tespiti	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3300300031003900
Mersin Yenişehir Belediyesi	ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi – Belediyeye ait lokasyonlarda enerji kullanımı takibi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400340037003200
Nevşehir Belediyesi	Otomasyon Sistemi – Vatandaş işlemlerinin dijitalleştirilmesi	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3400340038003100
Sakarya BŞB	Akıllı Sulama Sistemi – Yeşil alanlarda otomatik sulama ile su tasarrufu	https://akillisehirekosistem.csb.gov.tr/DataBank/Detail?mId=3100300031003700

Bu dijital altyapı sayesinde kamu kurumları enerji tüketimini daha detaylı izleyebilmekte, kaynaklarını daha etkin kullanmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerine daha kolay ulaşmaktadır.

4.1.9.2 Dünya Örnekleri ve En İyi Uygulamalar

Dijitalleşme ve sürdürülebilir enerji dönüşümleri, günümüzde sadece ülkelerin enerji politikalarını değil, ekonomik ve toplumsal yaşamı da kökten değiştiren bir gelişme haline geldi. Akıllı şebeke projeleri, bu dönüşümün temel taşı niteliğinde. Özellikle Avrupa, Amerika ve Asya-Pasifik'te uygulanan ileri düzey örneklerle her bölge kendi sürdürülebilirlik ve teknolojik kapasitesine uygun benzersiz projeler geliştiriyor.

4.1.10 Avrupa'daki Akıllı Şebeke Projeleri

a) Malta: Tam Akıllı Şebeke Dönüşümü

Malta, dünyanın ilk "tam akıllı şebeke" ülkelerinden biri olarak gösteriliyor. Ada ülkesinin coğrafi koşulları, altyapı yatırımını merkezi olarak ve tek seferde dönüştürmeye zemin hazırladı. Malta devleti, son kullanıcıdan üretime kadar tüm enerji zincirini akıllı sayaç ve otomasyon sistemleriyle entegre etti. Neredeyse her haneye 250 bin akıllı sayaç kuruldu; tüketici davranış analizleriyle talebe göre değişen dinamik fiyatlandırmalar ve anında tüketim teşvik/uyarı sistemleri devreye alındı. Enerji tüketicileri daha şeffaf bilgiye erişip, uygun tarifeleri seçebiliyor, düşük tüketimle ödüllendiriliyor ve karbon ayak izlerini düşürebiliyorlar. Tüm şebekenin dijitalleşmesi, enerji kaybını %20'lere varan oranda azalttı ve ülke bütçesine kısa sürede önemli katkılar sağladı.

Kaynak: Malta's Smart Grid Solution <https://spectrum.ieee.org/maltas-smart-grid-solution>

Kaynak:The Smart Grid in Malta <https://mthink.com/smart-grid-malta/>

Kaynak:IBM Bringing World's First Whole-Nation "Smart Grid" to Malta

<https://insideclimatenews.org/news/08022009/ibm-bringing-worlds-first-whole-nation-smart-grid-malta/>

Kaynak:IBM to implement Smart Grid system for Malta

<https://www.waterworld.com/home/article/16218761/ibm-to-implement-smart-grid-system-for-malta>

Kaynak:Our vision for digitisation of Malta's energy system | Ryan Callus

[https://www.maltatoday.com.mt/comment/opinions/131985/our_vision_for_digitisation_of_maltas_energy_sy
stem__ryan_callus](https://www.maltatoday.com.mt/comment/opinions/131985/our_vision_for_digitisation_of_maltas_energy_system__ryan_callus)

Kaynak:Malta's 2030 National Energy and Climate Plan https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/mt_final_necp_main_en_0.pdf

b) Almanya: E-Energy ve Energiewende

Almanya, akıllı şebeke uygulamalarını enerji dönüşüm stratejisinin merkezine konumlandırdı. E-Energy girişimi ve meşhur "Energiewende (Enerji Dönüşümü)" ile Almanya, ülke genelinde yenilenebilir kaynakların entegrasyonu, dağıtık üretim, akıllı sayaçlar ve toplumsal katılım üzerine benzersiz bir model inşa etti. Almanya, 2030'da elektrik üretiminin %80'ini yenilenebilir kaynaklardan elde etmeyi, 2045'te ise tamamen karbon nötr olmayı hedefliyor. 2012'de açılan Nordlink projesiyle Norveç'le deniz altından entegre olan Almanya artık fazla yenilenebilir elektriğini komşularına satabiliyor, enerjide arz güvenliğini ve elektrik fiyatlarının istikrarını artırıyor. Ayrıca, E-Energy kapsamında sadece büyük şirketlerin değil, bireysel konut sahiplerinin, tarımsal kooperatiflerin ve küçük işletmelerin de şebeke katılımcısı olmasını sağlayan bir altyapı oluşturuldu, bu sayede enerji üretimi merkeziyetçi olmaktan çıktı.

Kaynak:Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). "The Energy Transition (Energiewende) in Germany."; <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-transition.html>

Kaynak: International Energy Agency (IEA). "Germany 2023 Energy Policy Review." <https://www.iea.org/reports/germany-2023>

Kaynak:Agora Energiewende. "The Energiewende in a Nutshell – Ten Questions and Ten Answers." <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/the-energiewende-in-a-nutshell>

Kaynak:Umweltbundesamt (Federal Environment Agency of Germany). "Greenhouse Gas Emissions and Climate Protection Targets." <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy>

Kaynak:Fraunhofer ISE – Institute for Solar Energy Systems. "Net Public Electricity Generation in Germany 2024." <https://www.ise.fraunhofer.de/en>

Kaynak:Bundesnetzagentur (Federal Network Agency). "Monitoring Report 2023 – Energy Markets in Germany." <https://www.bundesnetzagentur.de>

Kaynak:Energy Brainpool (2022). "Economic Impacts of the German Energy Transition." <https://www.energybrainpool.com>

Kaynak:Renn, O. & Marshall, J.P. (2016). "Coal, nuclear and renewable energy policies in Germany: From the 1950s to the Energiewende." *Energy Policy*, 99, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.004>

c) Malaga ve Diğer Avrupa Projeleri

İspanya'daki Malaga SmartCity Projesi, 10.000'in üzerinde haneye, yenilenebilir enerji ve depolama entegre akıllı şebeke teknolojileri sunan; elektrikli araç, mikro şebeke ve farklı katmanlarda yönetim örnekleriyle Avrupa'nın örnek projelerindendir. Avrupa'da 300'ü aşkın büyük akıllı şebeke projesine son 10 yılda 5,5 milyar Euro yatırım yapılmıştır.

Kaynak:Spain: Innovative Smart City principles in the city of Malaga, partner in the SME4SMARTCITIES Project <https://www.enicbcmmed.eu/spain-innovative-smart-city-principles-city-malaga-partner-sme4smartcities-project>

Kaynak:Smart Grid Malaga <https://www.interregeurope.eu/good-practices/smart-grid-malaga>

Kaynak:Malaga, One of the World's Smart Cities <https://urbytus.es/malaga-one-of-the-worlds-smart-cities/>

4.1.10.1 Amerika ve Asya-Pasifik Bölgesi Örnekleri

a) ABD: Dev Akıllı Şebeke Yatırımları

ABD, akıllı şebeke yatırımlarına en fazla bütçe ayıran ülkelerden biri. Sadece son 10 yılda toplam 3,4 milyar dolarlık yatırımla Houston, Boulder, Austin gibi şehirlerde dev projeler yürütüldü. Akıllı sayaçların ülke genelinde yaygınlaşmasıyla 2020'de 60 milyon hanede anlık izleme ve dinamik faturalama sunuluyor. ABD'nin vizyonu, 2035'te elektriğin %80'inin yenilenebilir kaynaklardan gelmesi ve akıllı elektrikli araç altyapısının yaygınlaşması üzerine kurulu. Ayrıca şebeke esnekliği ve afetlere karşı hızlı müdahale için çeşitli bölgelerde pilot uygulamalar

yapılıyor. Kaliforniya’da ise şebeke istikrarını sağlamak amacıyla dağıtık enerji kaynakları ile yapay zeka tabanlı talep yönetimi sistemleri birlikte çalışıyor.

Kaynak:LIVE FROM AUSTIN, TEXAS: The Smart City Challenge

https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Transportation/Austin_SCCFinal_Volume1_5.25.pdf

Kaynak:A S C A • Austin Smart City Alliance <http://www.austinsmartcity.org/>

Kaynak:SmartLA <https://ita.lacity.gov/smartla2028>

Kaynak:Smart City Initiative <https://longbeach.gov/smartcity/>

b) Singapur: Ulusal Akıllı Enerji Programı

Singapur, dünya ölçeğinde kompakt bir şehir devleti olmanın avantajıyla, dijitalleşmeyi en geniş anlamda hayatın her alanına entegre etti. “Akıllı Millet” vizyonu kapsamında 2,8 milyar dolarlık yatırım ile her kamu binasında Wi-Fi, veri toplama altyapısı, akıllı sayaçlar ve güneş enerjisi tabanlı mikro-grid sistemleri hayata geçirildi. SolarNova adlı programla 2030 hedeflerinde 2 GWp güneş enerjisi kapasiteli şebekeye geçiş planlandı. Ayrıca, otonom araç ve enerji yönetimi projeleriyle hem toplu taşımanın hem de bireysel ulaşımın enerji verimliliği artırılıyor. Singapur’un su üstünde geliştirdiği yüzen enerji depolama sistemleri ve ulusal sensör ağı projesi de enerji ve çevre yönetiminde çığır açıyor.

Kaynak:Discover the foundation of Singapore’s vision to be a Smart Nation

<https://www.smartnation.gov.sg/about/our-vision/smart-nation-vision/>

Kaynak:Singapore: the world’s smartest city <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide-digital-identity-and-security/iot/magazine/singapore-worlds-smartest-city>

Kaynak:Our Smart City Projects & Solutions in Singapore <https://www.tech.gov.sg/about-us/what-we-do/our-capabilities/smart-city-technology>

c) Çin: Büyük Akıllı Şehir ve Şebeke Projeleri

Çin, akıllı şehirler ve dijital enerji altyapısı yatırımlarında dünya lideri. Yinchuan, Xiong'an gibi ulusal pilot şehirlerde trafik yönetimi, enerji dağıtımı ve çevre kontrolü tamamen dijitalleştirildi. Shenzhen ve Hangzhou'da ise Alibaba ve Tencent gibi dev şirketlerin "Şehrin Beyni" (City Brain) platformları, trafik akışı, enerji kullanımı ve acil durum yönetimi gibi hizmetlerde gerçek zamanlı analiz ve yapay zeka destekli optimizasyon sağlıyor. Çevre dostu, yüksek teknolojiyle donatılmış bu yeni kentlerin merkezinde sıfırdan inşa edilen yeşil ekosistemler, enerji verimliliği yüksek binalar ve toplu ulaşım sistemleri yer alıyor.

Örneğin, Hangzhou'da trafik ışıkları ve toplu ulaşımın tamamı yapay zeka ile yönetilip, kentte trafik sıkışıklığı ciddi oranda azaltıldı.

Kaynak:City Brain https://en.wikipedia.org/wiki/City_Brain

Kaynak:Hangzhou launches City Brain 3.0, advancing smart governance https://www.ehangzhou.gov.cn/2025-04/01/c_293162.htm

Kaynak:City brain system makes city smarter https://www.ehangzhou.gov.cn/2020-10/23/c_275749.htm

Kaynak:Hangzhou City Brain <https://atlasofurbantech.org/cases/chn-hangzhou/>

Global Akıllı Şebeke Projeleri

Ülke/Bölge	Proje/Politika	Ana Hedef ve Özellikler	Yatırım /Etki
Malta	Tam Akıllı Şebeke	Her haneye akıllı sayaç; tüketici katılımı, dinamik fiyatlandırma, %20 kayıp azalımı	250 bin sayaç, ülke çapı uygulama
Almanya	Energiewende/E-Energy	Merkeziyetsiz üretim, yenilenebilirin entegrasyonu, çapraz ülke bağlantı (Nordlink)	2030'da %80 yenilenebilir hedef
İspanya (Malaga)	SmartCity	11 binden fazla haneye entegre şebeke, elektrikli araç altyapısı	AB fon desteğiyle kapsamlı pilot

ABD	Akıllı Şebeke Programları	60 milyon hanede akıllı sayaç, dağıtık üretim, elektrikli araçlar	3.4 milyar \$ yatırım, 20 yıl projeksiyon
Singapur	Akıllı Millet, SolarNova	2,8 milyar \$ yatırım, güneş mikro-gridler, yüzen ESS, sensör ağı	2030'da 2 GWp güneş hedefi
Çin	Yinchuan, Xiong'an, City Brain	Yapay zeka yönetimli şehirler, devasa dijital altyapı, çevre ve ulaşım entegrasyonu	Sosyal veri, trafik, enerji yönetimi

Geleceğe Yön Veren Modeller

Dünya çapında yürütülen akıllı şebeke projeleri, yalnızca enerji maliyetlerini düşürmekle kalmıyor; sürdürülebilirlik, kriz yönetimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve vatandaş katılımı gibi çok boyutlu faydalar sağlıyor.

Malta'nın küçük ölçekli ama tam kapsamlı dönüşümü, Almanya'nın yenilenebilir odaklı modeli, ABD'nin altyapı güvenliği yaklaşımı, Singapur'un şehir ölçekli stratejisi ve Çin'in mega projeleri, farklı koşullarda e-verimlilik ve akıllı enerji yönetiminin nasıl uygulanabileceğine dair güçlü dersler sunuyor.

4.1.11 Maliyet-Fayda Analizi ve ROI Hesaplamaları

4.1.11.1 Akıllı Enerji Yönetimi ve e-Verimlilikte Yatırımın Değerlendirilmesi

Enerji verimliliği, dijitalleşme ve akıllı sistemlerin yükselişiyle birlikte sadece teknoloji kullanımı olarak kalmayıp, ekonomik anlamda da çok önemli bir yatırım alanı haline gelmiştir. Bu noktada, **maliyet-fayda analizi** ve **Yatırımın Geri Dönüşü (ROI)** hesaplamaları, yapılan yatırım kararlarının ekonomiye katkısını net bir şekilde ortaya koyar. **Yatırım değişimi, geri dönüş süreleri, enerji tasarrufu potansiyeli, maliyet azaltımı ve operasyonel verimlilik kazanımları** gibi önemli kavramlar detaylandırılacaktır.

4.1.11.2 Maliyet-Fayda Analizi Nedir?

Maliyet-fayda analizi, bir projenin ya da teknolojik yatırımla ilgili harcamaların karşılığında elde edilecek faydaların sistematik olarak hesaplanmasıdır. Burada dikkate alınan maliyetler genellikle;

- **Yatırım maliyeti** (örneğin, akıllı sayaç, IoT altyapısı ve yazılım platformları),

- **İşletme maliyetleri** (bakım, işletim ve eğitim giderleri),
- **Olası dolaylı maliyetler** (iş gücü adaptasyonu, eğitim zaman kaybı),
- **Enerji tasarrufu ile maliyet azalmaları,**
- **Operasyonel verimlilik ve otomasyonla sağlanan insan kaynağı tasarrufları,**
- **Bakım ve üretim süreçlerindeki iyileşmelerden kaynaklanan gelir artışları veya tasarruflar,**
- **Karbon ayak izinin ve çevresel maliyetlerin azaltılması.**

Bu analiz, yatırımın ne kadar sürede kendini amorti edeceğini ve bu süreden sonraki kazanç potansiyelini gösterir.

c) Yatırım Değişimi ve Geri Dönüş Süreleri

Akıllı enerji sistemlerinde ve genel e-verimlilik projelerinde yatırım maliyetleri, kullanılan teknolojinin kapsamına, ölçeğine ve entegrasyon zorluklarına göre değişir. Örneğin, bir akıllı şebeke projesi milyonlarca dolarlık yatırımlar gerektirirken, küçük bir sanayi tesisinde IoT tabanlı enerji izleme sistemleri daha düşük yatırım gerektirebilir.

Geri Dönüş Süresi (Payback Period) Nedir?

yatırımdan elde edilen tasarruflar veya ek gelirler, başlangıç maliyetini karşıladığı zamana **geri dönüş süresi (payback period)** denir.

Örneğin;

- İtalya'da gerçekleştirilen bir akıllı şebeke projesinde, 2,1 milyar Euro'luk yatırım, yıllık yaklaşık 500 milyon Euro tasarruf ve verimlilik kazancı ile yaklaşık 4 yılda kendini amorti etmiştir.

Kaynak: EMO - "Akıllı Şebeke Stratejileri ve Örnek Projeler" (İtalya Telegestore)

https://www.emo.org.tr/ekler/b790c8dde17d8bf_ek.pdf

- ABD'de bazı akıllı sayaç ve enerji yönetimi yatırımlarında geri dönüş süresi sektöre ve teknolojik çözümün boyutuna göre 2-5 yıl arasında değişmektedir.

Kaynak: Muhammed Yenilmez - "Akıllı Şebekelerde Dağıtım Sistemleri"

https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/MekatronikProjeUygulamasi/19Akıllı_Sebekeler_ve_Sistem_Otomasyonundaki_Gelismeler-Muhammed_YENILMEZ.pdf

- ISO 50001 Uygulamaları – Ekonomik ve Çevresel Fayda Gıda üretim tesislerinde ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi (EnYS) uygulamasıyla; yıllık 929 555 kWh enerji tasarrufu, ekonomik olarak 371 822 TL kazanç, ve 1 200 733 kg CO₂ emisyon azaltımı sağlandığı tespit edilmiştir

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1359272>

- Küçük ve orta ölçekli işletmelerde IoT tabanlı enerji ve süreç optimizasyon sistemleri ile 12-24 ay gibi kısa sürelerde yatırım geri dönmektedir.

Yatırım Maliyeti ve Geri Dönüş Süresi Örnekleri

Proje Türü	Ortalama Yatırım Maliyeti	Ortalama Geri Dönüş Süresi	Kaynak/Örnekler
Ulusal Akıllı Şebeke Projesi	Milyar Euro seviyesinde	3-5 yıl	İtalya Telegestore Projesi
Sanayi IoT Enerji İzleme	50.000 - 200.000 USD	1-2 yıl	ABD ve Türkiye sanayi uygulamaları
Kamu Sektörü OSOS Projeleri	Milyon dolar seviyesinde	2-4 yıl	Türkiye OSOS yaygınlaştırması

4.1.11.3 Enerji Tasarrufu Potansiyeli ve Maliyet Azaltımı

Enerji Tasarrufu

Enerji verimliliği uygulamalarında en temel fayda önemli düzeyde enerji tasarrufudur. Akıllı enerji yönetimi ve IoT çözümleri, gereksiz veya yüksek tüketimlerin anlık tespiti ve optimizasyonu sayesinde ciddi enerji düşüşü sağlar.

- Sanayi tesislerinde**, enerji verimliliği iyileştirmeleri genellikle %15-30 arasında enerji tasarrufu sağlar.

Kaynak: EMO - "Akıllı Şebeke Stratejileri ve Örnek Projeler"
https://www.emo.org.tr/ekler/b790c8dde17d8bf_ek.pdf

- Kamu sektöründe**, özellikle kamu binalarındaki enerji yönetimi sistemleri %10-20 arasında enerji azaltımı sağlar.
- Akıllı şebeke projelerinde**, şebeke kayıp-kaçak oranları %10-20 aralığında düşürülebilir, dağıtım ve üretim kayıpları azaltılarak buna bağlı maliyetler düşürülür.

Kaynak: EMO - "Akıllı Şebeke Stratejileri ve Örnek Projeler"

https://www.emo.org.tr/ekler/b790c8dde17d8bf_ek.pdf

TÜBİTAK & ETKB - Türkiye'de OSOS ve Akıllı Sayaç Uygulamaları

https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/295093/yokAcikBilim_10279466.pdf?sequence=-1

Maliyet Azaltımı

Enerji tasarrufu, doğrudan fatura maliyetlerinin azalması anlamına gelir. Ek olarak;

- **Bakım ve arıza giderleri azalır:** Öngörücü bakım ve uzaktan izleme ile maliyetler %15-25 oranında düşer.
- **İş gücü tasarrufu sağlanır:** Otomasyon ile manuel takip ve müdahale ihtiyaçları azalır.
- **Enerji fiyat dalgalanmalarına tepki verilebilir:** Dinamik fiyatlandırma ve talep yönetimi sayesinde pik tüketimleri önlenerek aşırı maliyetler engellenir.

4.1.11.4 Operasyonel Verimlilik Kazanımları

Enerji maliyetlerinin düşmesi, tek başına verimlilik kazancı değildir. Dijital enerji yönetimi ve e-verimlilik projeleri operasyonel süreçlere yayılır:

- **İzleme ve analiz kolaylaşır:** Gerçek zamanlı veri kullanarak hızlı karar alınır.
- **Kaynak kullanımı optimize edilir:** İnsan, malzeme, enerji ve ekipman kaynakları daha az atık ve daha yüksek performansla kullanılır.
- **Arıza ve duruş süreleri azalır:** Üretim verimliliği artar.
- **Çevresel sürdürülebilirlik sağlanır** ve bu da kurumsal itibar ve yasal uyum açısından önemlidir.

4.1.11.5 ROI Hesaplama Örneği

ROI, yani yatırımın geri dönüş oranı, yatırılan sermayeye karşılık elde edilen net kazancı yüzde olarak gösterir.

Formül:

$$ROI = \left(\frac{\text{Yatırımdan Elde Edilen Net Kazanç}}{\text{Toplam Yatırım Maliyeti}} \right) \times 100$$

Örnek:

Sanayide IoT tabanlı enerji yönetim sistemine 200.000 TL yatırım yapılmış, 1 yıl sonunda enerji maliyetlerinde 50.000 TL tasarruf ve 20.000 TL operasyonel maliyet azaltımı sağlanmışsa:

- Net Kazanç = 50.000 + 20.000 = 70.000 TL
- ROI = (70.000 / 200.000) x 100 = %35

Bu, yatırımın her harcanan 1 TL için 0,35 TL kazanç getirisi olduğu anlamına gelir.

Örnek:

Enerji yönetim projelerinde yatırımın geri dönüşünü (ROI) yalnızca finansal kazanç açısından değil, aynı zamanda çevresel etkiler açısından da değerlendirmek gerekir. Örneğin, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi'nin uygulandığı bir gıda üretim tesisinde, yıllık **929.555 kWh enerji tasarrufu** ve **371.822 TL ekonomik kazanç** sağlanırken, eş zamanlı olarak **1.200.733 kg CO₂ emisyonu** azaltılmıştır (Kaynak: Dergipark, *ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması*). Sanayi sektöründe fan ve pompalara invertör entegrasyonu ile %60'a varan tasarruf elde edilmiş, cam üretim tesislerinde yapılan analizlerde ise yıllık **7594,7 TEP** enerji tasarrufu ve **338.090 TL** finansal kazanç raporlanmıştır. Bu tür örnekler, ROI hesaplamalarının yalnızca "maliyet geri dönüş süresi" değil, aynı zamanda karbon azaltımı ve sürdürülebilirlik boyutlarını da içermesi gerektiğini göstermektedir.

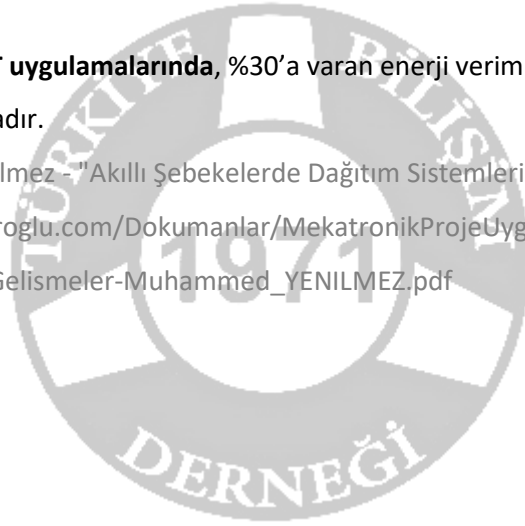
Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1359272>

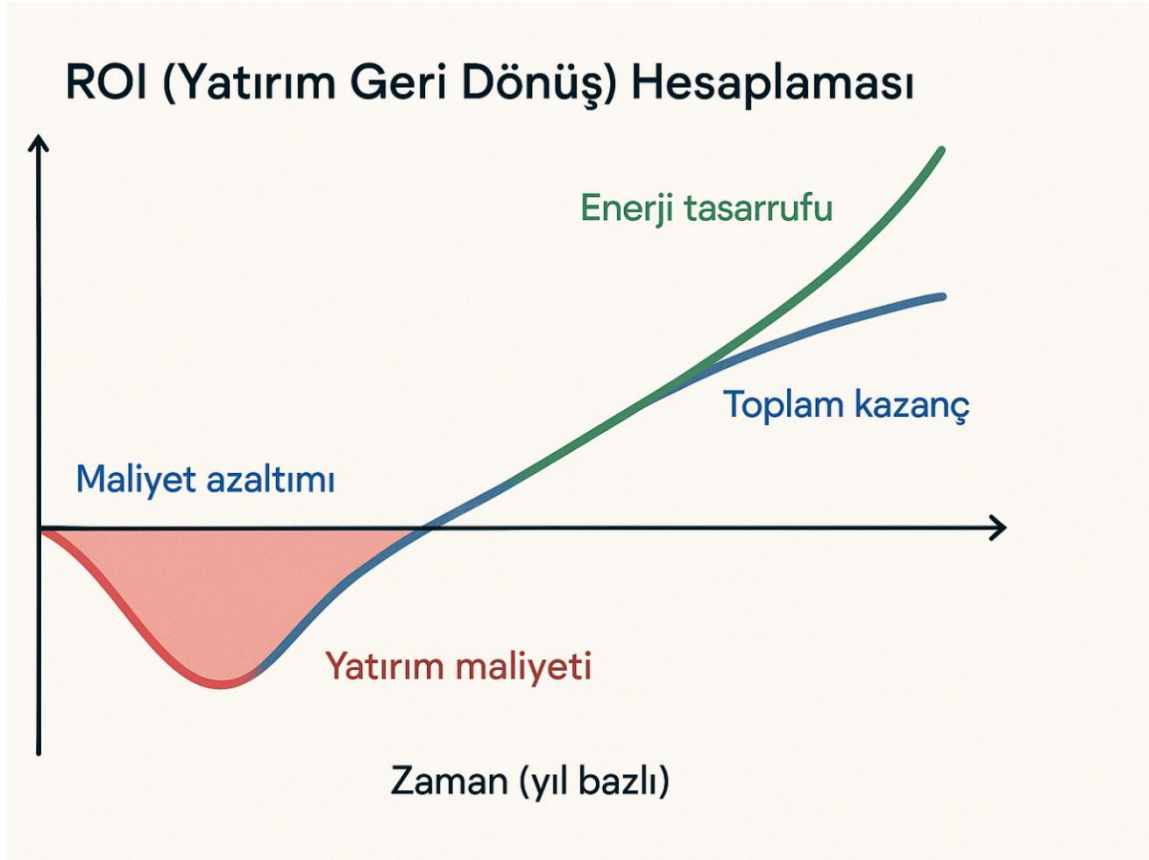
Maliyet-Fayda ve ROI Açısından Farklı Proje Türleri

Proje Tipi	Yatırım Maliyeti	Geri Dönüş Süresi	Ortalama Enerji Tasarrufu	Ortalama ROI (%)	Operasyonel Fayda
Ulusal Akıllı Şebeke Projesi	Milyar Euro	3-5 yıl	%15-20	20-25	Şebeke kayıp-kaçak %20 azaltımı
Sanayi IoT Enerji Yönetimi	50.000 - 200.000 USD	1-2 yıl	%15-30	30-50	Otomasyon, Arıza önleme
Kamu OSOS Projeleri	Milyon Dolar seviyesinde	2-4 yıl	%10-15	15-20	Sayaç okuma maliyetlerinde azalma
Dijital Süreç Yönetimi	Değişken	1-3 yıl	Dolaylı enerji ve zaman tasarrufu	20-35	İnsan verimliliği artışı

4.1.11.6 Kurumsal Kaynaklarla Destek

- **Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) raporu:** İtalya'daki Telegestore akıllı sayaç projesinin, 4 yıllık kendini amorti süresi ve yıllık 500 milyon Euro kazanç beklentisi önemli bir örnektir.
Kaynak: EMO - "Akıllı Şebeke Stratejileri ve Örnek Projeler"
https://www.emo.org.tr/ekler/b790c8dde17d8bf_ek.pdf
- **Türkiye'de OSOS uygulamaları ile şebeke kayıplarının azaltılması** üzerine TÜBİTAK ve ETKB destekli çalışmalar, yatırımın ekonomik faydalarını doğrulamaktadır.
TÜBİTAK & ETKB - Türkiye'de OSOS ve Akıllı Sayaç Uygulamaları
https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/295093/yokAcikBilim_10279466.pdf?sequence=-1
- **ABD ve Avrupa sanayi IoT uygulamalarında, %30'a varan enerji verimliliği, operasyonel tasarruf ve yüksek ROI raporlanmaktadır.**
Kaynak: Muhammed Yenilmez - "Akıllı Şebekelerde Dağıtım Sistemleri"
https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/MekatronikProjeUygulamasi/19Akilli_Sebekeler_ve_Sistem_Otomasyonundaki_Gelismeler-Muhammed_YENILMEZ.pdf





Maliyet-fayda analizi ve ROI hesaplamaları, akıllı enerji yönetimi ve e-verimlilik yatırımlarının finansal sürdürülebilirliğini ortaya koymak için hayati önem taşır. Teknolojinin ve dijitalleşmenin doğru kullanımı ile;

- Yatırımlar çoğunlukla 1-5 yıl içinde kendini amorti eder,
- Enerji tüketiminde ciddi düşüşler sağlanır (yüzde 10-30 arasında),
- Operasyonel verimlilik artar,
- Sabit ve değişken maliyetlerde anlamlı azalma gerçekleşir,
- Karbon ayak izi ve çevresel maliyetler düşer.

Bu ekonomik faydalar, enerji verimliliği ve dijital dönüşüm projelerinin sadece çevresel değil, rekabetçi işletme ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri için de vazgeçilmez olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu bilgiler ışığında, akıllı enerji sistemlerine ve e-verimliliğe yapılan yatırımlar, sadece teknolojik ilerleme değil, akılcı finansal yönetimle desteklenerek sürdürülebilir başarı sağlar.

4.1.11.7 Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi

Enerji yönetiminde ROİ'nin yanında sürdürülebilirlik katkıları da önemlidir. Arz yönünde yenilenebilir enerji yatırımları ve güçlü çevre politikaları; talep yönünde ise teşvikler, sübvansiyonlar, vergi indirimleri ve kamu bilincini artırıcı kampanyalar kritik rol oynamaktadır (Kaynak: Dergipark, *Enerji Verimliliğinde Arz ve Talep Yönlü Yaklaşımlar*). Bu stratejilerin bütüncül uygulanması sayesinde hem enerji yoğun sektörlerde dışa bağımlılık azalmakta hem de karbon emisyonu hedefleri doğrultusunda ilerleme sağlanmaktadır. Ayrıca ISO 14064 standardı çerçevesinde karbon ayak izi hesaplama metodolojilerinin entegrasyonu, şirketlerin çevresel raporlama süreçlerini güçlendirmekte ve sürdürülebilirlik stratejilerini ölçülebilir hale getirmektedir.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/64333/698615>

4.1.12 Dijital Dönüşümle Zaman, İnsan, Malzeme ve Süreçlerde Yeni Bir Verimlilik Anlayışı

Günümüz dünyasında verimlilik artık yalnızca enerji tasarrufu yapmakla sınırlı değil; zamanı daha etkin kullanmak, insan kaynağını daha stratejik görevlerde değerlendirmek, malzeme israfını azaltmak ve ekipman ömrünü uzatmak da verimlilik kavramının önemli parçaları haline geldi. İşte tam bu noktada e-verimlilik devreye giriyor.

E-verimlilik, dijital teknolojiler sayesinde iş süreçlerinde, iletişimde, kaynak kullanımında ve karar alma mekanizmalarında sağlanan bütünsel verimlilik artışını ifade eder. Yani yalnızca enerjiyi değil, insanı, zamanı, kağıdı, malzemeyi ve hatta ekipmanları kapsar.

Bu dönüşümün en temel yönü, geleneksel süreçlerin dijital sistemlere taşınmasıdır: kağıt belgeler yerine e-imza, dolap dolusu klasörler yerine dijital arşiv, karmaşık onay mekanizmaları yerine otomatik süreç yönetimi gibi çözümlerle, yalnızca iş hızlanmaz; aynı zamanda maliyetler düşer, hatalar azalır ve sürdürülebilirlik güçlenir.

4.1.13 Zaman Verimliliği: Daha Az Bekleme, Daha Çok Üretim



Zaman, günümüz iş dünyasında en kritik kaynaklardan biridir. Geleneksel yöntemler çoğu zaman **bürokratik engeller, bekleme süreleri ve tekrarlayan işlemler** nedeniyle ciddi zaman kayıplarına yol açar.

Dijitalleşme ile Zaman Kazanma Örnekleri:

- **E-imza:** Klasik imza süreçlerinde belgelerin elden ele dolaşması günler alırken, e-imza ile onaylar **dakikalar içinde** tamamlanır.
- **Dijital toplantılar:** İş seyahatlerine ayrılan zaman, video konferans sistemleriyle büyük oranda azaltılmıştır.
- **Otomatik süreç yönetimi:** Örneğin, bir üretim tesisinde satın alma taleplerinin manuel olarak onaylanması yerine, **ERP sistemleri** üzerinden otomatik onay mekanizmaları kurulur.

Örnek: Sağlık kuruluşları HBYS sistemleri ile hasta kabul süreçlerini dijitalleştirerek kayıt sürelerini ortalama 30 dakikadan 5 dakikaya indirdi. Bu sadece zaman kazancı değil, hizmet kapasitesinde de önemli artış sağladı.

4.1.14 İnsan Verimliliği: İnsan Kaynağını Stratejik Alanlara Yönlendirme

E-verimlilik yalnızca işleri hızlandırmak değil, **insan kaynağını tekrar eden görevlerden kurtararak değer katan işlere yönlendirmektir.**



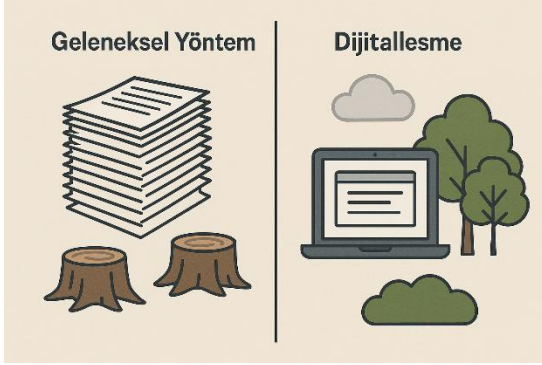
Uygulama Örnekleri:

- **Robotik süreç otomasyonu (RPA):** Faturalama, veri girişleri gibi tekrarlı işler yazılım robotlarına devredilerek personel daha analitik ve stratejik işlerde çalışır.
- **Dijital eğitim platformları:** Fiziksel eğitimler yerine dijital modüllerle, personelin sürekli gelişimi desteklenir.
- **Çalışma takibi yazılımları:** Özellikle uzaktan çalışan ekiplerde, proje ve görev yönetim yazılımları (Trello, Asana vb.) iş yükünü optimize eder.

Örnek: İstanbul'daki bir lojistik firması, depo çalışanlarının vardiya planlamasını yapay zeka destekli yazılım ile otomatikleştirerek yöneticilerin planlama için harcadığı zamanı %80 azalttı.

Kaynak: <https://en.wikipedia.org/wiki/E-HRM>

4.1.15 Kağıt ve Malzeme Verimliliği: Dijitalleşmenin Sürdürülebilir Etkisi



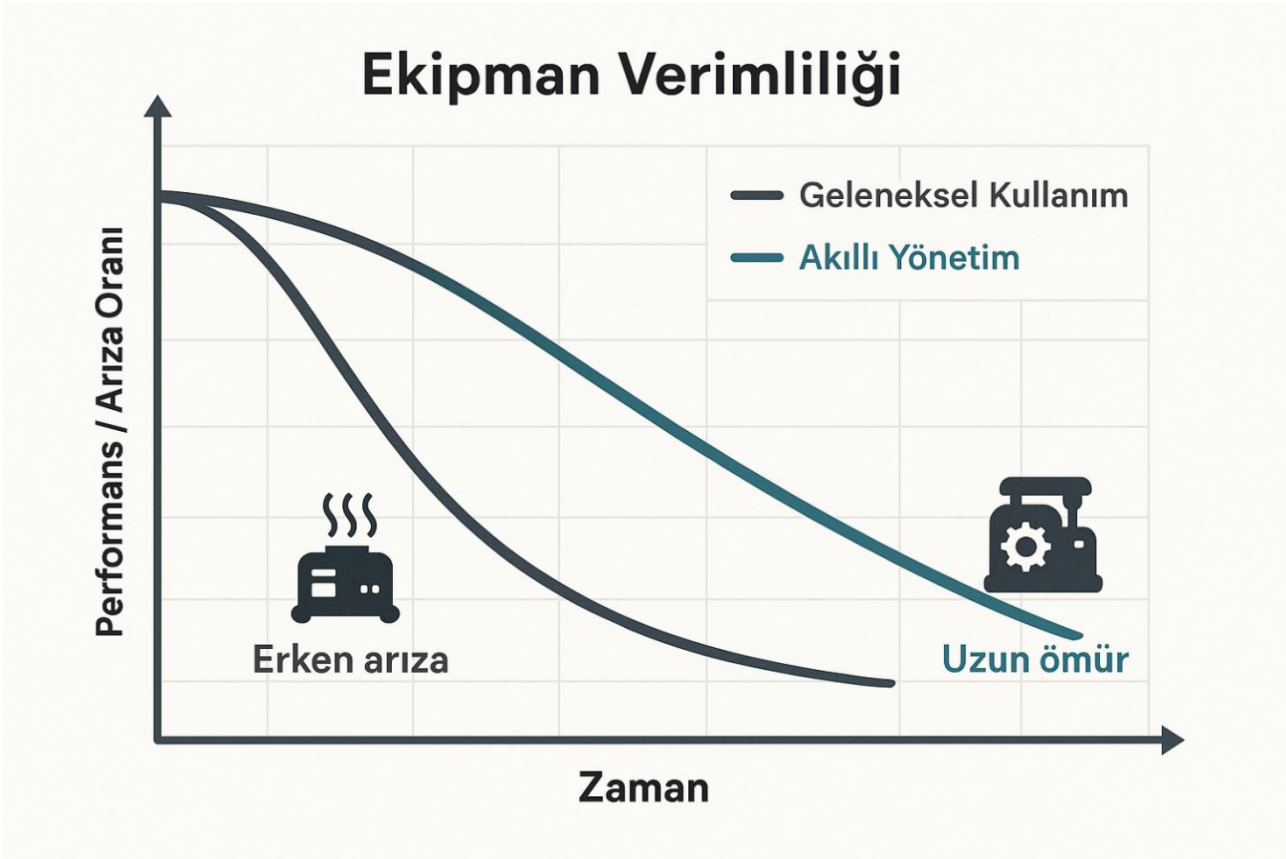
E-verimliliğin en görünür faydalarından biri **kağıt, toner** ve arşiv alanı gibi kaynakların kullanımında ciddi **azalma** sağlamasıdır.

Dijitalleşmenin Katkıları:

- **Dijital arşivleme:** Klasör dolusu belgeler yerine bulut tabanlı arşiv sistemleriyle hem yer hem de arama süresi tasarrufu.
- **E-fatura ve e-defter:** Kağıt fatura ve defterlerin yerini dijital formatlar alarak baskı, kargo ve depolama maliyetlerini ortadan kaldırır.
- **Sanal toplantı dokümanları:** Basılı toplantı belgeleri yerine dijital paylaşımlarla kağıt tüketimi büyük ölçüde azalır.

Örnek: Türkiye'deki büyük bir üniversite, e-imza ve dijital arşiv sistemine geçerek yılda 15 ton kağıt kullanımını önledi; bu hem maliyet tasarrufu hem de çevresel fayda sağladı.

4.1.16 Ekipman Verimliliği: Daha Uzun Ömür, Daha Az Arıza



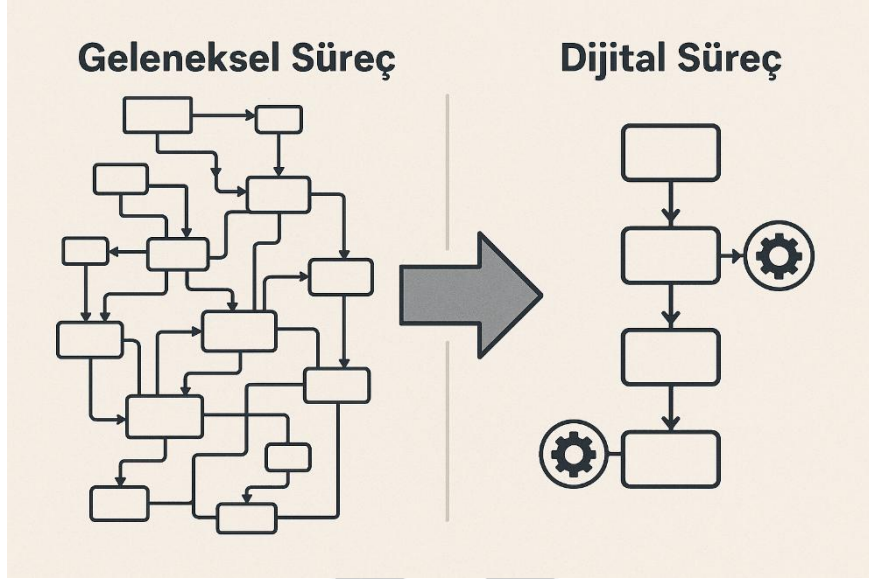
Dijitalleşme, ekipmanların da daha verimli kullanılmasını sağlar.

Uygulamalar:

- **Dijital bakım takibi:** IoT destekli sistemlerle ekipmanların bakım ihtiyaçları önceden tespit edilir, arızalar oluşmadan önlenir.
- **Uzaktan erişim ve yönetim:** Kritik cihazların performansı uzaktan izlenerek sorunlara hızlı müdahale edilir.
- **Yapay zeka ile kullanım optimizasyonu:** Makineler yalnızca gerektiğinde çalıştırılır, boşa çalıştırma süreleri azaltılır.

Örnek: Bir gıda fabrikasında dijital bakım takibi uygulaması sayesinde üretim hatlarındaki beklenmedik duruşlar %25 oranında azaldı.

4.1.17 Dijital Süreç Yönetimi: Karmaşıklığı Azaltan Çerçeve



E-verimliliğin temel yapı taşlarından biri de **dijital süreç yönetimidir**. İş akışları dijital platformlarda tasarlanarak süreçler daha şeffaf, izlenebilir ve hızlı hale gelir.

Öne Çıkan Faydalar:

- **Otomatik görev atamaları:** İşlerin kimin sorumluluğunda olduğu netleşir.
- **Gerçek zamanlı takip:** Yöneticiler, projelerin hangi aşamada olduğunu anlık görebilir.
- **Performans ölçümü:** İş süreçlerinin verimliliği sayısal olarak değerlendirilebilir.

Örnek: Bir inşaat firması, teklif ve onay süreçlerini dijital proje yönetimi platformuna taşıyarak ihale hazırlık sürelerini %40 kısalttı.

Karşılaştırma: Geleneksel vs. Dijital Süreçler

Aşağıdaki tablo, e-verimliliğin sağladığı dönüşümü özetliyor:

Kriter	Geleneksel Yöntem	Dijital (E-Verimlilik)
İmza ve Onay Süreci	Fiziksel dolaşım, günler	E-imza, dakikalar
Belge Yönetimi	Kağıt arşiv, zor arama	Dijital arşiv, saniyeler
Toplantılar	Fiziksel, zaman ve yol maliyeti	Çevrim içi, minimum zaman kaybı
İş Takibi	Manuel listeler	Otomatik süreç yönetimi

4.1.18 Türkiye'den Çeşitli Örnekler

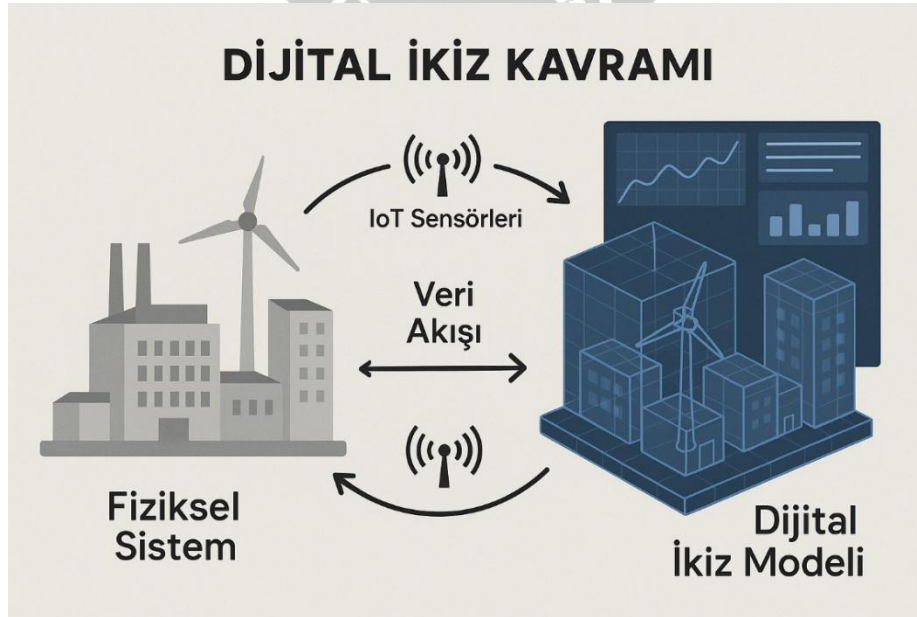
- **Sağlık sektöründe:** Dijital hasta kayıt ve randevu sistemleri ile hasta kabul süreleri kısaldı, bekleme süreleri %50 azaldı.
- **Belediyelerde:** E-belediye uygulamalarıyla ruhsat, ödeme ve şikayet süreçleri dijitale taşındı; vatandaşların belediyeye gitme zorunluluğu ortadan kalktı.
- **Tarımda:** Dijital platformlarla çiftçiler ürünlerini çevrim içi pazarlara hızlıca ulaştırarak satış süreçlerinde zaman ve maliyet avantajı elde etti.

E-Verimlilik Geleceğin Çalışma Kültürüdür

E-verimlilik, yalnızca teknolojik bir yenilik değil, **iş yapma kültüründe köklü bir dönüşümdür**. Dijitalleşen iş süreçleriyle zaman kayıpları azalıyor, insan kaynağı daha stratejik alanlara kaydırılıyor, kağıt ve malzeme kullanımı minimuma iniyor, ekipmanlar daha uzun ömürlü hale geliyor.

Bu sadece maliyetleri düşüren bir yaklaşım değil; aynı zamanda iş dünyasını daha çevik, sürdürülebilir ve rekabetçi hale getiren stratejik bir dönüşümdür.

4.2 Dijital İkizler İle Enerji Modelleme Ve Simülasyon Uygulamaları



Dijitalleşmenin enerji yönetimine getirdiği en ileri çözümlerden biri, **dijital ikiz (digital twin)** teknolojisidir. Bu teknoloji, gerçek bir varlığın –bir bina, bir üretim hattı, bir enerji sistemi veya hatta bir şehir altyapısının– **sanal bir kopyasının** oluşturulmasına dayanır. Ancak bu yalnızca “üç boyutlu bir model” değildir. Dijital ikizler, **fiziksel sistemlerle senkronize çalışan, gerçek zamanlı veriyle beslenen ve farklı senaryoların simülasyonunu yapabilen akıllı yapılardır.**

Enerji yönetiminde dijital ikizler, yalnızca bugünkü performansı görmek için değil, **gelecekteki koşulları öngörmek, farklı senaryoları test etmek ve kararları en uygun şekilde vermek için** kullanılır. Örneğin; “Bu fabrikanın enerji tüketimi, üretim kapasitesi %20 artarsa nasıl etkilenir?” sorusunun yanıtı, dijital ikiz simülasyonları ile **yatırım yapmadan önce** görülebilir.

Dijital İkiz Teknolojisinin Enerji ve Sürdürülebilirlikte Kullanımı

a) Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dijital İkiz

- Güneş ve rüzgar enerji sistemleri gibi yenilenebilir kaynaklarda dijital ikizin adaptasyonu, sistem hatalarının önceden tespiti, sistem ömrünün uzatılması ve verimliliğin artırılması gibi faydalar sağlar.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1875875>

b) Akıllı Kent ve Yerel Yönetim Uygulamaları

- Dijital ikiz teknolojisi, kent yönetiminde altyapı planlaması, çevre ve enerji optimizasyonunda hatalı yatırım riskini azaltarak sürdürülebilir hizmetlere katkı sunar.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/4062040>

- Yerel yönetimlerde afet yönetimi ve hızlı müdahale süreçlerinde dijital ikiz sistemlerinin kullanımı, kaynak verimliliğine katkı sağlar.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4635889>

c) Mimarlık ve İnşaat Enerji Optimizasyonu

- Dijital ikizler, yapıların yaşam döngüsünde enerji optimizasyonu, öngörülebilir bakım ve sürdürülebilir yönetim süreçlerini destekleyerek maliyet ve çevresel performansı artırır.

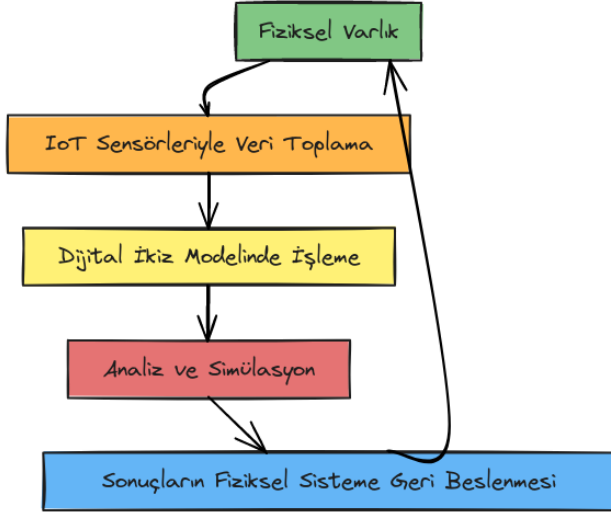
Kaynak: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens/issue/86399/1572660>

d) Tarihi Yapıların Sürdürülebilirliği

- Tarihi yapıların dijital ikiz teknolojileriyle modellenmesi (LIDAR, fotogrametri, IoT sensörler), restorasyon, enerji verimliliği, bakım ve turizm/tanıtım süreçlerinde önemli katkılar sağlar.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4648098>

4.2.1 Dijital İkiz Kavramı ve Çalışma Prensipleri



Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel bir sistemin yüksek doğrulukta dijital kopyasını oluşturur ve bu kopya ile gerçek sistem arasında iki yönlü dijital- fiziksel entegrasyon kurar.

Dijital ikiz;

- **Gerçek zamanlı veri ile güncellenir:** Sensörlerden, IoT cihazlarından ya da diğer izleme sistemlerinden alınan veriler dijital modele aktarılır,
- **Simülasyon ve analiz yapar:** Bu veriler ışığında sistemin davranışı sanal ortamda test edilir, olası sorunlar önceden tespit edilir,
- **Performansını optimize eder:** Enerji tüketimi azaltma ya da üretim verimliliğini artırma amaçlı senaryolar oluşturulur.

Dijital ikiz, sadece bir simülasyon değil; aynı zamanda gerçek sistemin dijital yansımasıdır. Örneğin, bir bina enerji yönetim dijital ikizi, HVAC sistemlerinin anlık performansını takip eder, hava kalitesi ve sıcaklık değişimlerine göre ayarlamalar yapar, enerji tasarrufu ve konfor arasında denge kurar.

4.2.1.1 Fiziksel-Dijital Entegrasyon Süreçleri

Fiziksel ve dijital dünyanın etkili entegrasyonu, dijital ikiz teknolojisinin en kritik kısmıdır. Bu entegrasyon şu aşamalardan oluşur:

a) Veri Altyapısı ve Sensörler

Fiziksel sistem, sıcaklık, elektrik tüketimi, üretim hızı, basınç gibi parametreleri ölçen sensörler ile donatılır. Bu sensörler önemli süreç bilgilerini anlık olarak dijital sisteme iletir.

b) Veri İşleme ve Modelleme

Toplanan veriler, dijital ikizin yapısında yer alan matematiksel modellerde işlenir. Bu modeller, sistem davranışını anlamak, tahmin etmek ve simüle etmek için kullanılır. Ayrıca, bu model gerçek sistemdeki değişimlere adapte olacak esneklikte olmalıdır.

c) İki Yönlü Senkronizasyon

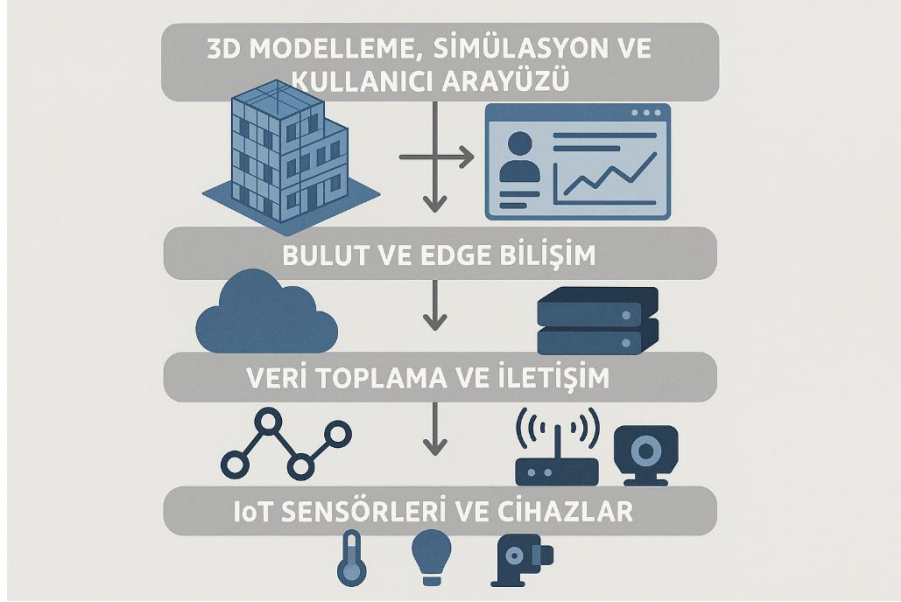
Dijital ikiz, aldığı verilerle güncellenir ve analiz larına göre gerçek sistemde kontrol ve müdahale yapılabilir. Örneğin, sıcaklık temelinde yapılan analiz sonrası HVAC sistemi otomatik olarak optimize edilir.

d) Optimizasyon ve Karar Destek

Modelin simülasyon yeteneği sayesinde farklı senaryolar test edilir; maliyet, enerji tasarrufu, konfor gibi kriterler karşılaştırılır. En uygun senaryo gerçek sistemde uygulanır.

4.2.1.2 Veri Akışı ve Gerçek Zamanlı Senkronizasyon

Dijital ikizlerde veri akışı ve senkronizasyon çok kritik bir rol oynar. Doğru, tam ve zamanında veri olmadan dijital ikiz kullanırsız hale gelir.



Bu nedenle;

- **Sürekli veri toplama:** Sensörlerden anlık veri alımı sağlanır,
- **Veri entegrasyonu:** Farklı kaynaklardan gelen ham veriler anlamlı bilgilere dönüştürülür (veri temizleme, ölçekleme),
- **Gerçek zamanlı güncelleme:** Dijital ikizin durumu sürekli olarak güncellenerek, gerçek sistem ile paralellik sağlanır,
- **Bildirim ve geri bildirim mekanizmaları:** Sistem operatörleri veya otomatik sistemler gerektiğinde alarma geçer, müdahale eder.

Bu süreçlerin verimli işlemesi için yüksek hızlı iletişim altyapıları, güçlü veri işleme algoritmaları ve güvenilir depolama sistemleri gereklidir.

Dijital İkiz Teknolojisi ile Gelen Avantajların Sistematik Analizi

Avantajlar	Açıklama	Örnek Uygulama / Kaynaklar
Gerçek Zamanlı İzleme	Enerji, sıcaklık, hava kalitesi gibi parametreler anlık takip edilir.	TU Wien'de sanayi tesisleri dijital ikizi
Performans Optimizasyonu	Modellerle farklı senaryolar simüle edilerek en uygun çalışma koşulları tespit edilir.	GE Vernova'nın enerji üretim dijital ikizleri
Arıza Tahmini ve Önleyici Bakım	Sistemlerde meydana gelecek arızalar önceden tahmin edilip bakım programları optimize edilir.	Siemens üretim tesislerinde dijital ikiz uygulamaları
Enerji ve Kaynak Tasarrufu	Sistemler enerji kullanımı optimize edilerek hem maliyet hem karbon emisyonu azaltılır.	Endüstri 4.0 enerji verimliliği projeleri
Karar Destek Sistemi	Yönetim, simülasyonlarına dayanarak daha bilinçli ve veri temelli kararlar alır.	Akademik çalışmalar ve sanayi uygulamaları

Dijital İkiz ile Geleneksel Simülasyona Karşılaştırma

Özellik	Geleneksel Simülasyon	Dijital İkiz
Veri Güncelliği	Genellikle statik, zaman zaman güncellenir	Sürekli ve gerçek zamanlı veri ile güncellenir
Fiziksel Sisteme Bağlılık	Bağımsız, gerçek sistemden ayrı	Fiziksel sistemle sürekli bağlantılı, senkron
Optimizasyon Yeteneği	Önceden tanımlı senaryolarla sınırlı	Dinamik, yeni verilere uyum sağlayarak optimize eder

Kullanım Alanı	Prototip oluşturma ve planlama	Operasyonel yönetim, arıza tahmini ve bakım
Operasyonel Müdahale	Sadece simülasyon	Otomatik ve manuel gerçek zamanlı müdahale imkanı

Örnekler ve Uygulama Alanları

- Enerji Verimli Endüstri Tesisleri: TU Wien’de geliştirilen dijital ikiz çerçevesi, fabrika ve bina enerji modellerini entegre ederek enerji-tüketim optimizasyonu yapıyor. Gerçek zamanlı veri akışıyla üretim süreçleri ve tesis yönetimi optimum seviyeye çekiliyor.

Kaynak: Gourlis, A., et al. "A holistic digital twin simulation framework for industrial facilities." *Frontiers in Built Environment*, 2022. <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2022.918821/full>

- Enerji Üretimi ve Dağıtımı: GE Vernova’nın dijital ikiz teknolojisi, enerji santrallerinin performansını simüle ederek bakım zamanlaması ve üretim optimizasyonu sağlar.

Kaynak: GE Vernova, Digital Twin Technology, 2025.
<https://www.gevernova.com/software/innovation/digital-twin-technology>

- Bina Enerji Yönetimi: Siemens’in dijital ikiz çözümleri, bina otomasyonu ve yönetimini ileri seviyeye taşıyarak enerji tasarrufu ve konforu artırır.

Kaynak: Siemens Digital Twin, 2025. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-twin.html>

- Sürdürülebilirlik ve Net Sıfır Projeleri: Dijital ikizler sayesinde yenilenebilir enerji üretim tesisleri operasyonel verimliliğe ulaşmakta, karbon ayak izi azaltılmaktadır.

Kaynak: Development and application of a digital twin model for Net zero

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824012866>

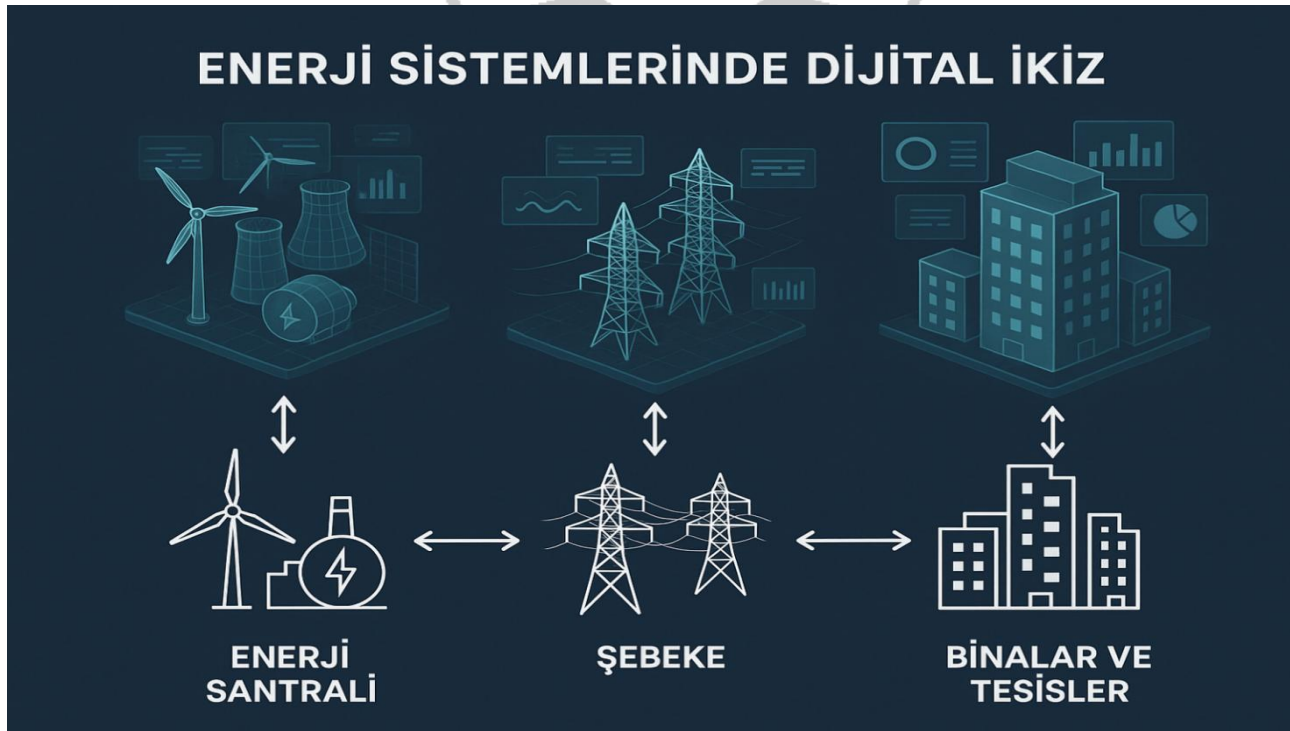
Dijital ikiz teknolojisi, enerji modelleme ve simülasyonun çok ötesinde, gerçek sistemle entegre, sürekli güncellenen ve optimize edilen dijital kopyalar yaratır. Bu teknoloji; enerji tüketiminin, üretiminin ve genel sistem performansının gerçek zamanlı yönetilmesini sağlar, bakım ve arıza süreçlerini önceden tahmin ederek maliyetleri düşürür, sürdürülebilirliği artırır. Fiziksel-dijital entegrasyon süreçleri, veri akışı ve gerçek zamanlı senkronizasyonun başarılı ve kesintisiz olması dijital ikizlerin başarısının temelidir.

Enerji sistemlerinde dijital ikiz uygulamaları, Endüstri 4.0 ve Enerji 4.0 paradigması içinde kritik bir yer tutmakta, dijital dönüşümün enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki en güçlü araçlarından biri olmaktadır.

4.2.2 Teknolojik Altyapı Gereksinimleri

Dijital ikiz teknolojisi, bir fiziksel varlığın veya sürecin dijital ortamda birebir modellenip yönetilmesini sağlar. Ancak bu teknolojinin başarılı olabilmesi için hem donanımsal hem de yazılımsal olarak güçlü bir teknolojik altyapıya ihtiyaç vardır.

4.2.2.1 3D Modelleme ve Simülasyon Araçları



Dijital ikizler, fiziksel sistemlerin dijitalde "canlandırılması" için 3D modelleme ve simülasyon yazılımlarına dayanır. Bu yazılımlar, süreçlerin karmaşıklığını anlamaya, çeşitli iyileştirme senaryoları denemeye ve karar destek sunmaya yarar.

3D Modelleme: Bir santralin, fabrikanın ya da bir rüzgar türbininin geometrik ve yapısal özelliklerinin eksiksiz dijital ortamda oluşturulması sürecidir. Örneğin, Akselos'un RB-FEA temelli yapısal ikizleri, büyük enerji altyapılarında detaylı analiz ve ömür uzatma hedefli olarak kullanılmaktadır. Bu sayede rüzgar türbinlerinde kritik hasar riski olan noktalar önceden tespit edilerek bakım stratejileri geliştirilebilmektedir.

Kaynak: Akselos – Structural Digital Twins ve Offshore Wind Uygulamaları <https://akselos.com/digital-twins-a-comprehensive-guide/>

Simülasyon: Enerji sistemlerinde, Ansys Twin Builder veya Simio gibi ileri düzey simülasyon platformlarıyla belirli operasyonel şartlar, arıza senaryoları veya enerji talep dalgalanmaları dijital ortamda test edilir. Böylece maliyetli ve riskli "gerçek" denemeler yapılmadan, sistemin nasıl tepki vereceği öngörülebilir.

Kaynak: Ansys – Digital Twin Simulation <https://www.ansys.com/products/digital-twin> Simio – Dijital İkiz Simülasyon Yazılımı <https://www.simio.com/>

Karmaşık Senaryo Analizi: Akıllı şebekelerde yenilenebilir enerji entegrasyonu veya toplu yük değişiklikleri gibi karmaşık koşullar simülasyon ortamında gerçek zamanlı test edilip en uygun yönetim stratejisi bulunabilir.

Kapsamlı Simülasyon Örneği: Offshore (deniz üstü) rüzgar çiftliklerinde, dijital ikizler 3D olarak tüm platformun, türbinlerin ve bağlantıların modellenmesini sağlar; bu sayede bakım ihtiyacı hem zamandan hem maliyetten büyük kazançlar getirir.

Kaynak: Akselos – Structural Digital Twins ve Offshore Wind Uygulamaları <https://akselos.com/digital-twins-a-comprehensive-guide/>

4.2.2.2 IoT Sensörlü Ağlar ve Veri Toplama Sistemleri

Dijital ikizlerin etkili biçimde çalışabilmesi için, gerçek dünya sisteminden sürekli, doğru ve kaliteli veri akışı gerekir. Bu akış, IoT (Nesnelerin İnterneti) sensörlü ağlarıyla sağlanır.

Akıllı Sensörler ve Ağlar: Enerji üretimi, tüketimi, sıcaklık, basınç, titreşim gibi parametreleri izleyen sensörler, mikro şebekeler ve endüstriyel süreçler üzerinde gerçek zamanlı veri sağlar. Bu sensörlerin oluşturduğu kablosuz

ağlar (örneğin Zigbee, LoRaWAN, 5G tabanlı haberleşme) büyük alanlarda düşük maliyetli ve verimli veri aktarımı sunar.

Kaynak: DergiPark – Mikro şebekelerde sensör ve IoT ağı kullanımı <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4425728>

Veri Toplama ve Ön İşleme: Toplanan veriler merkezi (bulut) ya da yerel (edge) platformlarda analiz için işlenir. Yapay zeka tabanlı algoritmalar bu verilerle öngörücü bakım, enerji talep analizi ve arıza tespitinde kullanılır.

Kaynak: Integrating sensor networks to facilitate efficient energy management for smart grids
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917424003696>

Otonom Karar ve Kontrol: Akıllı sensör ağları sadece veri aktarmakla kalmaz, aynı zamanda anormallikleri tespit edip otomatik müdahaleler için dijital ikiz modeline ani dönüş verileri iletebilir. Örneğin Japonya'daki Sendai mikro şebekesi, sensör verilerini kullanarak afetlere karşı hızlı yanıt verecek otonom enerji yönetimi sunar.

Kaynak: DergiPark – Mikro şebekelerde sensör ve IoT ağı kullanımı <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4425728>

4.2.2.3 Bulut Bilişim ve Uç (Edge) Bilişim Çözümleri

Veri miktarının ve sisteme bağlı cihaz sayısının hızla arttığı dijital ikiz uygulamalarında, verilerin hem hızlı hem de güvenli biçimde işlenip analiz edilmesi gerekir. Burada bulut ve uç bilişim (edge computing) teknolojileri öne çıkar.

Bulut Bilişim: Dijital ikizler için yüksek hesaplama gücü ve devasa veri depolama kapasiteleri gerektiğinde bulut platformları (ör. Microsoft Azure Digital Twins, Amazon Web Services IoT Core) çok geniş ölçekli analiz ve "her yerden erişim" sunar. Bulutta toplanan verilerle geçmişten bugüne eğilimler analiz edilebilir, çoklu tesis veya şehir bazında kıyaslamalar ve optimizasyon yapılabilir.

Kaynak: Microsoft Azure – Digital Twins Uygulama Platformu <https://azure.microsoft.com/en-us/products/digital-twins>

Uç Bilişim (Edge Computing): Kimi uygulamalarda verinin hızlı işlenmesi ve anlık geribildirim gerekliyse, veri kaynağına (yani sensöre) çok yakın, küçük, yerel bilgisayarlar (edge cihazları) kullanılır. Uç bilişim, büyük veri miktarlarının tamamını internete göndermek yerine, yerinde işleyerek hızlı reaksiyon, daha fazla veri mahremiyeti ve düşük gecikme sağlar. Örneğin, Almanya'daki bir enerji santralinde, anlık arıza tespiti ve müdahale sadece birkaç milisaniye içinde işlemlendiriliyor ve bulut bağlantısına gerek kalmıyor.

Kaynak: IoT For All – Edge-Enabled Digital Twins <https://www.iotforall.com/edge-enabled-digital-twins>

Dell Technologies – Edge Computing ve Dijital İkizler https://learning.dell.com/content/dam/dell-emc/documents/en-us/2023KS_Pande-Your_Digital_Twin_needs_Edge_Computing.pdf

Belden – Edge Computing ile Dijital İkiz <https://www.belden.com/blog/digital-twins-and-edge-computing-unite-to-drive-manufacturing-insights>

Çift Katmanlı Mimari: Modern sistemler genellikle hem bulut hem uç bilişim teknolojilerini birleştirir. Örneğin şehir genelinde tüm enerji altyapısı verisi bulutta analiz edilirken, acil arıza müdahalesi veya otonom kontrol uç bilişimle sağlanır.

Dijital İkiz Altyapısında Bulut vs. Uç (Edge) Bilişim

Özellik	Bulut Bilişim	Uç (Edge) Bilişim
İşlem Kapasitesi	Yüksek	Orta, kaynağa yakın hızda
Gecikme	Orta – Yüksek (ağ bağlantısına bağlı)	Çok düşük (anında işlem)
Güvenlik	Sağlayıcıya emanet, merkezi denetim	Yerel analiz, veri mahremiyeti yüksek
Maliyet	Ölçeklenebilir, uzun vadede ekonomik	İlk yatırımda daha maliyetli olabilir
Ölçeklenebilirlik	Çok yüksek	Yerel ölçekli, kolay yayılabilir
Uygulama Türü	Büyük veri analizleri, geçmiş trendler	Anlık kararlar, otonom müdahaleler

4.2.2.4 Dünya'dan Farklı Uygulama Örnekleri

Petrol & Gaz Sektörü: Birleşik Arap Emirlikleri'nde ADNOC'un akıllı petrol sahası projesinde, sahadaki tüm donanımların dijital ikizi oluşturuldu ve sensörler uç bilişimle gerçek zamanlı izlenip arıza hızla önleniyor. Büyük veri ise bulutta analiz edilerek saha genelinde stratejik planlamaya olanak tanıyor.

Kaynak: Dell Technologies – Edge Computing ve Dijital İkizler https://learning.dell.com/content/dam/dell-emc/documents/en-us/2023KS_Pande-Your_Digital_Twin_needs_Edge_Computing.pdf

Küresel Üretim: Simio ve Siemens; dünya genelinde otomotiv, lojistik ve ağır sanayide süreçlerin dijital ikizlerin nesnel, dijital simülasyona dönüştürülmesini sağlıyor. Soğuk zincir lojistiğinden hastane operasyonlarına kadar çeşitli süreçlerde, 3D model tabanlı analizler verimlilik ve kaynak kullanımı açısından önemli avantajlar sağladı.

Kaynak: Siemens – Digital Twin <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-twin.html>

Akıllı Şehirler: Çin'in Nanjing kentinde, enerji verimliliği ve hava kalitesi gibi kritik konular için IoT sensörlü ağlar, yapay zeka ile işlenip dijital ikizde simüle ediliyor; karar destek sistemleriyle şehir yönetimleri anlık optimizasyon yapabiliyor.

Kaynak: Springer – Edge Computing for Digital Twin https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-51819-5_4

4.2.2.5 Gelecek Perspektifi

Akademik çalışmalar, 3D modelleme, IoT tabanlı veri toplama ve gelişmiş bilişim mimarilerinin entegrasyonu sayesinde dijital ikizlerin enerji sistemlerinde öngörülü analiz, otonom müdahale ve sürdürülebilirlik açısından büyük değer yarattığını ortaya koyuyor. Özellikle yapay zeka ile desteklendiğinde, kaynak kullanımı ve bakım süreçlerinde de ciddi iyileşmeler sağlandığı vurgulanıyor.

Dijital ikizlerle enerji modelleme ve simülasyon uygulamaları, günümüz teknolojisinin sunduğu en gelişmiş altyapılardan birini gerektirir. 3D modelleme, gelişmiş simülasyon yazılımları, entegre IoT sensörlü veri ağları ve esnek bulut-kenar bilişim çözümlerinin bir araya gelmesiyle, işletmeler ve kamu kurumları hem maliyet avantajı, hem sürdürülebilirlik, hem de tamamen yeni bir operasyonel esneklik düzeyine ulaşırlar. Etkili ve ölçeklenebilir bir dijital ikiz altyapısı, enerji sektörünün gelecekteki rekabet ve verimlilik gereksinimlerini bugünden karşılamının anahtarıdır

4.2.3 Enerji Sistemlerinde Dijital İkiz Uygulamaları

Dijital ikiz teknolojileri enerji ve sürdürülebilirlik açısından çok sayıda fayda sunmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji santrallerinde (güneş, rüzgar vb.) dijital ikiz modelleri, sistem hatalarının erken tespitini sağlayarak bakım maliyetlerini düşürmekte ve verimliliği artırmaktadır (Kaynak: Dergipark, *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Dijital İkiz Uygulamaları*). Akıllı kent projelerinde dijital ikiz altyapıları, trafik yönetimi, çevresel izleme ve enerji dağıtımı gibi kritik hizmetlerde kaynak kullanımını optimize ederek sürdürülebilirliği desteklemektedir. Ayrıca mimarlık ve inşaat alanlarında dijital ikizler, binaların yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimini simüle ederek daha doğru planlama ve öngörülebilir bakım imkanı sağlamaktadır. Tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilir yönetimi için de LIDAR, fotogrametri ve IoT tabanlı dijital ikiz uygulamaları kullanılmakta; böylece hem kültürel miras korunmakta hem de enerji optimizasyonu mümkün hale gelmektedir.

4.2.3.1 Termik ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Dijital Modellenme

Dijital ikizler, termik (kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtlara dayalı) ve yenilenebilir enerji santrallerinin tüm bileşenlerini gerçek zamanlı ve detaylı bir şekilde modelleyerek performans izleme ve optimizasyon sağlar. Bu sayede, enerji üretim süreçleri dijital ortamda simüle edilir, potansiyel sorunlar tespit edilir ve verimlilik artırıcı önlemler geliştirilebilir.

- Termik santrallerde dijital ikiz: Yakma süreci, buhar üretimi, türbin ve jeneratör performansı gibi karmaşık fiziksel süreçler dijital ortamda modellenir. Örneğin, bir doğal gaz santralinde, dijital ikiz cihaz çalışmasını ve emisyon değerlerini optimize ederek zamanında performans düşüşlerini ve arızaları önceden öngörebilir. Arıza kaynaklı duruş sürelerinde **%20'ye varan azalma**

Kaynak: *Energy Systems Digitalization Report*, IEA, 2022 <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>.

- Yenilenebilir santrallerde dijital ikiz: Güneş enerjisi panellerinin verimliliği, rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansı gibi değişken faktörler dijital ikizle izlenebilir. Örneğin rüzgar türbinlerinin dijital ikizleri, rüzgar hızı ve yönüne göre türbin kanat açısını optimize ederek enerji üretimini en üst düzeye çıkarabilir.

Örnek: Birleşik Arap Emirlikleri'nde ADNOC petrol sahasındaki dijital ikiz uygulaması, hem yenilenebilir hem fosil yakıt kaynaklı sistemleri entegre edip enerji üretim sürecine dair gerçek zamanlı modelleme yapabiliyor. Bu, enerji üretiminde kesintileri azaltırken genel verimliliği artırıyor.

Kaynak: Ono Teknoloji - Dijital İkizler ile Enerji Verimliliğini Nasıl Artırabilirsiniz? (2024) <https://ono.com.tr/dijital-ikizler-ile-enerji-verimlilikini-nasil-artirabilirsiniz/>

4.2.3.2 Türbin Performansı ve Verimlilik Optimizasyonu

Türbinler, enerji santrallerinin kalbidir. Dijital ikizler, türbinlerin çalışma koşullarını ve performansını sürekli takip edip analiz ederek;

- Verimliliği artırmak,
- Enerji kayıplarını minimize etmek,
- Aşınma ve yıpranmayı önceden tespit etmek,
- Bakım planlamasını optimize etmek

gibi pek çok fayda sağlar.

Nasıl İşler?

- Dijital ikiz, türbinin özelliklerini ve çevresel faktörleri (rüzgar hızı, sıcaklık, nem) dikkate alarak sanal modeller oluşturur.
- Bu modellerde farklı çalışma senaryoları simüle edilerek en enerji verimli ayarlar belirlenir.
- Sensörlerden gelen gerçek zamanlı verilere dayanarak erken arıza uyarıları verir.

Bu yöntemle, örneğin, türbin kanatlarının temizliği veya yağlama ihtiyaçları önceden belirlenir ve plansız duruşlar önlenir. Ayrıca, enerji üretim performansı üst düzeyde tutulur.

Örnek: Danimarka'da faaliyet gösteren bir rüzgar enerjisi şirketi, dijital ikiz ile türbin kanatlarının aerodinamik davranışını simüle ederek yıllık enerji üretiminde %5-7 artış sağladı.

Kaynak: Rüzgar Enerjisi Verimliliğinin Artırılması ve Simülasyonunda Etkisinin İncelenmesi

<https://dergipark.org.tr/en/pub/umagd/issue/82949/1345819>

4.2.3.3 Tahmine Dayalı Bakım Sistemleri

Dijital ikizlerin en önemli uygulamalarından biri de tahmine dayalı bakım (Predictive Maintenance) sistemleridir. Geleneksel bakım yöntemlerinde arıza sonrası onarım yapılırken, tahmine dayalı bakım ile arıza olasılığı yüksek ekipmanlar önceden belirlenip zamanında müdahale edilir.

- Dijital ikiz, ekipmanın çalışma parametrelerini sürekli izler ve büyük veri ile yapay zeka algoritmaları kullanarak arıza olasılıklarını tahmin eder.
- Böylece bakım planlaması optimize edilir, gereksiz bakımlar azaltılır ve ekipmanın kullanım ömrü uzar.

- Bu sistem, enerji santrallerinde planlı duruş süresini düşürerek üretim kapasitesinin artırılmasına da katkı sağlar.

Örnek: Almanya’da büyük ölçekli bir termik santralde dijital ikiz teknolojisiyle tahmine dayalı bakım uygulanmakta olup, bakım maliyetlerinde %20’ye varan düşüş ve operasyonel verimlilikte belirgin artış kaydedilmiştir.

Kaynak: KESTİRİMCİ BAKIM TEKNOLOJİLERİ

https://www.duvaryayinlari.com/Webkontrol/IcerikYonetimi/Dosyalar/kestirimci-bakim-teknolojileri_icerik_g4054_MgDCb6Rh.pdf

Journal of Energy Engineering (2021) çalışmasına göre, dijital ikiz tabanlı bakım uygulamaları santrallerde bakım maliyetlerini %15–25 azaltırken, ekipman ömrünü ortalama %20 artırıyor.

Kaynak: <https://ascelibrary.org/journal/jleed9>

Dijital İkizlerin Enerji Santrallerine Sağladığı Diğer Katkıları

Katkı	Açıklama	Örnek / Kaynak
Verimlilik Artışı	Sürekli veri analizi ve optimizasyon ile enerji üretimi artırılır.	GE Vernova dijital ikiz çözümleri
Maliyet Azaltımı	Arıza süreleri ve bakım maliyetleri azalır.	Siemens santral bakımı
Enerji Kaybı ve Emisyon Azaltımı	Sistem optimizasyonu ile enerji kayıpları minimuma iner, karbon emisyonları düşer.	Yenader raporu
Operasyonel Esneklik	Farklı senaryolar simüle edilerek ani enerji talebi değişimlerine hızlı yanıt verilir.	Malta tam akıllı şebeke
Uzaktan İzleme ve Kontrol	Dijital ikiz operatörlere santrali her yerden kontrol etme imkanı sunar.	TÜBİTAK destekli projeler

4.2.3.4 Dünya Geneline Dijital İkizlerin Güç Santrallerindeki Uygulama Örnekleri

- GE Vernova, ABD:** Enerji santrallerinde dijital ikizler kullanılarak üretim verimliliği ve ekipman performansı artırılmakta, tahmine dayalı bakım modelleri ile kesinti süreleri azaltılmaktadır.

- **Sendai Mikro Şebekesi, Japonya:** Enerji üretim ve tüketim verilerinin dijital ikiz modeli gerçek zamanlı izlenip, ani ihtiyaçlara göre optimizasyon yapılmaktadır.
- **ADNOC, BAE:** Akıllı petrol sahasında dijital ikiz teknolojisi, saha ekipmanlarının performans takibini ve enerji yönetimini sürdürülebilir kılmaktadır.
- **Danimarka Rüzgar Enerjisi:** Türbinlerin dijital ikizleri aerodinamiği simüle eder, bakım ihtiyaçlarını öngörür ve performansı maksimize eder.

Dijital İkizlerle Enerji Santrallerinde Gelecek

Dijital ikizler, enerji santrallerinde performans takibi, üretim optimizasyonu ve arıza öncesi bakım gibi kritik işlevleri gerçek zamanlı ve veri odaklı gerçekleştiren güçlü araçlardır. Termik ve yenilenebilir enerji santrallerinin karmaşık çalışma koşulları, dijital ikiz teknolojisi sayesinde daha etkin yönetilir; enerji üretim maliyetleri düşerken verimlilik ve sürdürülebilirlik artar.

Tahmine dayalı bakım ile plansız duruşlar minimize edilerek santrallerin ömrü uzatılırken, daha temiz ve çevreci enerji üretimi mümkün olur. Dijital ikizlerin sunduğu simülasyon ve gerçek zamanlı izleme olanakları, enerji sektöründe dijital dönüşümün ve Endüstri 4.0 paradigmasının vazgeçilmez bir parçasıdır.

4.2.3.5 Elektrik Şebekeleri ve Dağıtım Ağları

Akıllı Şebeke Modelleri, Yük Durumu ve Arıza Yönetimi

Enerji sistemlerinde dijital dönüşümün en kritik ayağı olan akıllı elektrik şebekeleri ve dağıtım ağları; enerji arz ve talebinin dengelenmesi, kayıpların azaltılması, arızaların hızlı tespiti gibi karmaşık sorunlara kesintisiz ve verimli çözümler üretebilmek için dijital ikiz teknolojisini giderek daha fazla kullanmaktadır.

1. Akıllı Şebeke Dijital İkiz Modelleri: Temel Kavramlar ve İşleyiş

Dijital ikizler elektrik şebekelerinin dijital yansımalarıdır. Fiziksel güç ağlarındaki üretim, iletim, dağıtım sistemleri ve kullanıcı uç noktalarının dijital kopyası olarak; gerçek zamanlı veri akışına bağlı olarak çalışır, analiz yapar ve karar destek sistemleri sağlar.

- **Fiziksel ve dijital entegrasyon:** Sensörler, sayaçlar ve IoT cihazları gerçek elektrik şebekesinden anlık veri alırken, dijital ikizler bu verilerle şebekenin tüm bileşenlerinin durumunu yansıtır ve senkronize eder.
- **Simülasyon ve tahmin:** Dijital modeller üzerindeki testler ve senaryolar ile şebeke üzerindeki farklı yük durumları ve stresler deneyimlenebilir; riskler önceden görülebilir.

- **Karar desteği ve otomasyon:** Operatörlere canlı görselleştirme sunar; yapay zeka destekli analizlerle ağı optimum çalışma koşulları tanımlar.

Örneğin, Vodafone İngiltere'nin geliştirdiği 245.000 km²'lik dijital ikiz, ülkenin tüm enerji altyapısının dijital kopyasını kullanarak, kesintileri ve yük değişimlerini yönetiyor.

Kaynak: Vodafone UK, Elektrik Şebekeleri Dijital İkiz Projesi, 2025
<https://www.vodafone.com/news/technology/vodafone-mobile-network-digital-twin>

Neden Dijital İkiz?

- Daha az kayıp (enerji, zaman)
- Yüksek şebeke kararlılığı
- Uzaktan ve hızlı müdahale imkanı
- İşletme maliyetlerinde düşüş

2. Yük Durumu ve Şebeke Optimizasyonu

Yük yönetimi, elektrik şebekelerinin en karmaşık ve kritik bölümlerindendir. Talep ile üretim arasındaki dengenin sağlanması, aşırı yüklenmelerin önlenmesi ve kaynakların etkin kullanımı gerekir.

- **Yük Durumu İzleme:** Dijital ikizler, şebeke üzerindeki tüm noktalardaki elektrik tüketimini ve üretimini anlık olarak izler.
- **Talep Tahmini:** Yapay zeka ve büyük veri analitiği ile gelecekteki tüketim desenleri öngörülür ve üretim buna göre planlanır.
- **Enerji Akış Optimizasyonu:** Akıllı algoritmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek, elektrik akışını en verimli şekilde yönlendirir.
- **Dinamik Yük Dengeleme:** Şebeke üzerinde anlık aşırı yüklenmeler tespit edilip, otomatik olarak yük kaydırma (load shifting) gerçekleştirir.

Örnek Uygulama:

Almanya'nın E-Energy girişimi kapsamında geliştirilmiş akıllı şebeke dijital ikiz modelleri, özellikle yenilenebilir enerji dalgalanmalarına karşı gerçek zamanlı yük yönetimi yapabilmektedir. Bu model, tüketiciden üreticiye kadar şebekedeki tüm aktörlerin etkileşimini simüle ederek enerji arz-talep dengesini optimize eder.

Kaynak: Almanya E-Energy Projesi Teknik Raporları <https://en.wikipedia.org/wiki/Energiewende>

3. Arıza Tespiti ve Müdahale Planlaması

Elektrik şebekelerinde arıza tespiti ve müdahale, şebeke güvenliği ve sürekliliği için kritik önemdedir. Dijital ikizler bu süreçleri daha hızlı ve etkili hale getirir.

- **Gerçek Zamanlı Arıza Tespiti:** Sensörler aracılığıyla anormal durumlar (akım dalgalanmaları, gerilim düşüşleri, hat kesilmesi gibi) çok hızlı biçimde tespit edilir.
- **Kök Neden Analizi:** Dijital modeller ile arızanın kaynağı simüle edilerek, olası nedenler hızlıca belirlenir.
- **Müdahale Optimizasyonu:** Müdahale ekipleri için en uygun rota ve müdahale planı dijital ikiz üzerinden hazırlanabilir.
- **Kesinti Süresi Azaltma:** Otomatik anahtarlama ve yedekleme sistemleriyle kesinti süresi minimuma indirilir.

Örnekler:

- **Çin’de Yingtang şehri:** Dijital ikizle desteklenen geniş kapsamlı akıllı şehir şebekesinde arızalar anlık olarak tespit edilip en hızlı müdahale sağlanmaktadır.
- **Singapur Ulusal Akıllı Enerji Programı:** Arıza ve kesinti senaryoları dijital ikiz üzerinde test edilerek, kritik elektrik altyapısında müdahale süreleri %30 azaltılmıştır.

Kaynak: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Uygulamalı Dijital İkiz Örnekleri ve Akıllı Şebeke Projeleri, 2024 <https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/fizibilite-rapor/36-Ula%C5%9F%C4%B1mda%20Sanal%20%C4%B0kiz%20ve%20Sim%C3%BClasyonu.pdf>

Dijital İkizlerin Elektrik Şebekelerinde Sağladığı Temel Faydalar

Faydalar	Açıklama
Enerji Kaybının Azaltılması	Şebeke üzerindeki kaçaklar ve aşırı tüketimin gerçek zamanlı tespiti
Şebeke Güvenilirliği ve Stabilitesi	Akıllı yük yönetimi ile aşırı yüklenmelerin önlenmesi
Kesintilerin Hızlı Tespiti ve Onarımı	Dijital ikizle arıza noktalarının tespiti ve müdahale yollarının planlanması
Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	Dalgalanan yenilenebilir kaynakların şebeke optimizasyonu
Uzaktan Yönetim ve Merkezi Kontrol	Şebekenin bütüncül olarak uzaktan izlenmesi ve yönetilmesi

Dijital İkiz ile Geleneksel Yöntem Karşılaştırması

Özellik	Geleneksel Şebeke Yönetimi	Dijital İkiz Destekli Akıllı Şebeke
İzleme Süresi	Periyodik, manuel veri toplama	Gerçek zamanlı, otomatik veri entegrasyonu
Arıza Tespiti	Gecikmeli, genellikle fiziksel kontrol sonrası	Anında tespit ve otomatik uyarı
Yük Yönetimi	Statik, tahmine dayalı planlama	Dinamik, AI destekli optimizasyon
Müdahale Planlaması	Deneyim ve geçmişe dayalı	Veri ve simülasyon destekli en uygun müdahale rotası
Yenilenebilir Kaynak Yönetimi	Entegre edilmesi zor, manuel ayar	Anlık yük ve üretim dengesiyle entegre
Karbon Ayak İzi Azaltımı	Sınırlı, dolaylı etkiler	Doğrudan optimizasyon ve verimlilik artışıyla hızlı etkiler

4. Geleceğe Bakış ve Türkiye’de Dijital İkiz Uygulamaları

Türkiye, dijitalleşme ve akıllı şebeke projelerinde hem kamu hem özel sektör yatırımlarıyla hızla ilerlemekte. TÜBİTAK ve Enerji Bakanlığı’nın desteklediği projelerle dijital ikiz teknolojileri pilot şebekelerde denenmekte ve şehir dağıtım sistemlerinde uygulanmaktadır. Örneğin İzmir’de ve Ankara’da pilot akıllı şebeke sistemleri dijital ikiz destekli arıza tespiti ve yük yönetimi ile hem tüketici hem üretici tarafında verimlilik artışı sağlamaktadır.

Kaynak: İzmir’in dijital ikizi geliyor <https://www.izmir.bel.tr/tr/Haberler/izmir-in-dijital-ikizi-geliyor/56234/156>

Ankara Büyükşehir Belediyesi’nin 2025-2029 Stratejik Planı içinde “Dijital İkiz Projesi”

<https://s.ankara.bel.tr/files/2025/02/03/7c51bb8e47cc1ae7dba19d0c0c7d16af.pdf>

Elektrik şebekeleri ve dağıtım ağlarında dijital ikizler, gerçek zamanlı veri toplama, simülasyon ve gelişmiş analiz yetenekleri ile enerji arz-talep dengesinin sürekli, güvenilir ve çevreci biçimde yönetilmesini sağlar. Akıllı şebeke dijital ikiz modelleri, yük yönetimi optimizasyonu ve arıza müdahale planlaması şebeke sürekliliği ve verimliliği için hayati önemdedir. Türkiye ve dünya örnekleri, bu teknolojinin enerji ekosisteminde dönüşümün merkezinde olduğunu göstermektedir.

4.2.4 Bina ve Tesis Enerji Modellemesi



4.2.4.1 Akıllı Bina Dijital İkizleri ve Enerji Verimliliği

Dijital ikiz teknolojisi, binaların ve tesislerin enerji tüketimini optimize etmek için önemli fırsatlar sunar. Akıllı bina dijital ikizleri sayesinde, HVAC (Isıtma, Havalandırma ve Klima) sistemleri, aydınlatma ve çevre kontrol sistemleri sanal ortamda modellenir, gerçek zamanlı verilerle güncellenir ve enerji tasarrufu ile kullanıcı konforu dengelenir. Bu yaklaşım, enerji yönetimini klasik yöntemlerin çok ötesine taşırken, bina işletme maliyetlerini azaltır ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunur.

1. Akıllı Bina Dijital İkizlerinin Temel İşlevleri

Bir akıllı bina dijital ikizi, fiziksel binanın üç boyutlu (3D) dijital modeli ile bina içindeki tüm enerji tüketim noktalarının ve sistemlerin gerçek zamanlı simülasyonunu sağlar. Bu dijital temsil;

- Gerçek zamanlı sensor verileri ile güncellenir,

- HVAC ve aydınlatma sistemlerinin performansını izler,
- Enerji tüketimi ile kullanıcı konforu arasındaki dengeyi optimize eder,
- Farklı senaryolar simüle edilerek tasarruf ve konfor stratejileri test edilir.

Bu teknoloji, bina yönetim sistemlerinin (BMS) ötesinde kapsamlı ve dinamik bir yapıyı temsil eder. Enerji kullanımı ve mekan içi koşullar arasındaki etkileşimler daha detaylı şekilde değerlendirilerek müdahale ve planlama yapılabilir.

2. HVAC Sistem Programı ve Enerji Verimliliği

HVAC sistemleri, bir binadaki toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturur. Dijital ikizler, bu sistemlerin enerji verimliliğini artırmak için şu işlevleri üstlenir:

- **Sistem Analizi ve Modelleme:** Dijital ikiz, ısıtma, soğutma ve havalandırma ekipmanlarının performansını detaylı şekilde simüle eder. Bu, sensörlerden aldığı sıcaklık, nem ve hava kalitesi verileriyle sürekli güncellenir.
- **Enerji Tüketim Optimizasyonu:** HVAC sistemlerinin çalışma programı dış hava koşullarına, bina doluluk oranına ve kullanıcı tercihleri göre otomatik ayarlanır. Örneğin, bir ofis binasında çalışma saatleri dışında ısıtma ve soğutma minimize edilir.
- **Proaktif Bakım ve Arıza Öngörüsü:** Sistem performansındaki anormallikler tespit edilerek bakım zamanları optimize edilir. Bu sayede hem enerji tüketimi düşer hem de ekipman ömrü uzar.
- **Simülasyon Bazlı Senaryolar:** Farklı sıcaklık ayarlarının enerji ve konfor üzerindeki etkileri simüle edilir, en uygun programlama belirlenir.

Örnek: Hollanda'daki bir ticari bina, dijital ikizle HVAC sistemi optimizasyonu sonucunda %18 enerji tasarrufu sağladı ve sistem arızalarında %25 azalma gerçekleşti.

Kaynak: <https://filelist.tudelft.nl/Websections/Urban%20Energy/Projects/Report%20IEBB%20Thema%202%20-%20activity%201.4%20-%20final.pdf>

3. Aydınlatma ve Çevre Kontrol Sistemleri

Binalarda enerji tüketiminde aydınlatmanın da etkisi büyüktür. Dijital ikiz teknolojisi aydınlatma ve iç çevre kontrol sistemlerinde şu katkıları sağlar:

- **Doğal Işık ve Yapay Aydınlatma Dengelemesi:** Işık sensörleriyle dış ışık seviyeleri ölçülür, yapay aydınlatma ihtiyacı buna göre otomatik ayarlanır. Bu, gereksiz elektrik kullanımını önler.

- **Uyarlanabilir Işıklandırma:** Çalışan hareketleri ve alan doluluğu dijital ikizle izlenerek, boş alanlarda ışık kapatılır, böylece enerji tüketimi azaltılır.
- **Çevre Koşullarının Kontrolü:** Nem, sıcaklık, hava kalitesi sensör verileriyle entegre edilen dijital ikiz, ortam koşullarının optimum konfor seviyesinde tutulmasını sağlar.
- **Enerji İzleme ve Analizi:** Aydınlatma sistemlerinin anlık enerji tüketimi izlenir, verimsiz ışıklandırma noktaları tespit edilip düzeltilir.

4. Kullanıcı Konfor Analizi ve Enerji Tüketiminin Dengelenmesi

Enerji verimliliği ile kullanıcı konforunun dengelenmesi, bina yönetiminde temel hedeflerden biridir. Dijital ikizler burada şu şekilde rol oynar:

- **Konfor Verilerinin Toplanması:** Binadaki sıcaklık, nem, hava kalitesi ve kişi yoğunluğu gibi konfor kriterleri sensörlerle takip edilir.
- **Bireyselleştirilmiş Konfor Modelleri:** Dijital ikiz, kullanıcı tercihlerini öğrenerek farklı alanlar için optimize edilmiş ayarlamalar yapabilir.
- **Enerji Kullanımının Konfor ile Uyumu:** Çok düşük enerji tüketimi konfora zarar verebileceğinden, dijital ikiz enerji ve konfor arasında optimum dengeyi sağlayan çözümler önerir.
- **Anket ve Veri Analizi Entegrasyonu:** Kullanıcı memnuniyeti anketleri ve sensör verileri entegre edilerek model doğruluğu artırılır.

Geleneksel Bina Yönetimi vs Dijital İkiz Destekli Akıllı Bina

Özellik	Geleneksel Bina Yönetimi	Dijital İkiz Destekli Akıllı Bina
HVAC Optimizasyonu	Sabit program, manuel ayarlamalar	Gerçek zamanlı veri ve otomatik optimizasyon
Aydınlatma Kontrolü	Zaman programlı, hareket sensörsüz	Sensör ve doluluk verisiyle dinamik ışık yönetimi
Enerji Tüketim İzleme	Periyodik, sınırlı veri	Anlık ve kapsamlı veri takibi
Kullanıcı Konfor Yönetimi	Genel ısıtma/soğutma, sabit konfor ayarları	Bölgesel, kullanıcı tercihlerine göre kişiselleştirilmiş

Bakım ve Arıza Yönetimi	Arıza sonrası müdahale	Öngörücü bakım ve gerçek zamanlı arıza tespiti
Enerji Verimliliği	Tipik bina standartları (düşük verimlilik)	%15-25 arası enerji tasarrufu

Bina ve tesis enerji modellemesinde dijital ikiz teknolojisi, hem kullanıcı konforunu optimize eden hem de enerji tüketimini azaltan devrimci bir yaklaşımdır. HVAC sistemlerinin otomatik ve esnek programlanması, aydınlatma ve çevre kontrol çözümlerinin anlık verilerle yönetilmesi, kullanıcı ihtiyaçlarının dijital olarak modellenmesi ile hem enerji verimliliği hem de yaşam kalitesi artar. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak dijital ikizler, bina yönetimini dinamik, veri odaklı ve sürdürülebilir kılarak gelecek akıllı binalarının temel taşı oluşturur.

Bu teknolojiyle binalar sadece yapılar değil, yaşayan, öğrenen ve kendi performansını optimize eden sistemler haline gelir.

4.2.4.2 Endüstriyel Tesis Modelleme

Üretim Süreçleri, Ekipman Performansı ve Süreç Optimizasyonu

Dijital ikiz teknolojisi, endüstriyel tesislerde üretim süreçlerinin, enerji tüketiminin, ekipman performansının ve yaşam döngüsünün detaylı analizi ile süreç optimizasyonunun sağlanmasında güçlü bir araçtır. Bu kapsamlı dijital modelleme, gerçek tesislerin sanal kopyalarını oluşturmak ve bu kopya üzerinden üretkenliği artırmak, kaynak kullanımını azaltmak ve sürdürülebilirliği geliştirmek üzere kullanılır.

1. Üretim Süreçleri ve Enerji Tüketimi Analizi

Endüstriyel tesislerde üretim süreçleri karmaşık ve çok aşamalıdır. Dijital ikizler, bu süreçlerin her aşamasını gerçek zamanlı veya önceden tanımlanmış senaryolarla detaylıca simüle eder. Bu sayede:

- **Enerji tüketim profilleri çıkarılır:** Hangi süreçler, hangi makineler ve ne kadar enerji harcıyor tam olarak görünür hale gelir.
- **Enerji yoğun noktalar tespit edilir:** Daha fazla enerji harcayan makineler veya verimsiz prosesler belirlenir.
- **İyileştirme senaryoları test edilir:** Simülasyon ortamında çeşitli optimizasyon senaryoları denenerek en verimli yöntem seçilir.

Örnek: Sakarya Üniversitesi ve yerli yazılım firmalarının işbirliğiyle geliştirilen bir dijital ikiz modeli, otomotiv yan sanayi tesisinde tedarik zinciri ve üretim hatlarının enerji tüketim analizini gerçekleştirmiştir. Bu model, enerji tüketimini %18 azaltan ve üretim kesintilerini düşüren optimizasyonları öngörmüştür.

Kaynak: ESNEK İMALAT HÜCRELERİNİN DİJİTAL İKİZ MODELLEMESİ

<https://acikerisim.sakarya.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12619/101794/T10785.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2. Ekipman Performansı ve Yaşam Döngüsü Yönetimi

Ekipmanların performans takibi sadece anlık enerji tüketimi değil, aynı zamanda onların kullanım süresi, aşınma durumu ve ömrünü de içerir. Dijital ikiz teknolojisi şunları sağlar:

- **Performans izleme:** Her makinenin çalışma durumu ve performansı detaylı olarak modelde yer alır.
- **Arıza tahmini:** Sensör verileri ve geçmiş kullanım bilgileri ile yapay zeka destekli tahmine dayalı bakım yapılabilir.
- **Yaşam döngüsü yönetimi:** Ekipmanın kaç yıl ve hangi koşullarda verimli çalışabileceği simüle edilip planlama yapılır.
- **Kaynak planlaması:** Yedek parça ve bakım zamanlaması optimize edilerek maliyetler düşürülür.

Örnek: Almanya'da otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir tesis, dijital ikiz sayesinde kritik robot ekipmanlarının bakım gereksinimlerini %30 daha erken tespit ederek planlı duruş sürelerini %25 azaltmıştır.

Kaynak: Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1234484>

3. Süreç Optimizasyonu ve Verimliliği Artırma Stratejileri

Dijital ikiz kullanılarak süreç optimizasyonu için farklı stratejiler uygulanır:

- **Yerleşim optimizasyonu:** Üretim tesisinde ekipman, malzeme ve işçi hareketleri analiz edilerek en uygun yerleşim düzeni belirlenir.
- **Kaynak kullanımının en iyi hale getirilmesi:** Malzeme akışı, enerji tüketimi ve zaman kullanımı dengelenir; gereksiz hareketler ve beklemeler önlenir.
- **Senaryo bazlı simülasyon:** Farklı üretim senaryoları, talep değişiklikleri veya ekipman arızaları simüle edilerek esnek planlama yapılır.
- **Yapay zeka ve makine öğrenmesi:** Sürekli veri analizi ile süreçler optimize edilir, hatalar en aza indirilir ve otomatik karar destek sistemleri devreye girer.

Gerçekçi Uygulama: Çin'de bir elektronik üretim tesisinde dijital ikiz destekli proses optimizasyonu sağlanmış, üretim döngüsü %18 kısılırken enerji verimliliği %22 iyileştirilmiştir.

Kaynak: Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e doğru : akıllı tesis yönetimini etkinleştirme

<https://acikerisim.msgsu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.14124/5405>

Geleneksel Üretim Yönetimi ve Dijital İkiz Destekli Yönetim

Özellik	Geleneksel Yönetim	Dijital İkiz Destekli Yönetim
Üretim Süreç İzleme	Sınırlı, manuel veri toplama	Gerçek zamanlı, otomatik ve yüksek çözünürlükte
Enerji Tüketimi Analizi	Periyodik ve genelleştirilmiş	Detaylı, aşama ve ekipman bazlı anlık analiz
Ekipman Performans Takibi	Arıza sonrası müdahale	Tahmine dayalı bakım ve sürekli performans izleme
Süreç Optimizasyonu	Deneyim ve geçmiş verilere dayalı	Çoklu senaryo simülasyonları ve yapay zeka destekli
Kaynak Kullanımı	İzleme sınırlı, atık yüksek	Verimli kaynak kullanımı, atık ve beklemler minimize
Karar Destek	İnsan tecrübesine bağlı	Veri odaklı, otomatik karar destek sistemleri

4. Örnek Çalışmalar

- Dijital ikizlerin otomotiv montaj hatlarındaki uygulamasında, üretim süresi %15 kısılırken enerji tüketiminde %12 azalma rapor etmiştir.

Kaynak: İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ

<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1918969>

- Depo yerleşim optimizasyonu ve üretim süreçlerinde dijital ikiz benzetimleriyle malzeme taşıma süresinde %20 azalma sağladıklarını sunmuştur.

Kaynak: DİJİTAL İKİZ: AKILLI FABRİKALARA GİDEN YOL

https://www.emo.org.tr/ekler/abd8ea0885639b5_ek.pdf

- Çok uluslu firmalar Siemens ve GE, endüstriyel tesislerde dijital ikiz uygulamalarıyla bakım süreçlerini optimize edip operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Kaynak: <https://www.siemens.com/tr/tr/sirket/donusturen-hikayeler/endustri/dijital-ikiz.html>

Farklı Sektörlerde Dijital İkiz Uygulama Örnekleri

Sektör	Uygulama Alanı	Başarı Ölçütü ve lar
Otomotiv	Montaj hattı ve robotik sistemler	Üretkenlik +15%, enerji tüketimi -12%
Elektronik	Üretim hattı süreç optimizasyonu	Döngü süresi -18%, enerji verimliliği +22%
Depolama ve Lojistik	Yerleşim optimizasyonu	Malzeme taşıma süresi -20%, verimlilik +15%
Ağır Endüstri	Ekipman performans ve bakım	Bakım maliyeti -25%, plansız duruş süresi -30%

Dijital ikizlerin endüstriyel tesislerde üretim süreç modeli, enerji tüketimi analizi, ekipman performansı ve yaşam döngüsü yönetimi ile süreç optimizasyonu konularındaki uygulamaları, işletmelerin daha verimli, sürdürülebilir ve rekabetçi olmasını sağlar. Dijital ikiz sayesinde üretim hatları, ekipmanlar ve enerji kullanımı birbirleriyle entegre yönetilir, olası sorunlar önceden görünür ve hızlı müdahale ile maliyetler düşürülür.

Özellikle gerçekçi veri temelli modeller ve çoklu senaryo analizleri ile süreç iyileştirme stratejileri belirlenir ve riskler minimize edilir. Türkiye ve dünyadan birçok pilot ve uygulama örneği, dijital ikiz teknolojisinin endüstriyel verimlilikte devrim yarattığını göstermektedir.

4.2.4.3 Simülasyon ve Optimizasyon Süreçleri

Enerji sistemlerinde dijital ikizler, fiziksel varlıkların dijital kopyaları olarak gerçek zamanlı veri akışıyla beslenen simülasyonlar yapar; böylece sistemlerin izlenmesi, tahmin edilen senaryoların değerlendirilmesi, karar destek mekanizmalarının devreye alınması ve operasyonel optimizasyon gerçekleşir. Bu süreçler hem maliyetleri ciddi biçimde düşürür hem enerji verimliliğini artırır.

1. Senaryo Analizi ve Tahmin Modelleri

1.1. "Varsayım(What-if)" Modelleri

Senaryo analizi, farklı gelecekteki koşulların veya değişkenlerin etkilerini öngörmek için yapılan testlerdir. Dijital ikizler "Varsayım" sayesinde, çeşitli parametre değişikliklerinin sistem üzerindeki etkilerini önceden

deneyimleyebilir. Bu, gerçek dünyada maliyetli veya riskli denemeler yapmak yerine, dijital ortamda güvenli bir şekilde alternatiflerin karşılaştırılmasına olanak sağlar.

Örnek Senaryolar:

- Enerji talebindeki ani artış veya azalışın sistem performansına etkisi.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş/rüzgar) sağlanan elektrik miktarındaki değişim.
- Arıza durumlarının yaygınlaştırılması ve müdahale stratejilerinin test edilmesi.

Örnek: Almanya'daki Fraunhofer Enstitüsü, enerji şebekelerinin dijital ikizi ile farklı yenilenebilir entegrasyon senaryoları test edilmektedir. Bu testler, şebeke stabilitesi üzerindeki etkileri değerlendirip en iyi dengeleme stratejilerini ortaya koyar.

Kaynak: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/rd-infrastructure/center/center-for-power-electronics-and-sustainable-grids/digital-grid-lab.html>

1.2. Tahmin Modelleri

Tahmin ya da öngörü modelleri, geçmiş ve gerçek zamanlı verilerden hareketle gelecekteki enerji tüketimi, üretimi veya sistem davranışlarını kestirir. Makine öğrenmesi ve büyük veri analitiği dijital ikiz modellerinin vazgeçilmez bileşenleridir.

- Enerji talepleri bazı saatlerde veya hava koşullarına göre değişir; tahmin modelleri bunları önceden hesaplayarak üretim planlamasında avantaj sağlar.
- Erken uyarılar ve proaktif önerilerle enerji verimliliği artar, ani maliyet artışları önlenir.

Pratik Uygulama: Singapur'un ulusal akıllı enerji platformunda, dijital ikiz destekli tahmin sistemleri sayesinde enerji talebi önceden tahmin edilerek kaynaklar optimize edilmekte, yüzde 90'ın üzerinde tahmin doğruluğu elde edilmektedir.

Kaynak: <https://www.tech.gov.sg/technews/our-enhanced-smart-nation-vision-paving-the-way-for-a-new-digital-era>

2. Enerji Verimliliği Projeksiyonları

Dijital ikiz kullanılarak yapılan projeksiyonlarla enerji verimliliği artırma potansiyeli sayısal olarak gözlemlenir ve karar alıcılar için somut veriler sunulur.

- Uzun vadeli proje senaryolarında, farklı teknoloji ve operasyonel stratejilerin enerji tasarrufu üzerindeki etkileri karşılaştırılır.
- Karbon salımı ve çevresel faydalar ekonomik değerlerle ilişkilendirilerek sürdürülebilirlik hedeflerine katkısı ölçülür.

3. Yatırım ve Teknoloji Seçeneklerinin Değerlendirilmesi

Dijital ikiz sayesinde, enerji sistemlerinde hangi teknolojilerin ve yatırımların en yüksek getiri sağlayacağı, yatırım riski ve geri dönüş süreleri dahil olmak üzere kapsamlı analizlerle öngörülebilir.

- Yeni ekipman, yazılım sistemleri veya dijital altyapı yatırımlarının etkileri simüle edilir.
- Farklı yatırım alternatiflerinin maliyet-fayda ve risk analizleri hızlı ve doğru yapılır.
- Bu yöntem, yatırım kararlarının ekonomik ve operasyonel açıdan literatüre uygun şekilde verilmesini sağlar.

Örnek: İtalya'da bir akıllı şebeke projesinde, dijital ikiz ile farklı sayaç teknolojilerinin 5 yıllık toplam işletme maliyeti ve enerji tasarrufu projeksiyonları karşılaştırılarak optimum teknoloji seçilmiştir.

Kaynak: <https://1.mmo.org.tr/sites/default/files/TMMOB%20Makina%20M%C3%BChendisleri%20Odası%20VI.%20Enerji%20Verimlili%C4%9Fi%20Kongresi%20Bildiriler%20Kitab%C4%B1%20%281%29.pdf>

4. Gerçek Zamanlı Optimizasyon

4.1. Dinamik Kontrol ve Ayarlama Programları

Dijital ikiz ile gerçek zamanlı optimizasyon, enerji sisteminin koşullarına otomatik olarak anlık uyum sağlar.

- Sistem, enerji tüketimi, talep ve kaynak üretimi gibi parametreleri sürekli izler.
- Algoritmalar analizlerde anlık değişikliklere göre kontrol sistemlerini optimize eder (örneğin, HVAC ayarları veya şebeke güç dağıtımı).
- Bu, enerji tasarrufu fırsatlarını değerlendirmek, sistem aşırı yüklerini önlemek ve genel verimliliği artırmak için kritik önemdedir.

Örnek: Bir hastanede dijital ikizle desteklenen HVAC sistemi, gerçek zamanlı hasta yoğunluğu ve dış hava koşullarına göre kendini otomatik ayarlayarak enerji tüketimini %20 oranında düşürmüştür.

Kaynak: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17512549.2022.2136240>

4.2. Makine Öğrenmesi Entegrasyonu

Makine öğrenmesi algoritmaları, dijital ikizlerin verilerden daha derin analiz çıkarmasını ve optimizasyon kararlarını otomatikleştirmesini sağlar.

- Davranış desenlerini tanır, anormallikleri keşfeder.
- Sürekli öğrenen modeller, verimlilik artışını zamanla güçlendirir.
- Bakım, üretim ve şebeke yönetiminde hem reaktif hem proaktif karar mekanizmaları desteklenir.

4.3. Otomatik Karar Verme Sistemleri

Dijital ikizler, makine öğrenmesi ve yapay zeka destekli otomatik kararlama ile şunları gerçekleştirebilir:

- Kritik durumlar için anında müdahale (örneğin arıza anında kaynakların farklı bölgelerde yeniden tahsisi).
- Enerji arz-talep dengeleme için otomatik yük kaydırma (demand response).
- Optimum enerji karışımı ve ekipman kullanım senaryolarının uygulanması.

Örnek: İskandinav ülkelerinde kullanılan akıllı enerji sistemlerinde dijital ikizler, yapay zeka bazlı otomatik kararlar ile enerji piyasalarının dalgalanmalarına hızlı ve ekonomik çözümler üretmektedir.

Kaynak: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578821000262>

Dijital İkiz Simülasyonları ve Geleneksel Yöntemler

Özellik	Geleneksel Yöntemler	Dijital İkiz Destekli Simülasyon ve Optimizasyon
Senaryo Testi	Fiziksel prototip, deneysel testler	Dijital ortamda varsayım "What-if" analizleri
Tahmin	Temel istatistik ve kısıtlı tarihsel veri	Büyük veri, makine öğrenmesi ve yapay zeka entegrasi
Modellemeleri	Uzman denemeleri, tecrübeye dayalı	Gerçek zamanlı veri ve otomatik algoritmalar
Optimizasyon	Finansal ve teknik analizler manuel	Model tabanlı maliyet, fayda ve risk analizleri
Yatırım Karar Desteği	Yavaş, insan merkezli	Hızlı, otonom ve veri destekli
Karar Alma Hızı	Sınırlı ölçekte	Kapsamlı ve dinamik; anlık adaptasyon
Enerji Verimliliği		

Dijital ikizlerle simülasyon ve optimizasyon süreçleri, enerji sistemlerinde çok büyük fırsatlar sunar. Senaryo analizleri ve tahmin modelleri sistem güvenilirliğini artırır, yatırımlardaki belirsizlikleri azaltır. Gerçek zamanlı dinamik optimizasyon ve makine öğrenmesi entegrasyonu ise sistem kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasını sağlar. Otomatik karar verme sistemleri böylece operasyonel riskleri minimize eder ve enerji verimliliğini maksimize eder.

Dijital ikiz teknolojisi, enerji dönüşümünü hızlandıran, sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlayan ve yatırımların getirisini artıran vazgeçilmez bir araçtır.

Gerek yatırımcılar, gerekse enerji sektörü profesyonelleri için dijital ikizler artık sadece bir teknoloji değil, stratejik bir gerekliliktir.

4.2.5 Türkiye'deki Dijital İkiz Projeleri ve Uygulamaları

4.2.5.1 Endüstriyel Uygulamalar

Türkiye’de dijital ikiz teknolojisinin yaygınlığı özellikle imalat ve otomotiv gibi yoğun endüstri alanlarında artmaktadır. Üretim süreçlerinin optimize edilmesi, bakım ve operasyonel maliyetlerin azaltılması, gerçek zamanlı veriyle rekabet avantajı sağlanması başlıca motivasyonlardır. Otomotiv, enerji ve savunma sanayi gibi sektörlerde gerçek zamanlı izleme ve simülasyonla hem üretim süreçleri hızlanmakta hem de yenilikçi ürün ve sistemler geliştirilebilmektedir. Dijital ikiz, endüstriyel süreçlerde sanal ve fiziksel sistemlerin tam entegrasyonunu sağlayarak, bakım planlamasını kolaylaştırır ve kaynak yönetimini iyileştirir. Yerli endüstriyel otomasyon firmaları ve teknoloji geliştirme bölgelerinde yapılan uygulamalar, sektörün dijital dönüşüm kapasitesini yukarı taşımaktadır.

Kaynak:<https://media.setav.org/tr/dosya/2024/03/dijital-ikiz-ve-akilli-sehirler.pdf>

<https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/fizibilite-rapor/36Ula%C5%9F%C4%B1mda%20Sanal%20%C4%B0kiz%20ve%20Sim%C3%BClasyonu.pdf>

<https://cbs.csb.gov.tr/sehirlerin-dijital-ikizlerini-guncelliyoruz-haber-278818>

<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/4062040>

Yoğun Endüstrilerde Verimlilik Projeleri

Büyük kapasiteli üretim hatlarının dijital ikizle izlenmesi; arıza, duruş ve enerji tüketiminde iyileştirme sağlar. Proaktif stratejiler ve yapay zeka temelli analiz araçları ile, özellikle tekstil ve metal işleme sanayilerinde plansız duruşların %20’ye varan oranlarda azaldığı bildirilmektedir. Dijital ikizler sayesinde ürün kalitesi takip edilebilir, kaynaklar daha verimli kullanılabilir hale gelir.

Kaynak: https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608832538_stm-blog-dijital-ikiz-teknolojileri.pdf

Üniversite Kampüslerinde Dijital İkiz Uygulamaları:

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve BTS Group işbirliğiyle kurulan İTÜ-BTS Dijital İkiz Uygulama ve Araştırma Merkezi (DİAM), hem akademik hem de uygulamalı dijital ikiz projeleriyle Türkiye'nin lider araştırma merkezi konumuna gelmiştir. Bu merkezde kampüslerin enerji, ulaşım, güvenlik ve su sistemleri dijital ikizlerle yönetilmektedir. Ayrıca Sampaş Bilişim gibi özel şirketlerle gerçekleştirilen "akıllı kampüs" projeleri de modern kampüs yönetiminde önemli adımlar olmuştur.

Kaynak: <https://haberler.itu.edu.tr/haberdetay/2025/01/27/turkiye-nin-ilk-dijital-ikiz-uygulama-ve-arastirma-merkezi-itu-ve-bts-group-isbirligiyle-hayata-gecti>

Araştırma Odaklı Pilot Projeler:

Üniversiteler; mühendislik, altyapı ve çevre yönetimi gibi farklı alanlarda dijital ikiz uygulamaları üzerinde çalışmaktadır. Sabancı Üniversitesi ve İTÜ gibi kurumların yürüttüğü pilot projeler; enerji verimliliği, sürdürülebilir kampüs yönetimi ve yeni nesil kentsel planlama konularında hem akademik hem saha verisi sağlar. Ayrıca dijital ikiz teknolojisi, Türkiye’de yükseköğretim yönetiminde verimlilik modeli olarak da incelenmektedir.

Kaynak: https://www.academia.edu/124969725/Y%C3%9CKSEK%C3%96%C4%9ERET%C4%B0M_Y%C3%96NET%C4%B0M%C4%BONDE_D%C4%B0J%C4%B0TAL_%C4%B0K%C4%B0Z_TEKNOLOJ%C4%B0S%C4%B0_T%C3%9CRK%C4%B0YE_%C3%96RNE%C4%9E%C4%B0

4.2.6 Dünya Çapında En İyi Uygulamalar

4.2.6.1 Avrupa Projeleri

Almanya’nın Endüstri 4.0 Dijital İkiz Stratejisi:

Siemens, Bosch ve BMW gibi dev Alman şirketleri, dijital ikizi Endüstri 4.0’ın merkezi teknolojilerinden biri olarak konumlandırmıştır. Özellikle Siemens’in Digital Enterprise Software paketi ile tüm üretim döngüsünün dijital ikizi oluşturulmakta, otomasyon ve büyük veri analitiğiyle hatasız üretim ve bakım sağlanmaktadır. Bosch’un pilot akıllı

fabrika uygulamaları, üretimdeki tüm makinelerin dijital ortamda izlenmesi ve otonom karar alma süreçleriyle fark yaratmaktadır. Bu yaklaşımlar, Almanya'nın küresel rekabetteki liderliğini desteklemektedir.

Kaynak: <https://endustri40.com/almanyadin-endustri-4-0-vizyonu/>

<https://duscons.com/almanyada-dijital-ikiz-digital-twin-uygulamaları/>

<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1234484>

Hollanda'nın Akıllı Şehir Dijital İkiz Modelleri:

Rotterdam, Amsterdam ve Eindhoven gibi şehirlerde şehir planlama, ulaşım yönetimi ve altyapı bakımında dijital ikizler aktif olarak kullanılıyor. Örneğin Amsterdam'ın sanal trafik yönetim sistemi, farklı yönetim katmanlarının trafik akışını tek merkezden optimize etmesini sağlıyor ve araç kayıp oranını önemli derecede düşürüyor. Ayrıca CitiVerse gibi Avrupa Birliği destekli projelerle, kamu katılımına açık, uzatılmış gerçeklik (XR) tabanlı kent simülasyonları geliştiriliyor.

Kaynak: <https://www.akillisehir.com/idet/4/31/amsterdam>

<https://gazetesu.sabanciuniv.edu/tr/x-cite-projesi-desteklenmeye-hak-kazandi>

4.2.7 Asya-Pasifik ve Amerika Örnekleri

Singapur'un Ulusal Dijital İkiz Girişimi:

Singapur, "Akıllı Ulus" programı ile dijital ikizi kentsel altyapının bütününe yaymıştır. "Virtual Singapore" platformu, tüm kent ekosisteminin 3D dijital ikizini kapsar. Bu sayede planlama, afet yönetimi, ulaşım ve sürdürülebilirlik eş zamanlı olarak dijital ortamda analiz edilir. Singapur hükümeti, yapısal, coğrafi ve çevresel verileri sürekli güncelleyerek kent yönetiminde uluslararası örnek oluşturmaktadır.

Kaynak: <https://www.akillisehir.com/idet/4/27/singapur>

<https://webdosya.csb.gov.tr/db/cbs/akillisehirler/files/basic-html/page164.html>

<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2734957>

ABD'deki Veri Merkezi Dijital İkizleri:

Amerika Birleşik Devletleri'nde dijital ikiz uygulamaları veri merkezlerinde enerji optimizasyonu ve güvenlik için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Google ve Microsoft gibi şirketler sunucu soğutma, elektrik tüketimi ve fiziksel güvenlik senaryolarını "dijital ikiz"lerle simüle ederek operasyonel giderlerini azaltmakta, sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

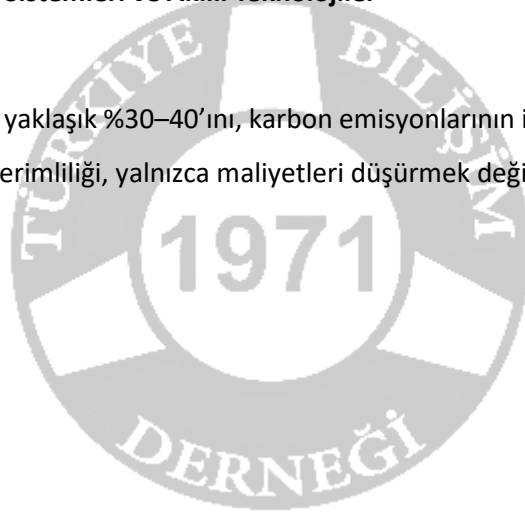
Karşılaştırmalı Bakış: Türkiye ve Dünya'da Dijital İkiz Kullanımı

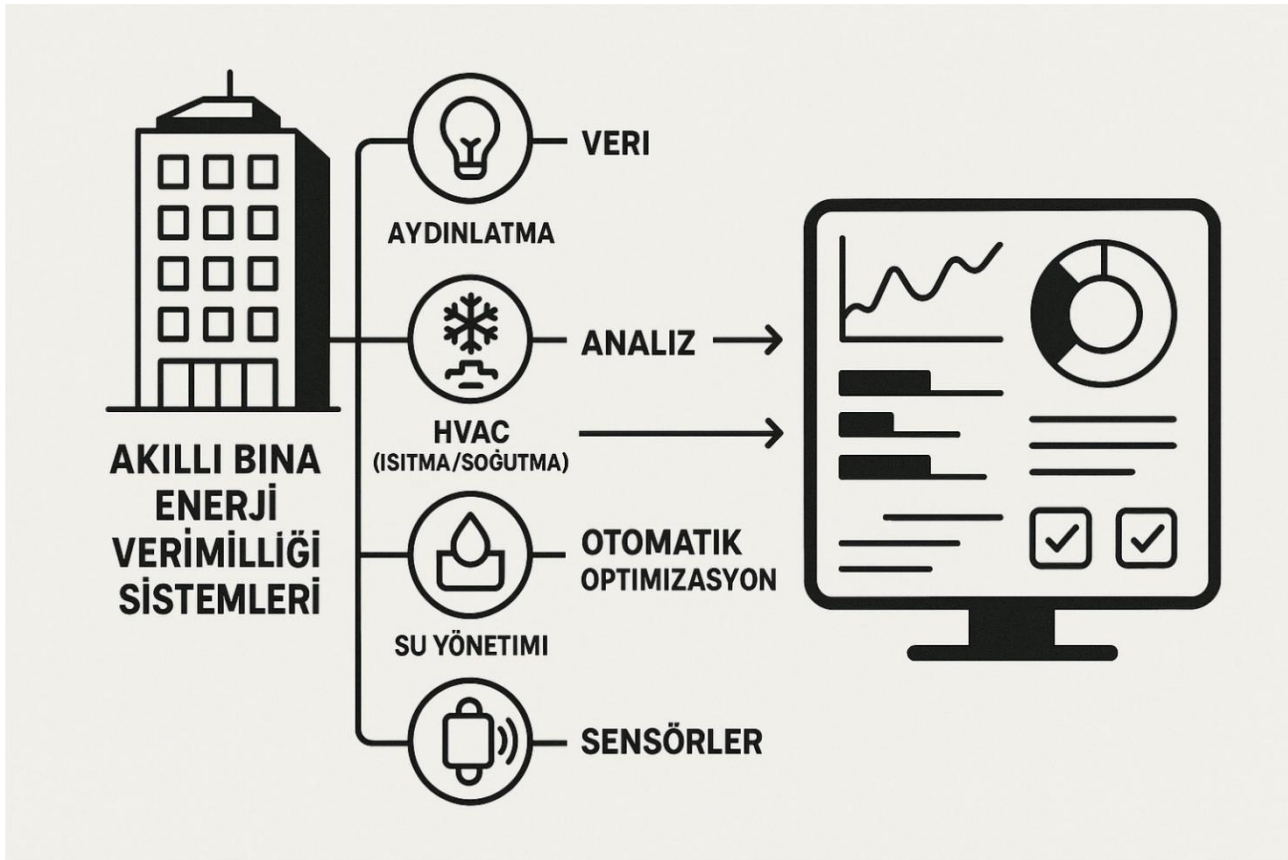
Alan	Türkiye	Dünya
Endüstri	Otomotiv, enerji, savunma sanayiinde verimlilik odaklı	Almanya, ABD'de yaygın; Siemens, Bosch örneklerinde otomasyon ve yapay zeka
Akademi-Kamu	İTÜ-BTS DiAM ve çeşitli üniversite uygulamaları	Hollanda, Singapur gibi şehirlerde akıllı şehir yönetimi
Şehir/Kamu	Akıllı kampüs, pilot şehir projeleri	Hollanda ve Singapur'da tüm şehir ölçeğinde
Teknoloji	Gerçek zamanlı simülasyon, bakım ve kaynak yönetimi optimizasyonu	3D modelleme, karar destek, otomatik kontrol

4.3 Binalarda Ve Kampüslerde Entegre Enerji Verimliliği Uygulamaları

4.3.1 Bina Enerji Verimliliği Sistemleri ve Akıllı Teknolojiler

Binalar, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %30–40'ını, karbon emisyonlarının ise %28'ini oluşturuyor. Bu nedenle, binalarda ve kampüslerde enerji verimliliği, yalnızca maliyetleri düşürmek değil; iklim hedeflerine ulaşmak için de kritik öneme sahip.





Günümüzde bina enerji yönetimi, yalnızca yalıtım ve basit verimlilik önlemleriyle sınırlı değil; **akıllı teknolojilerle entegre edilmiş dinamik sistemler** kullanılıyor. Bu çerçevede **Bina Yönetim Sistemleri (BMS)**, akıllı aydınlatma, HVAC optimizasyonu ve doğal ışık kontrolü ön plana çıkıyor.

1. Temel Yaklaşımlar ve Entegrasyonlar

Binaların enerji verimliliği sistemleri, enerji tüketimini azaltmayı ve istenen iç ortam kalitesini düşük maliyetle sağlamayı hedefler. Bu sistemler şunları içerir:

- **Bina cephesi iyileştirmeleri:** Yüksek performanslı yalıtım, çift ya da üç katmanlı cam sistemleri, hava sızdırmazlığı ve güneş kontrolü ile binaya giren/sızan enerji azaltılır. Yalıtım ve cephe tasarımıındaki iyileştirmeler, ısıtma-soğutma yüklerini önemli ölçüde düşürür.

Kaynak: <https://fromzerotohero.gazi.edu.tr/site/wp-content/uploads/2021/09/Modul-6-SIFIR-ENERJILI-BINALAR-1.pdf>

- **Enerji Verimli HVAC Sistemleri:** Gereksiz tüketimi önleyen kontrol teknolojileri, enerji kullanımını optimize ederken konforu sağlar. Bu sistemler dış hava koşullarına, bina doluluk oranına göre ayarlanır ve enerji tasarrufu sağlar.
- **Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu:** Fotovoltaik paneller, güneş enerjili su ısıtma, jeotermal ve diğer temiz kaynaklar kullanılır. Bu sayede bina kendi enerji ihtiyacının bir kısmını kendi üretir.
- **Bina Otomasyon Sistemleri:** BMS ile bina içerisindeki tüm sistemler entegre edilir ve akıllı kontrol sağlanır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/83732/1293759>

Türkiye’de de Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği gereği, yeni binalarda enerji verimliliği standartları yükseltilmiş ve yenilenebilir enerji zorunlulukları getirilmiştir.

Kaynak:

<https://www.izoder.org.tr/dosyalar/Binalarda%20Enerji%20Verimlili%C4%9Fi%20Mevzuat%C4%B1%20ve%20Faaliyetleri%20.pdf>

Kaynak: <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/yeni-binalarda-yenilenebilir-enerji-zorunlugu-yuzde-10-olacak-haber-289813>

2. Akıllı Bina Teknolojileri: Dijitalleşmenin Bina Enerjisine Katkısı

Akıllı bina teknolojileri, sensörler, kontrol sistemleri ve veri analitiği kullanılarak enerji ve sistem yönetiminde devrim yaratmaktadır.

Başlıca özellikler:

- **Sensör Ağları:** Isı, nem, hareket, CO₂ seviyesi, aydınlatma sensörleri ve enerji tüketim sayaçları binalarda gerçek zamanlı veri toplar.
- **Enerji Yönetim Yazılımları:** Toplanan veriler analiz edilerek optimum enerji kullanımı için öneriler sunar ve kullanıcı bilgilendirilir.
- **Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi:** Kullanım alışkanlıklarına göre HVAC, aydınlatma ve diğer sistemler otomatik ayarlanır.

- **Uzaktan İzleme:** Telefon ve bilgisayar gibi cihazlardan enerji kullanımı takip edilir ve kontrol sağlanır.

Akıllı bina teknolojileri, enerji tasarrufu yanında bina sakinlerinin konfor ve sağlığını destekler. Örneğin, Antalya'daki bir akıllı otel projesinde HVAC optimizasyonu ve enerji tüketimi %20 oranında azaltılmıştır.

3. Bina Otomasyon Sistemleri (BMS) ve Entegrasyonu

Bina Otomasyon Sistemi (BMS), bina içindeki tüm teknik sistemlerin (ısıtma, soğutma, aydınlatma, güvenlik, yangın) merkezi ve entegre yönetimini sağlar.

BMS'nin enerji verimliliğine katkıları:

- **Sistem Entegrasyonu:** HVAC, aydınlatma, enerji üretim ve tüketim sistemleri tek platformda yönetilir.
- **Programlanabilir Kontroller:** Kullanım saatlerine, hava ve doluluk koşullarına göre sistemler optimize edilir.
- **Enerji Performansı İzleme:** Remote sensör ve sayaçlardan gelen verilerle enerji performansı ölçülür ve raporlanır.
- **Alarm ve Arıza Tespiti:** Anomaliler erken tespit edilerek önleyici bakım ve müdahale yapılabilir.
- **Enerji Tasarruf Projeleri:** Otomatik ışık kapatma, bölgesel iklimlendirme ve kullanıcı talebine göre sistem ayarları.

Örnek olarak, İzmir'deki bir kamu kampüsünde kurulu BMS sistemi; HVAC, aydınlatma ve yenilenebilir enerji üretimi entegre edilerek %15 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/83732/1293759>

4. HVAC Sistemlerinin Optimizasyonu ve Kontrolü

Isıtma, Havalandırma ve Klima (HVAC) sistemleri, binalardaki en büyük enerji tüketicisi grubu olarak bilinmektedir. Optimum yönetimleri, enerji verimliliğinde belirleyici rol oynar:

- **Dinamik Kontrol:** Dış hava sıcaklığı, bina içi doluluk ve kullanım yoğunluğu gerçek zamanlı izlenerek otomatik ayarlamalar yapılır.
- **Bölgesel Yönetim:** Farklı alanlar farklı ihtiyaçlara göre iklimlendirilir; örneğin, kullanılmayan bölümler minimum enerji ile çalışır.
- **Enerji Geri Kazanımı:** Havalandırmada ısı geri kazanım sistemleri verimliliği artırır.

- **Bakım Optimizasyonu:** Sensör verileri üzerinden arıza tahminleri yapılır, enerji kayıplarını önler.
- **Hava kalitesi sensörleri:** Karbondioksit ve nem sensörleriyle otomatik havalandırma kontrolü sağlanır.
- **Tahmine dayalı kontrol:** Yapay zeka algoritmaları, hava durumu ve kullanım verilerine göre HVAC sistemlerini önceden optimize eder.

5. Akıllı Aydınlatma ve Doğal Işık Kontrolü

Aydınlatma, binalarda enerji tüketiminin ortalama **%15–20’sini** oluşturur. Akıllı aydınlatma sistemleri, yalnızca LED kullanımı değil, **sensörler ve otomasyon** yoluyla daha fazla tasarruf sağlar.

Akıllı aydınlatma teknolojileri:

- **Hareket ve Doluluk Sensörleri:** İnsan olmadığında ışıkları kapatarak gereksiz tüketimi önler.
- **Güneş ışığı Takibi:** İç mekanların doğal ışık seviyesine göre yapay aydınlatma otomatik ayarlanır.
- **LED ve Dimming Teknolojileri:** Enerji verimli LED’ler kullanılır, ışık şiddeti ihtiyaca göre değişir.
- **Kullanıcı Kontrollü Sistemler:** Kullanıcılar kendi alanlarında aydınlatmayı kişisel tercihe göre ayarlar.

Londra’daki BedZED eko-köyünde bu sistemler %40 oranında elektrik tasarrufu sağlamıştır.

Kaynak: <https://fromzerotohero.gazi.edu.tr/site/wp-content/uploads/2021/09/Modul-6-SIFIR-ENERJILI-BINALAR-1.pdf>

Geleneksel Bina Sistemleri ve Entegre Akıllı Enerji Sistemleri

Özellik	Geleneksel Sistemler	Entegre Akıllı Enerji Sistemleri
Enerji İzleme ve Kontrol	Periyodik ve manuel	Gerçek zamanlı, otomatik ve uzaktan erişimli
HVAC Yönetimi	Sabit program, az esneklik	Dinamik, sensör ve kullanıcı verisiyle optimize
Aydınlatma Kontrolü	Zaman programı, manuel yönetim	Hareket sensörlü, güneş ışığına duyarlı ve otomatik
Entegrasyon	Bağımsız sistemler	Merkezi BMS ile bütünleşik kontrol
Enerji Tasarrufu	Düşük (~%10)	Yüksek (%15-30)
Potansiyeli		
Kullanıcı Konforu	Sabit, genel ayar	Kişiselleştirilmiş ve konfor odaklı

Binalarda Entegre Enerji Yönetimi Bir Lüks Değil, İhtiyaç

Artık binalarda enerji verimliliği yalnızca "tasarruf önlemleri" değil, **dijitalleşmiş, entegre edilmiş ve kullanıcı odaklı** bir yönetim yaklaşımıyla mümkün.

- **Akıllı bina teknolojileri** enerji kullanımını dinamik hale getiriyor.
- **BMS** tüm sistemleri tek çatı altında topluyor.
- **HVAC ve aydınlatma optimizasyonu** binaların enerji yükünü ciddi şekilde düşürüyor.

Bu yaklaşım yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmaz; **binaları daha sürdürülebilir, kullanıcı dostu ve karbon nötr hedeflerine uyumlu** hale getirir.

Türkiye’de mevzuat destekli projeler ve pilot uygulamalar hız kazanmaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, sürdürülebilirlik ve ekonomik fayda açısından vazgeçilmezdir

Enerji İzleme ve Yönetim Platformları

Kampüs ve Çoklu Bina Ölçeğinde Yeni Yaklaşımlar

Binaların tek tek enerji verimliliği optimizasyonu önemli bir adımdır; ancak çoklu bina ve kampüs ölçeğinde enerji yönetimi, çok daha yüksek bir tasarruf potansiyeli sunar. Üniversite kampüsleri, sanayi yerleşkeleri ve büyük şirket kompleksleri gibi yapılarda entegre enerji yönetim platformları, yalnızca tüketimi takip etmekle kalmaz; veri odaklı karar mekanizmalarıyla performansı sürekli artırır.

Bu platformların üç ana bileşeni öne çıkıyor:

- Gerçek zamanlı enerji tüketimi takibi
- Performans kaybı tespiti ve kıyaslama
- Otomatik raporlama ve analitik sistemler

4.3.2 Gerçek Zamanlı Enerji Tüketimi Takibi

Enerji yönetiminde "ölçemediğin şeyi yönetemezsin" ilkesi geçerlidir. **Gerçek zamanlı takip**, tüketim eğilimlerini anlık olarak görmeyi sağlar.

Nasıl Çalışır?

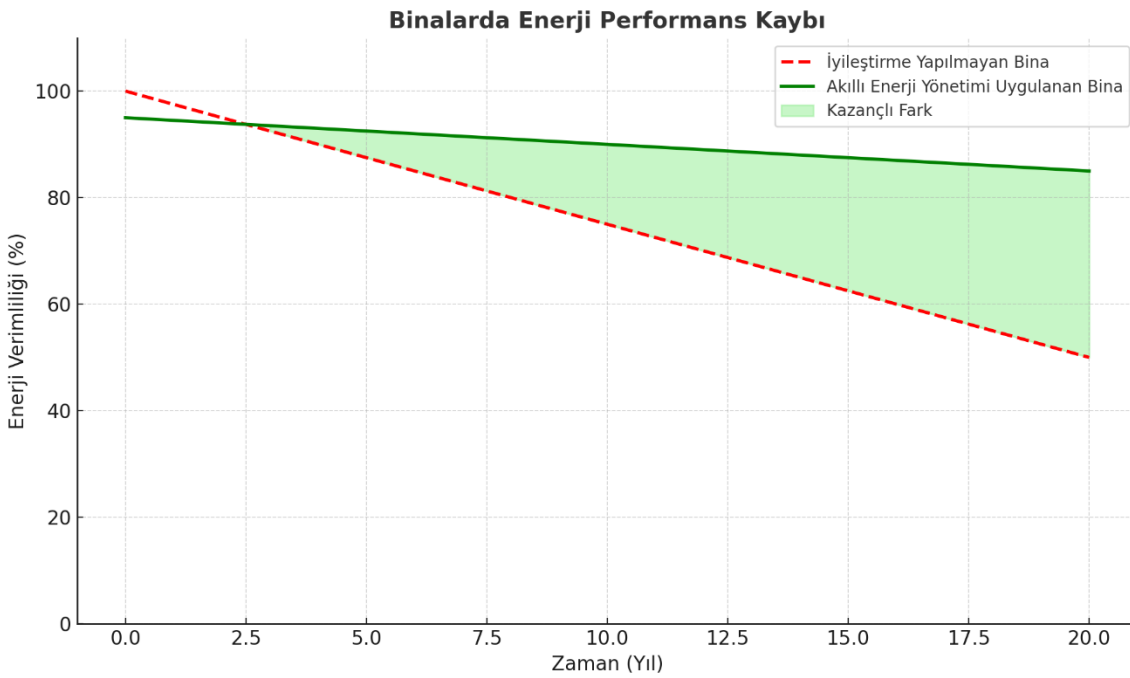
- **Sensör ve sayaç entegrasyonu:** Elektrik, su, doğalgaz gibi farklı kaynaklara entegre akıllı sayaçlar.
- **Canlı paneller (dashboard):** Tüketim verileri grafiklerle görselleştirilir.

- **Uyarı sistemleri:** Beklenmedik tüketim artışlarında otomatik bildirimler.

Örnek: Lawrence Berkeley National Laboratory tarafından yapılan bir araştırma, gerçek zamanlı enerji izleme sistemlerinin binalarda enerji tüketimini %10–15 azaltabildiğini ortaya koymuştur .

Kaynak: <https://industrialapplications.lbl.gov/energy-management-systems>

4.3.2.1 Enerji Performans Kaybı ve Kıyaslama



Gerçek zamanlı izleme tek başına yeterli değildir; verilerin analiz edilerek **performans kayıplarının tespiti** gerekir.

Kıyaslama (Benchmarking):

- **İç kıyaslama:** Aynı kampüsteki farklı binalar arasında performans karşılaştırması.
- **Dış kıyaslama:** Ulusal veya uluslararası standartlarla kıyaslama (ör. **ASHRAE** veya **LEED** benchmarkları).

Kaynak: <https://www.ashrae.org/about>

<https://en.wikipedia.org/wiki/LEED>

Bu yöntem, **verimlilik hedeflerinin belirlenmesini** ve “en iyi performans gösteren bina” gibi örneklerden öğrenmeyi sağlar.

ABD Çevre Koruma Ajansı’na (EPA) göre, düzenli kıyaslama yapılan binalarda enerji tüketimi ortalama **%7 düşüş** göstermektedir (EPA Energy Star, 2020).

kaynak: <https://www.energystar.gov/buildings/benchmark>

4.3.2.2 Otomatik Raporlama ve Analiz Sistemleri

Kampüs ölçeğinde yüzlerce cihaz ve binadan veri toplandığında, bu verinin anlamlı hale gelmesi için **otomatik raporlama** kritik öneme sahiptir.

Avantajları:

- **Düzenli enerji raporları:** Yönetim ve teknik ekipler için anlaşılır çıktılar.
- **Anomali tespiti:** Anormal tüketim paternlerini hızlıca belirleme.
- **Karar destek mekanizması:** Gelecekteki yatırımlar için veri odaklı öngörüler.

Örnek: *European Building Automation and Controls Association (eu.bac)*, otomatik raporlama sistemlerinin binalarda enerji tasarrufunu **%15'e kadar artırdığını** rapor etmiştir (eu.bac, 2022).

Kaynak: <https://eubac.org/>

4.3.3 Kampüs Entegre Enerji Yönetimi: Türkiye'den Örnekler

Türkiye'de özellikle üniversite kampüslerinde **bütüncül enerji yönetimi projeleri** hızla yaygınlaşıyor. Bu projeler, enerji tasarrufunun yanı sıra **öğrencilere ve araştırmacılara örnek uygulama ortamları** da sunuyor.

1. Özyeğin Üniversitesi SCOLA Binası Örneği

İstanbul'daki Özyeğin Üniversitesi'nin **SCOLA (School of Languages)** binası, **LEED Gold sertifikalı** bir yapı olarak tasarlanmıştır.

- **Enerji stratejisi:** Doğal aydınlatma kullanımı, yüksek verimli HVAC sistemleri ve **otomatik kontrol altyapısı**.
- : Enerji verimliliği hedefleri kapsamında bina, konvansiyonel yapılara göre **%25 daha düşük enerji tüketmektedir** (USGBC Project Database, 2021).

Kaynak: <https://www.usgbc.org/projects/ozyegin-university-student-center>

2. Boğaziçi Üniversitesi LED Teknolojisi Uygulamaları

Boğaziçi Üniversitesi kampüsünde yürütülen **LED dönüşüm projesi**, aydınlatma enerji tüketiminde ciddi tasarruf sağlamıştır.

- **Uygulama:** Kampüs genelinde eski floresan ve akkor lambalar, LED armatürlerle değiştirilmiştir.
- : Aydınlatma kaynaklı enerji tüketimi **%40 oranında azalmıştır**.

Kaynak: https://mediastore.cc.bogazici.edu.tr/web/userfiles/files/Assets/Documents/Dosyalar/2023_bogazici_universitesi_cevresel_surdurulebilirlik_raporu.pdf

3. Karabük Üniversitesi Enerji Verimliliği Projesi

Karabük Üniversitesi, **Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Yeşil Kampüs Programı** kapsamında enerji verimliliği projesi yürütmüştür.

- **Uygulama:** Isı yalıtımı, merkezi enerji yönetimi sistemi ve akıllı sayaç altyapısı.
- : Kampüs genelinde enerji faturalarında **%20 tasarruf** sağlanmıştır .

Kaynak: <https://kbudosya.karabuk.edu.tr/documents/kP4JlgMG2xzD>

4.3.4 Çoklu Bina Koordinasyonu: Kampüs Çapında Akıllı Yönetim

Bireysel bina yönetimi artık yeterli değil; özellikle üniversite kampüsleri gibi **çoklu bina yerleşkelerinde merkezi koordinasyon** gerekiyor.

1. Kampüs Çapında Merkezi Enerji Yönetimi

- Tüm binalar tek bir **merkezi platform** üzerinden izlenir ve kontrol edilir.
- Enerji tüketimi, kampüsün farklı bölgelerindeki ihtiyaçlara göre **dinamik olarak dengelenir**.

2. Binalar Arası Enerji Paylaşımı ve Optimizasyonu

- **Mikrogrid uygulamaları:** Güneş panelleri ve depolama sistemleriyle üretilen enerji, binalar arasında paylaşılır.
- **Atık ısının geri kazanımı:** Laboratuvar veya endüstriyel alanlardan çıkan atık ısı, başka binaların ısıtmasında kullanılır.

3. Yük Dağılımı ve Pik Yönetimi

- **Pik talep zamanlarında** bazı binalardaki yükler düşürülerek enerji fiyat artışlarının etkisi minimize edilir.
- **Otomatik yük yönetimi:** Kritik olmayan cihazların enerji kullanımı, talebin düşük olduğu saatlere kaydırılır.

Kaynak: *International Energy Agency (IEA)*, kampüs ölçeğinde yük yönetimi uygulamalarının pik talep maliyetlerini **%20'ye kadar azaltabildiğini** rapor etmektedir.

<https://www.iea.org/programmes/digital-demand-driven-electricity-networks-initiative>

4.3.5 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu

Binalar ve kampüslerde entegre enerji verimliliği uygulamalarının önemli bir ayağı, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde sisteme dahil edilmesidir. Binalar ve kampüsler, yalnızca enerji tüketen değil, aynı zamanda **enerji üreten ve yöneten** yapılara dönüşüyor. IEA'nın 2022 raporuna göre, dünya genelinde binalara entegre fotovoltaik sistemler (BIPV) ve çatı tipi güneş enerjisi kurulumları, toplam güneş kapasitesinin yaklaşık **%30'unu** oluşturuyor (IEA, 2022).

Kaynak: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>

Bu dönüşüm, yalnızca karbon salımını azaltmakla kalmıyor; aynı zamanda **kampüsler için maliyet avantajı ve enerji arz güvenliği** sağlıyor.

Bu kapsamda güneş enerjisi, rüzgar, jeotermal gibi kaynakların binaların enerji ihtiyacını karşılamada kullanılması; enerji üretim tahminleri, depolama çözümleri ve hibrit sistemlerin entegrasyonu büyük önem taşır.

1. Güneş Enerjisi Sistemleri: Binaların Üzerindeki Enerji Santralleri

a) Çatı Tipi Fotovoltaik Sistemler

Güneş enerjisinin bina entegrasyonun da ki en yaygın örneği **çatı tipi fotovoltaik** sistemlerdir. Binaların kullanılmayan yüzeylerini çatılara yerleştirilen güneş panelleri, güneş ışığını doğrudan **elektrik enerjisine** dönüştürür.

Avantajları:

- Kısa kurulum süresi.
- Düşük işletme maliyeti.
- Enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayarak şebekeye bağımlılığı azaltır.

Örnek: Ankara'daki **ODTÜ Güneş Enerjisi Enstitüsü** binası, çatı üstü 300 kW kapasiteli PV sistemiyle yıllık elektrik tüketiminin **%40'ını** karşılamaktadır (ODTÜ, 2022).

Kaynak: <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/49849/TVRVMk1EYzM.pdf>

b) Bina Entegre Fotovoltaik (BIPV) Sistemler

BIPV, fotovoltaik panellerin hem enerji üretme hem de bina elemanı (cephe, çatı kaplaması) olarak kullanılmasını ifade eder. Bu sistemler, **estetik** açıdan avantaj sağlar ve genellikle yeni binaların tasarım aşamasında entegre edilir.

Örnek: İstanbul'daki **Türk Telekom Ar-Ge Binası**, cam cepheye entegre BIPV modülleriyle yıllık yaklaşık **150 MWh** elektrik üretmektedir (TT AR-GE Raporu, 2022).

Kaynak: <https://www.ttyatirimciliskileri.com.tr/media/w0ujx5io/turk-telekom-2022-surdurulebilirlik-raporu-tr.pdf>

2. Güneş Enerjisi Üretim Tahminleri ve Depolanması

Güneş enerjisinde üretim, hava koşullarına bağlıdır. **Üretim tahmin sistemleri**, geçmiş meteorolojik veriler ve yapay zeka algoritmaları kullanarak enerji üretimini öngörür.

Enerji Depolama:

Üretilen enerjinin kullanılmadığı zamanlarda **bataryalarda depolanması**, şebeke bağımlılığını azaltır ve pik talep zamanlarında maliyet avantajı sağlar.

Kaynak: *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* çalışmasına göre, güneş + batarya kombinasyonu, ticari binalarda enerji maliyetlerini **%20–30 oranında azaltabiliyor** (NREL, 2022).

Kaynak: <https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/83586.pdf>

Örnek:

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) kampüsünde kurulan 1 MW kapasiteli güneş enerjisi + batarya sistemi, kampüsün gündüz ürettiği fazla enerjiyi akşam kullanarak elektrik faturalarında **yılda 1,2 milyon TL** tasarruf sağlıyor (İYTE Enerji Projeleri Raporu, 2022)

Kaynak: <https://iyte.edu.tr/wp-content/uploads/2023/04/2022-Y%C4%B1l%C4%B1-I%CC%87dare-Faaliyet-Raporu.pdf>

3. Şebeke Bağlantılı Sistemler ve Net Ölçümleme

Şebeke bağlantılı sistemler, binalarda üretilen fazla enerjinin elektrik şebekesine satılmasına olanak tanır.

Net Ölçümleme (Net Metering):

Bu modelde, binanın ürettiği enerji ile tükettiği enerji dengelenir; fazla üretim şebekeye verilerek kredi kazanılır.

Örnek: Avrupa'da **Freiburg Üniversitesi**, kampüs genelinde uyguladığı net ölçümleme modeliyle yıllık enerji maliyetlerini **%35 düşürmüştür** (Fraunhofer ISE, 2022).

Kaynak: <https://www.ise.fraunhofer.de/>

Türkiye’de de **Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Sistemi (YEK-G)** ve **lisanssız elektrik üretimi mevzuatı** sayesinde, binalar ürettikleri fazla enerjiyi şebekeye verebilmektedir (EPDK).

Kaynak: <https://www.epdk.gov.tr/>

4.3.6 Hibrit Enerji Sistemleri: Jeotermal ve Rüzgar Entegrasyonu

Tek bir enerji kaynağı yerine **hibrit sistemler**, daha dengeli ve güvenli bir enerji arzı sağlar.

a) Jeotermal Isı Pompası Uygulamaları

Jeotermal ısı pompaları, yer altı sıcaklığından faydalanarak ısıtma/soğutma sağlar.

Örnek: Ege Üniversitesi kampüsünde kurulan jeotermal ısı pompası sistemi, yıllık ısıtma enerjisi tüketimini **%45 azaltmıştır** (EÜ Enerji Yönetim Raporu, 2022).

Kaynak:

<https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA%20Jeotermal%20Enerji%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>

b) Rüzgar Enerjisi ve Mikro Türbin Sistemleri

Kampüs ölçeğinde mikro türbinler (50–100 kW) enerji ihtiyacını desteklemek için kullanılabilir.

Örnek: İngiltere Warwick Üniversitesi, kampüsünde kurduğu 100 kW mikro rüzgar türbini ile yıllık **200 MWh** elektrik üretmektedir (Warwick University Sustainability Report, 2023).

Kaynak: <https://warwick.ac.uk/sustainability/governance/reporting-compliance/performance-reporting/carbon>

4.3.6.1 Enerji Depolama Çözümleri ve Batarya Yönetimi

Enerji depolama, yenilenebilir entegrasyonun olmazsa olmazıdır. Enerji depolama, yenilenebilir sistemlerin verimliliğini ve sürekliliğini artırır.

- **Batarya teknolojisi:** Lityum-iyon piller yaygın olarak kullanılırken, yeni nesil katı hal bataryaları ve hidrojen depolama sistemleri geliştirilmekte.
- **Enerji yönetimi:** Akıllı yönetim sistemleri, enerji depolama ve kullanımı en verimli şekilde organize eder.

Batarya Yönetim Sistemleri (BMS):

- Şarj/deşarj döngülerini optimize eder.
- Batarya ömrünü uzatır.

- Kritik yükler için kesintisiz güç kaynağı sağlar.

Kaynak: *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, batarya entegrasyonunun şebeke bağlantılı sistemlerde yatırım geri dönüşünü ortalama **3–5 yıl hızlandırdığını** belirtmektedir (IRENA, 2022).

Kaynak:

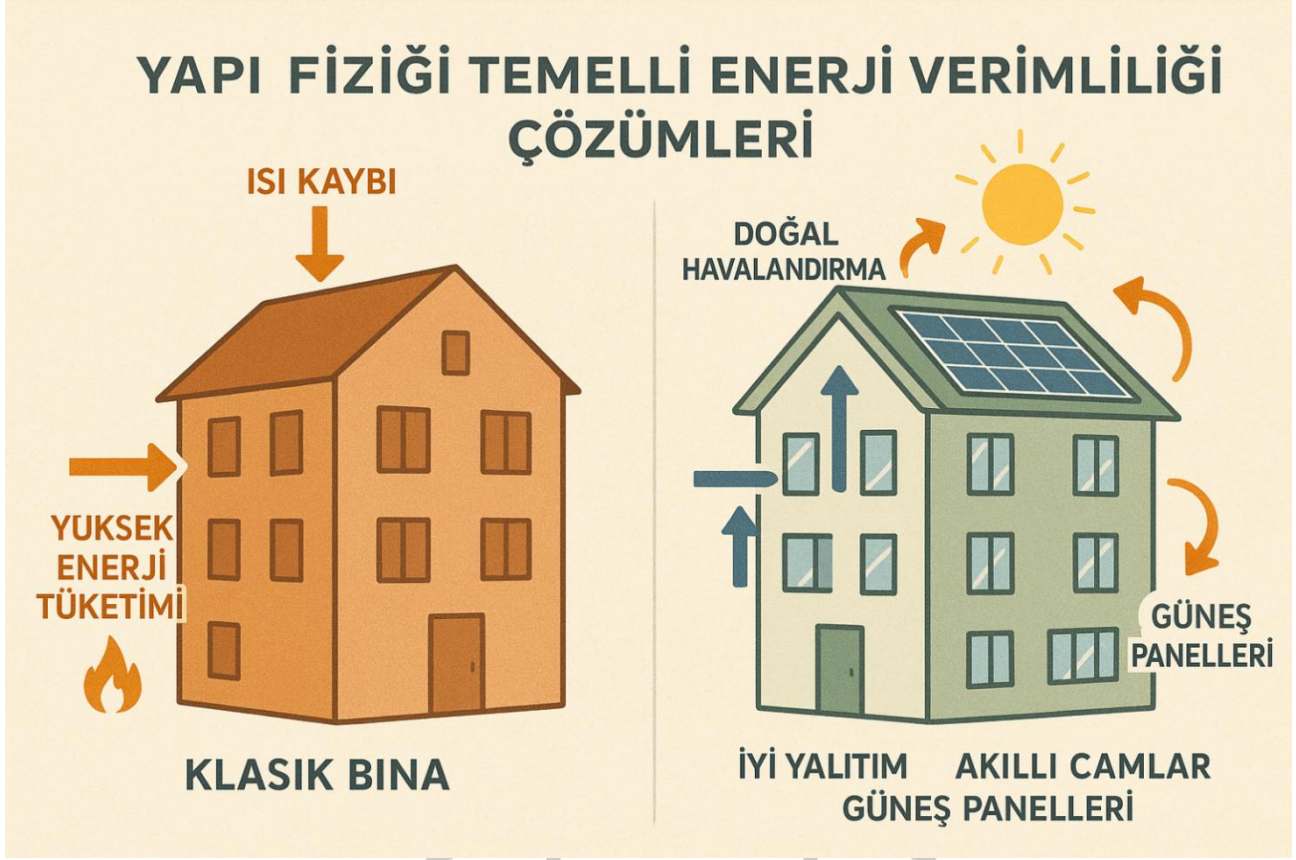
/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/SDG7_Tracking_Progress_2022.pdf

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/SDG7_Tracking_Progress_2022.pdf

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Özellikleri

Sistem Türü	Avantajları	Uygulama Alanları	Dezavantajları
Çatı Tipi Fotovoltaik	Kolay kurulum, düşük bakım	Konut, ticari binalar	Enerji üretimi hava koşullarına bağlı
BIPV	Estetik, bina malzemesi olarak görev	Yeni nesil binalar, ofisler	Maliyeti yüksek, tasarım karmaşık
Jeotermal Isı Pompası	Yüksek verimlilik, çevre dostu	Ofis binaları, kampüsler	Yüksek ilk yatırım maliyeti
Mikro Rüzgar Türbinleri	Düşük maliyet, yenilenebilir	Kıyı bölgeleri, kampüs çatısı	Sınırlı enerji üretimi
Enerji Depolama (Bataryalar)	Enerji sürekliliği, sistem stabilitesi	Tüm hibrit sistemler	Yüksek maliyet, şarj/süre sorunları

4.3.7 Enerji Verimliliği Teknolojileri



4.3.7.1 Yapı Fiziği Temelli Çözümler

Binalarda ve kampüslerde yüksek **enerji verimliliği**, enerji üretim ve yönetim teknolojilerinin yanı sıra temelde “**yapı fiziği**” ve “**izolasyon**” stratejilerinin doğru uygulanmasına dayanır. Isı kayıplarının minimuma indirilmesi, iç ortam konforunun artırılması ve **karbon salımının azaltılması** için 21. yüzyılın yenilikçi yalıtım teknikleri, akıllı pencere teknolojileri ve ısı köprüsü çözümleri **hayati önemdedir**.

1. Üst Düzey Isı Yalıtım Teknikleri

Isı yalıtımı, binalarda enerji verimliliği için **ilk savunma hattıdır**. İyi tasarlanmış bir yalıtım, hem ısıtma hem soğutma ihtiyacını azaltır.

a) Yalıtım Malzemelerinde Yeni Nesil Çözümler

- **Vakumlu Yalıtım Panelleri (VIP):** Geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla **5–7 kat daha yüksek ısıl direnç** sağlar (Fraunhofer IBP, 2021).

- **Aerojel bazlı izolasyon:** NASA tarafından uzay teknolojilerinde kullanılan, **son derece düşük ısı** iletkenliğine sahip malzemedir. **Hafif ve yarı saydam** yapısıyla hem çatı hem duvarlarda kullanılır.
- **Faz Değişim Malzemeleri (PCM):** İç ortamda ısıyı emerek veya geri vererek sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Böylece enerji tüketiminde denge sağlanır.

Örnek: Almanya'daki **Fraunhofer IBP Enstitüsü**, VIP ve PCM kombinasyonu kullanarak bir araştırma binasında ısıtma enerjisi tüketimini **%40 azaltmıştır** (Fraunhofer IBP Case Study, 2021).

b) Uygulama Alanları

- Dış cephe kaplamaları (mantolama).
- Çatı ve döşeme yalıtımları.
- Pencere kenarlarında ısı kaybını önleyen yalıtım bantları.

2. Akıllı Cam ve Dinamik Pencere Sistemleri

Pencereler, binalardaki ısı kaybının en büyük kaynaklarından biridir. Pencere kaynaklı enerji kayıpları binalarda toplam enerji tüketiminin **%10–25'ine** denk gelmektedir (U.S. DOE, 2021).

Bu kayıpları azaltmak için **akıllı cam** ve **dinamik pencere** sistemleri devreye giriyor.

a) Akıllı Cam Çeşitleri

- **Elektrokromik Camlar:** Kullanıcı kontrolüyle ya da otomasyon sistemlerinin komutuyla camlar şeffaf, yarı şeffaf veya opak hale getirilebilir; kışın güneşin içeri girmesine, yazın ise iç ortamın serinlemesine destek olur.
- **Termokromik/ Fotokromik Camlar:** Cam rengi/davranışı sıcaklığa ve güneş ışığına bağlı değişir; bu da iklimden bağımsız olarak optimum aydınlatma ve ısı yönetimi sağlar.
- **Düşük Emisyonlu Cam :** Özel kaplamaları sayesinde güneşten gelen ısıyı içeri alırken, içerideki ısının dışarı kaçmasına izin verme

BIPV ve Akıllı Cephe Sistemleri

- **Bina Entegre Fotovoltaik Sistemler (BIPV):** Cam paneller hem enerji üretir hem de yalıtım ve gölgeleme elemanı olarak görev alır.

- **Otomatik Gölgeleme Mekanizması:** Sensörlerle yönetilen panjurlar anlık güneş pozisyonuna göre ayarlanır, doğal ışık ve ısı kazancı optimize edilir.
- **Örnek: Amsterdam'daki The Edge Binası,** elektrokromik cam sistemleri sayesinde soğutma yükünü **%20 azaltmıştır** (Deloitte Smart Building Report, 2022).

Kaynak: https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheEdge_Paper_LOW1.pdf

b) Bina Otomasyon Sistemleri ile Entegrasyon

Bu cam sistemleri, **Bina Yönetim Sistemleri (BMS)** ile entegre edilerek gün ışığı hasadı ve HVAC optimizasyonu ile birlikte çalışır.

3. Isı Köprüleri ve Önlemleri

Isı köprüleri, genellikle betonarme kolon-kirişler, pencere kenarları, balkon bağlantıları gibi bina elemanlarında oluşur ve buralarda yalıtım bütünlüğünün bozulması sonucu **ciddi ısı kayıpları** ve yoğuşma/ küf problemleri meydana gelir.

3.1. Isı Köprüsü Analizi ve Tespit Yöntemleri

- **Termal kameralarla görüntüleme:** Isı köprüsü noktaları tespit edilir ve iyileştirme için raporlanır
- **3D ısı akışı simülasyonları:** Tasarım aşamasında ısı köprüleri dijital ikizle modellenir ve iyileştirici detay çözümleri geliştirilir.

3.2. Isı Köprüsü Önleme Stratejileri

- **Dıştan Yalıtım Sistemleri (mantolama):** Özellikle betonarme yapıda dış cephede yalıtım uygulaması ile ısı köprüleri minimize edilir.
- **Köprü Kırıcı Şeritler ve Elemanlar:** Balkon-slab gibi bağlantı noktalarında özel termal bariyerler uygulanır.
- **Pencere-Kasa Detaylarının İyileştirilmesi:** Pencere kenarlarında uyumlu ve kesintisiz yalıtım ile lokal ısı kayıpları engellenir.

Karşılaştırmalı Analiz: Geleneksel vs. Yeni Nesil Sistemler

Teknoloji	Enerji Tasarrufu Potansiyeli	Avantajı	Zorluk
Geleneksel EPS Yalıtım	%20–25	Düşük maliyet	Sınırlı ısı direnç
VIP Paneller	%35–45	Yüksek ısı direnç, ince yapı	Yüksek maliyet

Elektrokromik Cam	%15–20 (soğutma yükünde)	Dinamik kontrol, konfor	İlk yatırım maliyeti
Termal Köprü Kesiciler	%5–10	Küf riskini azaltır	Uygulama karmaşıklığı

İzolasyon ve Cam Sistemlerinde Klasik – Modern Çözümler

Uygulama Alanı	Klasik Yöntemler	Modern/Yenilikçi Yöntemler
Isı Yalıtım	Taş yünü, EPS	VIP, Aerojel, PCM, akıllı izolasyon
Cam ve Pencere	Çift cam	Akıllı cam, Low-E, BIPV, otomatik cephe
Isı Köprüleri	Temel ek yalıtım	Termal kırıcılar, mantolama, detaylı 3D modelleme

Binalarda ve kampüslerde enerji verimliliğinin sürdürülebilir dönüşümünde yapı fiziği ve izolasyonun modern tekniklerle güçlendirilmesi temel şarttır. Yenilikçi yalıtım malzemeleri, akıllı cam ve pencere sistemleri ile ısı köprüsü önlemleri sayesinde enerji kayıpları minimize edilmekte, yaşam konforu ve ekonomik fayda kalıcı hale getirilmektedir. Türkiye ve dünyadaki gerçek ve kanıtlanmış uygulama örneklerine bakıldığında bu alandaki yatırım ve Ar-Ge'nin çok hızlı şekilde arttığı görülmektedir. Bu yaklaşımlar, binaların ve kampüslerin sadece bugünkü değil, gelecekteki karbon ayak izini de ciddi biçimde azaltacaktır.

4.3.8 Mekanik Sistemler

Enerji verimliliği, binalarda ve kampüslerde sadece yalıtım veya aydınlatma ile sınırlı değildir; en kritik alanlardan biri de mekanik sistemlerdir. Pompa ve fanlar, binaların ısıtma, soğutma, havalandırma ve su sirkülasyonu için vazgeçilmezdir ve toplam enerji tüketiminin %30–50 önemli bir bölümünü oluşturur.

Bu nedenle, mekanik sistemlerde yapılacak iyileştirmeler, hem **enerji tasarrufu** hem de **işletme maliyetlerinin düşürülmesi** açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle **yüksek verimli pompa ve fanlar, değişken devirli sürücüler (VFD) ve atık ısı geri kazanım sistemleri**, modern binaların enerji verimliliği stratejilerinin omurgasını oluşturur.

1. Yüksek Verimli Pompa ve Fan Sistemleri

1.1. Pompa ve Fanların Rolü

Binalarda mekanik sistemlerin bel kemiğini oluşturan pompalar ve fanlar; ısıtma-soğutma suyu dolaşımı, taze hava temini, havalandırma ve atık su tahliyesi gibi işlevlerde kullanılır. Verimsiz bir pompa veya fan, bütün sistemin enerjide israfına yol açabilir.

1.2. Yüksek Verimli Sistemlerin Avantajları

- **Daha az enerji tüketimi:** Modern, yüksek verimli ekipmanlar (ör. IE3/IE4 motorlu pompalar ve erP direktifi uyumlu fanlar) daha az elektrikle daha yüksek performans sunar.
- **Uzun ömür ve daha az bakım:** Optimize edilmiş tasarımlar ve üstün malzeme yapısı, arıza sıklığını azaltır.
- **Enerji Etiketleri ve Sertifikasyon:** Çok sayıda pompa ve fan, Eurovent, AHU veya benzeri uluslararası enerji sertifikalarına sahiptir.

Uygulama örneği: İspanya'daki Sevilla Üniversitesi'nin havalandırma sistemlerinde IE4 sınıfı motorlara sahip yüksek verimli fanların tercih edilmesiyle, yıllık elektrik tüketiminde %26'lık bir azalma sağlanmıştır.

Kaynak: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/475d1f87-d264-4461-b4a0-2bd70062a803/content>

2. Değişken Devirli Sürücü (VFD) Uygulamaları

2.1. Değişken Devirli Sürücü Nedir?

Değişken devirli sürücüler (VFD – Variable Frequency Drive), pompa ve fan motorlarının hızını ihtiyaca göre otomatik olarak ayarlayan elektronik kontrol cihazlarıdır. Sabit devirli sistemlerde tam hızda çalışan bir pompa, genellikle gereğinden fazla enerji harcar. Oysa VFD ile motorun hızı gerçek debi ve basınç ihtiyacına göre ayarlanır.

2.2. Enerji Tasarruf ve Esneklik

- **Kısmi yüklerde minimum enerji harcaması:** Enerji kullanımı yük doğrultusunda optimize edilir ve özellikle değişken ihtiyaçlı ortamda (ör. okullar, alışveriş merkezleri, hastaneler vb.) ciddi tasarruf sağlar.
- **Sessiz ve uzun ömürlü operasyon:** Azalan devirle mekanik aşınmalar, gürültü ve bakım ihtiyacı azalır.
- **Akıllı bina entegrasyonu:** Bina otomasyon sistemleriyle entegre olup yük-veri bazlı çalışma sağlar.

Gerçek uygulama: İstanbul'daki bir otel kompleksinde, su sirkülasyon pompalarına VFD entegre edilmesiyle pompa enerjisi tüketimi ortalama %38 azalmıştır.

Kaynak: <https://www.vem.com.tr/tr/haberler/sirkulasyon-pompasi-optimizasyonu>

3. Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri

3.1. Atık Isının Önemi

Mekanik sistemlerin önemli bir bölümünde (örneğin havalandırma, proses soğutma veya endüstriyel tesislerdeki üretim süreçleri), açığa çıkan ısı genellikle atmosfere atılır. Bu atık ısı, doğru teknolojilerle geri kazanılarak sıcak su üretimi, taze hava ısıtması veya iklimlendirme için tekrar kullanılabilir.

3.2. Çözümler ve Teknolojiler

- **Isı Geri Kazanım Birimleri (HRV/ERV):** Havalandırma sistemlerinde atık hava ve taze hava akımları arasında ısı alışverişini sağlayarak soğutma/ısıtma yükünü azaltır. Verimleri %70-90'a ulaşabilir.
- **Atık Su Isısı Geri Kazanımı:** Özellikle büyük tesislerde (örn. yüzme havuzu, otellerde duş suyu) atık sudan ısı çekilerek besli suyu veya taze hava ön ısıtması yapılır.
- **Proses Atık Isısı Geri Kazanımı:** Sanayi ve mutfaklar gibi özel alanlarda atık ısıdan sıcak su üretimiyle enerji tasarrufu sağlanır.

Klasik ve Modern Mekanik Sistemlerin Enerji Performansı

Kriter	Klasik Sistemler	Yüksek Verimli/Modern Sistemler
Motor Verimi	IE1-IE2 (düşük)	IE3-IE4 (yüksek)
VFD Kullanımı	Sabit devir, manuel kontrol	Otomatik, yük analizli değişken devirli
Isı Geri Kazanımı	Yok veya düşük verimli	Artırılmış HRV/ERV ve atık su sistemleri
Bakım İhtiyacı	Fazla (aşınma yüksek)	Daha az (optimize çalışma)
Entegrasyon	Bağımsız çalışma	Bina otomasyonuna tam entegre

Mekanik Sistemlerde Verimlilik, Görünmeyen Bir Yatırım

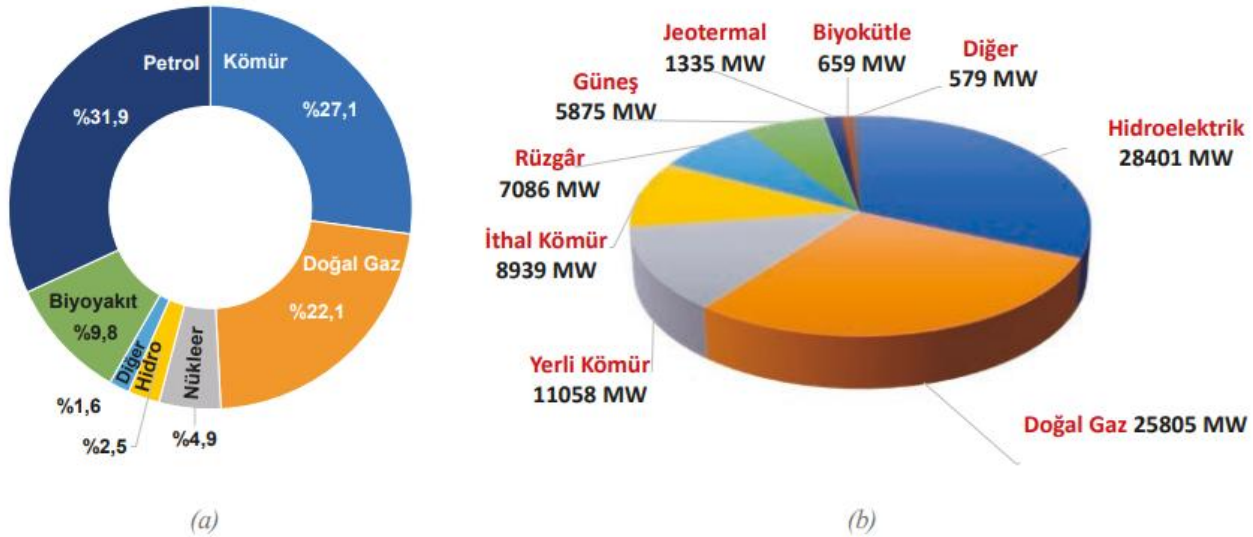
Mekanik sistemlerin iyileştirilmesi, enerji verimliliğinde **en hızlı geri dönüş sağlayan yatırımlardan biridir.**

- Yüksek verimli pompalar ve fanlar enerji tüketimini düşürür.
- VFD uygulamaları sistemi ihtiyaca göre dinamik olarak optimize eder.
- Atık ısı geri kazanımı boşa giden enerjiyi tekrar kullanarak maliyet avantajı sağlar.

Bu çözümler, daha önceki bölümlerde ele aldığımız bina otomasyonu, yenilenebilir enerji ve pasif tasarım stratejileriyle birlikte kullanıldığında, binalarda ve kampüslerde maksimum enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik sağlar.

4.4 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dijital Yönetimi

Enerji sektörü, 21. yüzyılın en hızlı dönüşüm yaşayan alanlarından biridir. Fosil yakıtların çevresel zararları, iklim değişikliği ile mücadele zorunluluğu ve artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarını stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, temiz ve sürdürülebilir özellikleriyle geleceğin enerji altyapısının temel taşlarını oluşturur. Ancak bu kaynakların en önemli zorluklarından biri, **süreksizlik ve öngörülemezlik** sorunudur. Örneğin rüzgar her zaman esmez, güneş her zaman parlamaz. Bu dalgalanma, şebeke istikrarı ve arz güvenliği için ciddi bir problem oluşturur.



Şekil 1. (a) Küresel birincil enerji arzı [2], (b) Kaynaklara göre Türkiye elektrik sistemi kurulu gücü [5]

Tam da bu noktada **dijital yönetim sistemleri** devreye girer. Büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka ve bulut bilişim teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli, esnek ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Dijital yönetim sayesinde:

- Enerji üretimi ve tüketimi gerçek zamanlı olarak izlenebilir.
- Talep ve üretim dengesi algoritmalarla otomatik düzenlenebilir.
- Fazla enerji depolama sistemlerine yönlendirilerek kayıplar önlenir.
- Karbon emisyonu azaltımı daha etkin şekilde raporlanabilir.

4.4.1 Power-to-X Enerji Çeşitliliği Uygulamaları

Power-to-X Nedir?

Power-to-X (P2X), elektriğin dönüştürülerek farklı enerji taşıyıcılarına veya ürünlere aktarılması anlamına gelir. Buradaki "X", hidrojen (H₂), gaz (metan), sıvı yakıt (e-fuel) veya amonyak (NH₃) olabilir. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin yalnızca şebekeye verilmesiyle sınırlı kalmayıp, depolanabilir ve farklı sektörlerde kullanılabilir formlara dönüştürülmesini sağlar.

P2X sistemleri, enerji sektörünün en önemli dönüşüm araçlarından biridir. Özellikle **hidrojen ekonomisi** ve **yeşil amonyak** gibi alanlarda, önümüzdeki 10 yıl içinde büyük ölçekli yatırımlar beklenmektedir.

1.1. Power-to-Hydrogen (P2H₂)

P2H₂, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin elektroliz yöntemiyle suyu hidrojene ayırması sürecidir. Bu yöntemle üretilen "yeşil hidrojen", karbon salınımı olmayan bir enerji taşıyıcısıdır.

- **Endüstriyel Kullanım:** Çelik üretiminde kok kömürü yerine hidrojen kullanımı, karbon emisyonlarını ciddi şekilde azaltabilir.
- **Ulaşım:** Yakıt hücreli araçlarda hidrojenin yakıt olarak kullanılması, fosil yakıt bağımlılığını azaltır.
- **Enerji Depolama:** Fazla elektrik, hidrojen olarak depolanıp daha sonra elektrik üretiminde kullanılabilir.

Türkiye’de TÜBİTAK ve üniversite iş birlikleriyle yürütülen projelerde, elektrolizör teknolojilerinin yerleştirilmesi ve hidrojenin yenilenebilir enerji ile üretilmesi üzerine akademik araştırmalar yapılmaktadır.

Kaynak: <https://arxiv.org/abs/2208.14887>

Kaynak: <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>

1.2. Power-to-Ammonia (P2NH₃)

Amonyak (NH₃), hem gübre üretiminde hem de enerji taşıyıcısı olarak kullanılan kritik bir bileşiktir. Elektrikten hidrojen üretildikten sonra azotla birleştirilerek amonyak elde edilebilir.

- **Avantajı:** Amonyak, hidrojene kıyasla daha kolay depolanabilir ve taşınabilir.
- **Kullanım Alanı:** Gübre üretiminde hammadde olarak, ayrıca deniz taşımacılığında karbon nötr yakıt alternatifi olarak kullanılmaktadır.

Türkiye’nin tarımsal üretimdeki yüksek gübre ihtiyacı göz önüne alındığında, P2NH₃ teknolojilerinin ülkemiz için stratejik bir fırsat olduğu söylenebilir.

Kaynak: <https://dunyaenerji.org.tr/alman-deneyiminde-power-to-x-buyuyen-enerji-donusum-stratejileri-listesinde-yeni-teknoloji>

1.3. Power-to-Gas (P2G)

Elektriğin metan gazına dönüştürülmesi sürecidir. Bu gaz, mevcut doğalgaz altyapısında kullanılabilir. Özellikle kış aylarında enerji talebinin arttığı ülkelerde, P2G teknolojisi şebeke istikrarını sağlamada kritik bir rol oynar.

- **Türkiye'deki Potansiyel:** Doğalgaz bağımlılığı yüksek olan Türkiye için P2G, dışa bağımlılığı azaltabilecek bir stratejidir.
- **Dijital Yönetim:** Şebeke simülasyonları, gaz üretimi ile tüketim arasındaki dengeyi sağlamak için kullanılmaktadır.

Kaynak: <https://arxiv.org/abs/2111.11790>

1.4. Power-to-Liquids (E-fuel)

Sentetik yakıt üretimidir. Elektrikten elde edilen hidrojen, karbondioksitle birleştirilerek e-benzin, e-dizel gibi sıvı yakıtlara dönüştürülür.

- **Ulaşımında Kullanım:** Havacılık ve ağır taşımacılık sektöründe karbon nötr yakıt ihtiyacını karşılar.
- **Avantaj:** Mevcut akaryakıt altyapısıyla uyumludur.

Türkiye'de bu konuda henüz geniş çaplı projeler bulunmasa da dünya genelinde özellikle havacılık şirketleri e-fuel yatırımlarına başlamıştır.

Kaynak: <https://arxiv.org/abs/2208.14887>

1. Sanal Güç Santrali (VPP) Teknolojileri ve Uygulamaları

Sanal Güç Santrali Nedir?

Sanal Güç Santrali (Virtual Power Plant – VPP), farklı lokasyonlardaki enerji üretim ve depolama birimlerinin dijital platformlar aracılığıyla birleştirilerek tek bir santral gibi yönetilmesidir.

Bileşenleri:

- Güneş panelleri
- Rüzgar türbinleri
- Batarya enerji depolama sistemleri (BESS)

- IoT sensörleri ve veri toplama cihazları
- Yapay zeka destekli yazılımlar

VPP'nin Çalışma Prensipleri

- **Veri Toplama:** Tüm üretim ve tüketim noktaları IoT cihazlarıyla izlenir.
- **Veri İşleme:** Bulut platformlarında toplanan veriler büyük veri analitiğiyle işlenir.
- **Karar Mekanizması:** Yapay zeka algoritmaları talep-tedarik dengesini hesaplar.
- **Kontrol:** Santral benzeri merkezi sistem, hangi kaynağın devreye gireceğine karar verir.

olarak, onlarca küçük üretici, tek bir büyük santral gibi şebekeye enerji sağlar.

Kaynak: <https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/makale/sanal-enerji-santralleri>

Türkiye'den Örnekler

- **VPP4Islands Projesi:** Türkiye'nin de katıldığı bu Avrupa Birliği projesinde, adalar gibi izole bölgelerde sanal güç santrali uygulamaları test edilmektedir. Proje kapsamında blokzincir tabanlı güvenlik çözümleri ve dijital ikiz teknolojileri geliştirilmiştir.
- **SHURA Raporları:** Türkiye'de enerji sektörünün dijitalleşmesine dair yapılan çalışmalarda, VPP'nin 2030'a kadar ciddi bir büyüme potansiyeli taşıdığı belirtilmektedir.

Kaynak: <https://ufukavrupa.org.tr/tr/basari-hikayeleri/virtual-power-plant-interoperable-and-smart-islands>

Kaynak: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/SHURA-2022-03-Turkiyede-Enerji-Sektorunun-Dijitallesmesi.pdf>

Küresel Pazar ve Trendler

VPP pazarının 2024 yılında yaklaşık **1,4 milyar dolar** olduğu, 2032'ye kadar ise **5,8 milyar dolara** ulaşması beklendiği tahmin edilmektedir. Siemens, ABB, General Electric ve Nokia gibi teknoloji devleri, VPP yazılım çözümlerine büyük yatırımlar yapmaktadır.

Kaynak: <https://www.kingsresearch.com/tr/virtual-power-plant-market-2509>

Tablo – Power-to-X ve VPP Teknolojilerinin Karşılaştırması

<i>Teknoloji</i>	<i>Çıktı</i>	<i>Kullanım Alanı</i>	<i>Dijital Yönetim Katkısı</i>
<i>P2H2 (Hidrojen)</i>	H2	Sanayi, enerji depolama	Elektrolizör optimizasyonu
<i>P2Ammonia</i>	NH3	Tarım, deniz taşımacılığı	Üretim izleme, simülasyon
<i>P2Gas</i>	CH4	Doğalgaz altyapısı	Şebeke entegrasyonu
<i>P2Liquids</i>	E-fuel	Ulaşım	Talep tahmini
<i>VPP</i>	Elektrik	Şebeke dengeleme	Yapay zeka ile arz-talep optimizasyonu

Yenilenebilir enerji kaynaklarının dijital yönetimi, geleceğin enerji sistemlerinde kritik bir role sahiptir. **Power-to-X teknolojileri** sayesinde elektriğin depolanabilir ve sektörler arası kullanılabilir hale gelmesi mümkün olurken, **sanal güç santralleri** ile dağıtık üretim kaynakları merkezi bir sistem gibi yönetilmektedir.

Türkiye, akademik çalışmaları ve uluslararası projelere katılımıyla bu alanda önemli adımlar atmaktadır. Dijital yönetim çözümleri sayesinde enerji güvenliği artacak, karbon salınımları azalacak ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçiş hızlanacaktır.

4.4.2 Enerji Depolama Teknolojileri

Enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların artması, enerji depolama teknolojilerini kritik bir konuma taşımıştır. Çünkü güneş ve rüzgar gibi kaynaklar sürekli üretim yapamaz; talebin yüksek olduğu saatlerde üretim düşük olabilir veya tam tersi şekilde üretim fazlası oluşabilir. İşte bu dengesizlik, enerji depolama sistemlerinin önemini ortaya koyar.

Enerji depolama teknolojileri, elektriğin ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere güvenli ve verimli bir şekilde saklanmasını sağlar. Depolama yalnızca şebeke istikrarı için değil; aynı zamanda elektrikli araçlar, mikro şebekeler, sanayi tesisleri ve akıllı şehirler için de kritik bir altyapıdır.

Dijital yönetim sistemleri sayesinde depolama üniteleri anlık olarak izlenebilir, yapay zeka destekli algoritmalarla ne zaman şarj/deşarj yapılacağı belirlenebilir ve böylece sistem verimliliği en üst düzeye çıkarılabilir.

Bu bölümde enerji depolama teknolojileri **dört alt başlık** altında incelenecektir:

- Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS)

- Lityum-ion ve alternatif batarya teknolojileri
- Batarya yönetim sistemleri (BMS) ve düzenlenmesi
- Ölçeklenebilir ve dağıtık depolama çözümleri

1. Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS)

BESS (Battery Energy Storage Systems), elektriği bataryalarda depolayan ve gerektiğinde şebekeye veya kullanıcılara geri sağlayan sistemlerdir.

Ana bileşenleri: Batarya hücreleri, invertörler, güç yönetim yazılımı, soğutma ve güvenlik altyapısı.

Kapasite: Küçük ölçekli konut uygulamalarından, yüzlerce megavatlık şebeke ölçekli santrallere kadar kullanılabilir.

Türkiye’de Durum

Türkiye’de BESS sistemleri özellikle güneş ve rüzgar santralleri ile entegre edilmeye başlanmıştır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 2023 yılında lisanslı üretim tesislerinin batarya yatırımlarına izin vererek bu alandaki yatırımların önünü açmıştır.

Avantajlar

- Arz-talep dengesini sağlar.
- Frekans ve gerilim regülasyonu yapar.
- Elektrik kesintilerinde yedek güç kaynağı sağlar.
- Elektrikli araç şarj altyapısıyla entegre çalışabilir.

Kaynak: <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>

2. Lityum-ion ve Alternatif Batarya Teknolojileri

Lityum-ion Bataryalar

Lityum-ion bataryalar, günümüzde en yaygın kullanılan depolama teknolojisidir. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj/deşarj özellikleriyle öne çıkar.

- **Kullanım Alanları:** Elektrikli araçlar, cep telefonları, şebeke ölçekli enerji depolama sistemleri.
- **Zorluklar:** Maliyet, hammadde (kobalt, lityum) bağımlılığı, geri dönüşüm süreçlerinin sınırlı olması.

Alternatif Batarya Teknolojileri

- **Lityum Demir Fosfat (LFP):** Daha güvenli, termal kaçak riski düşük. Özellikle Çin’de yaygın.
- **Sodyum-ion Bataryalar:** Daha ucuz hammaddelerle üretiliyor, yeni nesil enerji depolamada umut vaat ediyor.
- **Akış Bataryaları (Flow Batteries):** Vanadyum redoks bataryalar uzun ömürlüdür, büyük ölçekli sabit depolamada avantajlıdır.
- **Çinko-Hava Bataryalar:** Yüksek enerji yoğunluğu sağlar, henüz ticari ölçeğe ulaşma aşamasındadır.

Türkiye Perspektifi

Türkiye’de üniversiteler ve TÜBİTAK destekli projeler, lityum iyon bataryaların yerleştirilmesi ve sodyum-ion batarya araştırmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca savunma sanayiinde milli batarya teknolojileri geliştirilmesi stratejik önceliktir.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jieas/issue/74752/1183719>

Kaynak: <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>

3. Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) ve Düzenlenmesi

Batarya Yönetim Sistemleri BMS Nedir?

Batarya Yönetim Sistemleri (Battery Management Systems – BMS), bataryaların güvenli ve verimli çalışmasını sağlayan elektronik kontrol üniteleridir.

Görevleri:

- Hücre gerilimlerini dengelemek.
- Sıcaklık kontrolü yapmak.
- Şarj/deşarj akımlarını yönetmek.
- Batarya sağlığını (State of Health – SoH) ve doluluk oranını (State of Charge – SoC) hesaplamak.

Dijital Yönetim ile BMS

Yeni nesil BMS sistemleri, IoT ve yapay zeka tabanlı yazılımlarla desteklenmektedir. Bu sayede:

- **Arızalar önceden tahmin edilebilir.**
- **Uzaktan izleme ile batarya ömrü optimize edilebilir.**
- **Şebeke entegrasyonu daha güvenli hale gelir.**

Düzenleyici Çerçeve

Türkiye’de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, batarya sistemlerinin güvenliği için standartlar geliştirmektedir. Avrupa Birliği’nde ise **Battery Regulation (2023)**, geri dönüşüm, sürdürülebilirlik ve performans standartlarını zorunlu hale getirmiştir.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazibtd/issue/68076/1078829>

Kaynak: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries_en

4. Ölçeklenebilir ve Dağıtık Depolama Çözümleri

Şebeke Ölçeğinde Depolama

- **Örnek:** 100 MW’lık bir güneş santraline entegre edilen 50 MW’lık batarya sistemi, gün içinde üretilen fazla enerjiyi akşam saatlerinde şebekeye aktarabilir.
- **Avantaj:** Talep yanıtı, yük dengeleme ve elektrik fiyatlarının optimize edilmesi.

Konut ve İşletme Ölçeğinde Depolama

- **Konutlar:** Çatı GES sistemleriyle entegre küçük bataryalar, hem kendi tüketimini optimize eder hem de şebekeye fazla enerji satışı yapılmasına olanak tanır.
- **İşletmeler:** Kritik tesislerde kesintisiz enerji sağlamak için UPS sistemleriyle birlikte kullanılabilir.

Dağıtık Depolama

Dağıtık depolama, bataryaların yalnızca büyük santrallerde değil; farklı noktalarda (ev, fabrika, elektrikli araç şarj istasyonu vb.) yerleştirilmesiyle oluşur. Bu yaklaşım:

- Şebeke üzerindeki baskıyı azaltır.
- Mikro şebekelerin bağımsız çalışmasını sağlar.
- Elektrikli araçların bataryalarının şebekeye enerji sağlayabildiği **V2G (Vehicle-to-Grid)** sistemlerini mümkün kılar.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/74815/1195840>

Kaynak: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/SHURA-2022-03-Turkiyede-Enerji-Sektorunun-Dijitallesmesi.pdf>

Tablo – Batarya Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Teknoloji	Enerji Yoğunluğu	Ömür	Maliyet	Avantaj	Dezavantaj
Lityum-ion	Yüksek	Orta	Orta-Yüksek	Yaygın, hızlı şarj	Hammadde bağımlılığı
LFP	Orta	Uzun	Orta	Güvenli, dayanıklı	Daha düşük yoğunluk
Sodyum-ion	Orta	Orta	Düşük	Ucuz hammadde	Henüz erken aşama
Flow	Düşük	Çok uzun	Yüksek	Büyük ölçek için uygun	Düşük enerji yoğunluğu
Çinko-Hava	Çok yüksek	Orta	Düşük	Yüksek enerji	Ticarileşme aşamasında

Enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasının temelini oluşturur. **BESS sistemleri**, şebekede esneklik ve güvenlik sağlarken; **yeni batarya teknolojileri** (sodyum-ion, akış bataryaları vb.) gelecekte maliyetleri daha da düşürecektir.

Batarya yönetim sistemleri (BMS), güvenlik ve verimlilik için vazgeçilmezdir. Ayrıca **dağıtık depolama çözümleri**, mikro şebekeler ve elektrikli araç entegrasyonu ile geleceğin enerji altyapısında önemli bir rol oynayacaktır.

Türkiye, hem akademik hem de endüstriyel düzeyde bu teknolojilerin geliştirilmesi için yoğun çalışmalar yürütmektedir. Dijital optimizasyon ile entegre depolama çözümleri, ülkemizin enerji bağımsızlığı ve karbon nötr hedeflerine ulaşmasında kritik katkı sağlayacaktır.

4.4.3 Mekanik ve Termal Depolama

Enerji depolama teknolojileri yalnızca batarya sistemlerinden ibaret değildir. Dünya genelinde **mekanik ve termal enerji depolama yöntemleri**, hem şebeke ölçeğinde hem de endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol üstlenmektedir.

Mekanik depolama, enerjinin potansiyel, kinetik veya basınç enerjisi şeklinde saklanmasına dayanırken; termal depolama ise enerjinin ısı formunda depolanması prensibine dayanır. Her iki yöntem de büyük ölçekli uygulamalar için uzun ömürlü, güvenilir ve çevre dostu çözümler sunar.

1. Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PHES)
2. Sıkıştırılmış Hava ve Yeraltı Enerji Depolama (CAES & LAES)
3. Termal Enerji Depolama (TES) Yöntemleri
4. Mekanik ve Termal Depolamanın Dijital Yönetimi

1. Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PHES)

PHES, elektrik enerjisinin fazla üretildiği zamanlarda suyun yüksek bir seviyeye pompalanması ve ihtiyaç halinde bu suyun türbinlerden geçirilerek elektrik üretilmesi prensibine dayanır.

Özellikler

- **Verimlilik:** %70–85
- **Kapasite:** 100 MW – 3 GW arası
- **Ömür:** 40–80 yıl
- **Avantajı:** Büyük ölçekli enerji depolama kapasitesi, uzun süreli enerji sağlama

Türkiye’de Durum

Türkiye’de henüz tam ölçekli pompaj depolamalı hidroelektrik santrali bulunmamaktadır, ancak **ETKB 2035 Stratejik Planı** içinde bu tip yatırımların teşvik edilmesi öngörülmüştür. Özellikle rüzgar ve güneş santralleri ile birlikte düşünülmektedir.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jes/issue/73074/1131617>

2. Sıkıştırılmış Hava ve Yeraltı Enerji Depolama (CAES & LAES)

Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama (CAES)

CAES sistemlerinde fazla elektrik enerjisi, hava kompresörleri aracılığıyla yüksek basınçlı depolama alanlarına (genellikle yer altı mağaraları) gönderilir. İhtiyaç anında bu hava türbinlere verilerek elektrik üretilir.

- **Verimlilik:** Geleneksel CAES %40–50, yeni nesil “adiyabatik” CAES %70’e kadar.
- **Avantajlar:** Büyük kapasiteli depolama, düşük işletme maliyeti.
- **Dezavantajlar:** Yer seçimi kısıtlı, yatırım maliyeti yüksek.

Sıvılaştırılmış Hava Enerji Depolama (LAES)

LAES teknolojisi, havanın -196 °C’de sıvılaştırılarak depolanmasına dayanır. Depolanan sıvı hava, ısıtılarak genişlediğinde türbinleri çalıştırır.

- **Avantaj:** Yüksek enerji yoğunluğu, şehir içi uygulamalara uygunluk.
- **Dezavantaj:** Yüksek soğutma maliyeti.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/74815/1195840>

Kaynak: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22003127>

3. Termal Enerji Depolama (TES) Yöntemleri

Termal enerji depolama, enerjinin ısı veya soğuk formunda saklanarak daha sonra elektrik veya ısıtma/soğutma amaçlı kullanılmasıdır.

Yöntemler

- **Duyulur Isı Depolama (Sensible Heat Storage)**
 - Malzemenin sıcaklığını artırarak ısı depolar.
 - En yaygın örnek: Su tankları, erimiş tuz sistemleri.
 - Verimlilik: %50–90
- **Gizli Isı Depolama (Latent Heat Storage)**
 - Faz değişim malzemeleri (PCM) kullanılır. Katı-sıvı veya sıvı-gaz geçişlerinde yüksek miktarda enerji depolanır.
 - Avantaj: Daha yüksek enerji yoğunluğu.
- **Termokimyasal Depolama (Thermochemical Storage)**
 - Kimyasal reaksiyonlar kullanılarak enerji depolanır.
 - Henüz ticari aşamaya tam ulaşmamıştır ancak uzun süreli enerji depolamada umut vericidir.

Kullanım Alanları

- Güneş termal santralleri (örneğin İspanya'daki **Gemsolar Santrali**)
- Bölgesel ısıtma ve soğutma sistemleri
- Endüstriyel fırınlar ve prosesler

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jes/issue/73074/1131617>

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/74815/1195840>

4. Mekanik ve Termal Depolamanın Dijital Yönetimi

Akıllı İzleme

IoT sensörleri ve SCADA sistemleri ile pompaj hidroelektrik santralleri, termal depolama tankları ve sıkıştırılmış hava tesisleri anlık olarak izlenebilir.

Yapay Zeka ve Optimizasyon

- Ne zaman enerji depolanacağı ve ne zaman şebekeye aktarılacağı **makine öğrenmesi** algoritmalarıyla belirlenir.
- Rüzgar ve güneş tahminleriyle entegre edildiğinde arz-talep dengesi daha iyi yönetilir.

Örnek Senaryolar

- Bir rüzgar santralinde üretilen fazla enerji, PHES sistemine pompalanır ve akşam saatlerinde şebekeye aktarılır.
- Güneş enerjisiyle çalışan bir bölgesel ısıtma sistemi, gündüz PCM depolamada enerji biriktirip gece bina ısıtmasında kullanır.

Kaynak: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/SHURA-2022-03-Turkiyede-Enerji-Sektorunun-Dijitallesmesi.pdf>

Mekanik ve Termal Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Teknoloji	Kapasite (MW)	Verimlilik	Ömür	Avantaj	Dezavantaj
PHES	100–3000	%70–85	40–80 yıl	Büyük ölçekli, uzun ömürlü	Yüksek yatırım, coğrafi kısıt
CAES	50–500	%40–70	30–50 yıl	Büyük kapasite	Yer seçimi kısıtlı
LAES	5–200	%50–60	20–40 yıl	Şehir içi uygun	Yüksek soğutma maliyeti
Duyulur Isı (Su/Tuz)	1–500	%50–90	20–40 yıl	Basit, güvenilir	Düşük yoğunluk
PCM	1–50	%70–90	10–30 yıl	Yüksek enerji yoğunluğu	Yüksek maliyet
Termokimyasal	1–100	%40–75	20–40 yıl	Uzun süreli depolama	Ticari değil

Mekanik ve termal depolama teknolojileri, **enerji geçişinin omurgası** olarak kabul edilmektedir. Özellikle pompaj hidroelektrik ve termal depolama yöntemleri, şebekelerin yenilenebilir enerjiyle uyumlu hale getirilmesinde kritik rol oynar.

Batarya teknolojileri kısa süreli çözümler sunarken; **mekanik ve termal depolama** uzun süreli ve büyük ölçekli çözümler için daha uygundur. Türkiye’de bu alanda atılacak adımlar, enerji arz güvenliğini artıracak ve karbon nötr hedeflerine katkı sağlayacaktır.

4.4.4 Hibrit Enerji Depolama Sistemleri

Enerji geçişinde en önemli zorluklardan biri **yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasıdır**. Güneş yalnızca gündüz, rüzgar ise uygun meteorolojik koşullarda üretim yapar. Tek başına batarya, mekanik ya da termal depolama yöntemleri bu dalgalanmaları karşılamada yetersiz kalabilir. Bu nedenle son yıllarda **hibrit enerji depolama sistemleri (HESS)** öne çıkmaktadır.

Hibrit sistemler, farklı depolama teknolojilerini tek bir entegre yapı altında birleştirerek hem kısa süreli hem uzun süreli enerji ihtiyacını karşılar. Örneğin bir sistemde bataryalar ani yük değişimlerini yönetirken, pompaj hidroelektrik ya da termal depolama uzun süreli enerji sağlar.

1. Hibrit Enerji Depolamanın Temel Prensipleri

- **Çift Katmanlı Yaklaşım:** Kısa süreli depolama (batarya, süperkapasitör) + uzun süreli depolama (PHES, CAES, termal).
- **Enerji Yönetim Sistemi (EMS):** Akıllı yazılımlar hangi teknolojinin ne zaman devreye gireceğini belirler.
- **Verimlilik Artışı:** Tek tip depolamaya göre daha yüksek toplam verimlilik sağlar.
- **Maliyet Dengesi:** Bataryaların yüksek maliyetini, daha ucuz uzun süreli depolama sistemleriyle dengeleyebilir.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/72942/1125691>

2. Hibrit Sistem Tipleri

a) Batarya + Süperkapasitör

- **Amaç:** Ani güç dalgalanmalarını yönetmek.
- **Örnek:** Elektrikli araçlarda, süperkapasitör ani hızlanmalarda devreye girerken batarya uzun süreli enerji sağlar.
- **Avantaj:** Batarya ömrü uzar.

b) Batarya + Pompaj Hidroelektrik (PHES)

- **Amaç:** Güneş ve rüzgar üretim fazlasını uzun vadede saklamak.
- **Örnek:** Almanya ve Çin'de hibrit projeler.
- **Avantaj:** Bataryalar kısa süreli şebeke stabilizasyonunu sağlarken PHES uzun süreli güvenilirlik sunar.

c) Batarya + Termal Enerji Depolama (TES)

- **Amaç:** Hem elektrik hem ısı ihtiyacını karşılamak.
- **Örnek:** Türkiye'de bazı organize sanayi bölgelerinde pilot uygulamalar planlanmaktadır.
- **Avantaj:** Çift yönlü kullanım (ısıtma/soğutma + elektrik).

d) Çoklu Hibrit Sistemler

- **Örnek:** Batarya + Süperkapasitör + PHES
- **Avantaj:** Şebeke dengeleme, frekans kontrolü, pik yük yönetimi ve yedek enerji sağlama.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijisae/issue/67894/1038992>

3. Türkiye'de Hibrit Enerji Depolama Yaklaşımları

Türkiye'de **Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) projeleri** kapsamında hibrit depolama sistemleri gündeme alınmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2035 stratejisinde:

- 5 GW batarya depolama kapasitesi
- Mekanik ve termal depolama entegrasyonu
- Dağıtık enerji kaynaklarının hibrit yönetimi

öngörülmektedir.

Kaynak: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/SHURA-2022-03-Turkiyede-Enerji-Sektorunun-Dijitallesmesi.pdf>

4. Hibrit Sistemlerin Dijital Yönetimi

Hibrit enerji depolama sistemlerinin başarısı, **dijital kontrol ve optimizasyon teknolojilerine** bağlıdır.

- **Yapay Zeka (AI):** Rüzgar ve güneş tahminleriyle entegre edilerek hangi depolama ünitesinin devreye gireceğini belirler.
- **Blokzincir Tabanlı Enerji Ticaret Sistemleri:** Dağıtık hibrit depolama birimleri arasında şeffaf ticaret yapılabilir.

- **IoT Tabanlı İzleme:** Batarya sıcaklığı, su seviyesi, termal depolama sıcaklığı gerçek zamanlı izlenir.

5. Gelecek Trendleri

- **Batarya + Hidrojen Hibrit Sistemleri**
 - Fazla enerji elektrolizle hidrojen üretir. Hidrojen uzun vadeli enerji taşır, batarya ise anlık stabilizasyon sağlar.
- **Mikro Şebeke Tabanlı Hibrit Uygulamalar**
 - Üniversite kampüsleri, sanayi bölgeleri ve akıllı şehirlerde hibrit depolama sistemleri kullanılarak enerji bağımsızlığı sağlanabilir.
- **Mobil Hibrit Sistemler**
 - Elektrikli otobüsler ve trenlerde süperkapasitör + batarya + rejeneratif frenleme kombinasyonu.

Kaynak: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821001633>

Hibrit Sistem Kombinasyonlarının Karşılaştırılması

<i>Hibrit Model</i>	<i>Kullanım Alanı</i>	<i>Avantaj</i>	<i>Dezavantaj</i>
<i>Batarya + Süperkapasitör</i>	EV, metro, UPS	Hızlı tepki, batarya ömrü uzun	Yüksek maliyet
<i>Batarya + PHES</i>	Şebeke ölçeği	Kısa + uzun süreli dengeleme	Coğrafi kısıt
<i>Batarya + TES</i>	Endüstriyel, OSB	Elektrik + ısı entegrasyonu	Verim kaybı
<i>Batarya + Hidrojen</i>	Uzun vadeli depolama	Karbonsuz çözüm	Hidrojen altyapısı eksik
<i>Çoklu Hibrit (Batarya + SC + PHES)</i>	Akıllı şebekeler	En yüksek güvenilirlik	Yüksek yatırım gerektirir

Hibrit enerji depolama sistemleri, **tek bir teknolojiye bağımlılığı azaltarak** hem teknik hem ekonomik avantajlar sağlar. Özellikle:

- Şebeke stabilizasyonu
- Yenilenebilir entegrasyonu
- Enerji arz güvenliği

için kritik öneme sahiptir.

Türkiye'nin 2035 vizyonunda hibrit depolama, yalnızca elektrik şebekelerinde değil, **sanayi, ulaşım ve binalarda** da yaygınlaşacaktır.

4.4.5 Küresel Dijital Enerji Dönüşümü

yüzyılda enerji sektöründe yaşanan en önemli dönüşüm, **dijitalleşme ile yenilenebilir enerji kaynaklarının birleşmesidir**. Geleneksel enerji yönetimi; merkezi üretim, manuel kontrol ve sınırlı veri analizi üzerine kuruluyken günümüzde **yapay zeka (AI), Nesnelerin İnterneti (IoT), blokzincir ve büyük veri (Big Data)** gibi teknolojilerle akıllı ve öngörücü bir yapıya dönüşmektedir.

Bu dönüşüm yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel etkileri de kapsamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2025 sonrası için **dijitalleşmenin enerji arz güvenliği ve karbon azaltımında en az yenilenebilir enerji yatırımları kadar kritik olduğunu** vurgulamaktadır.

1. 2025 Enerji Teknolojileri Trendleri

a) Yapay Zeka ile Enerji Yönetimi

- **Tahminleme:** Güneş ve rüzgar üretiminin saatlik tahminleri.
- **Otomasyon:** Fabrika, bina ve şehir ölçeğinde gerçek zamanlı enerji optimizasyonu.
- **Anomali Tespiti:** Enerji kayıplarının ve arızaların erken tespiti.

b) Dijital İkiz (Digital Twin) Teknolojisi

- Enerji santrallerinin sanal kopyaları oluşturularak **performans optimizasyonu** yapılır.
- Türkiye'de 2023'ten itibaren hidroelektrik ve rüzgar santrallerinde pilot uygulamalar başlatılmıştır.

c) Akıllı Şebekeler

- Tüketici yalnızca kullanıcı değil, aynı zamanda üretici (prosumer) haline gelir.
- Akıllı sayaçlar, talep yanıtı (demand response) ve mikro şebekeler yaygınlaşır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/73943/1129031>

2. TOPCon ve Perovskit Güneş Teknolojileri

a) TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

- Yeni nesil güneş panellerinde %25'e varan verimlilik.
- Çin ve ABD'de büyük ölçekli üretim 2025 itibarıyla başlıyor.

- Türkiye’de lisanssız enerji yatırımlarında denenmeye başlanmıştır.

b) Perovskit Güneş Hücreleri

- Daha hafif, esnek ve şeffaf paneller üretme potansiyeli.
- Binaların cam cephelerinde ve elektrikli araçların yüzeylerinde enerji üretme imkanı.
- Henüz laboratuvar ölçeğinde olsa da **2030 sonrası ticari yaygınlık** beklenmektedir.

Güneş Teknolojilerinde Karşılaştırma

Teknoloji	Verimlilik	Ticari Durum	Avantaj	Dezavantaj
Si-PV (Klasik)	%18–22	Yaygın	Ucuz, güvenilir	Yüksek alan ihtiyacı
TOPCon	%23–25	2025 sonrası	Yüksek verim, kararlı	Yüksek üretim maliyeti
Perovskit	%28+ (laboratuvar)	2030 sonrası	Esnek, şeffaf	Dayanıklılık sorunu

Kaynak: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123001194>

3. Enerji Depolama Maliyetlerindeki Düşüş Trendleri

Enerji depolamanın geleceği, **batarya maliyetlerinin düşüş hızına** bağlıdır. BloombergNEF raporlarına göre:

- **2010’da 1200 \$/kWh** olan lityum-ion batarya fiyatları,
- **2023’te 150 \$/kWh** seviyesine inmiştir.
- **2030’da 60–70 \$/kWh** seviyelerine inmesi bekleniyor.

Bu trend, **elektrikli araçlar, şebeke ölçekli depolama ve hibrit sistemlerin yaygınlaşmasını** hızlandıracaktır.

Türkiye açısından kritik olan, **batarya üretim ekosisteminin yerleştirilmesi** ve Ar-Ge yatırımlarının artırılmasıdır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/73045/1134509>

4. Küresel Dijital Enerji Ekosisteminde Türkiye’nin Konumu

- **YEKA projeleri** kapsamında dijital kontrol sistemleri zorunlu hale getirilmiştir.
- **EPDK düzenlemeleri** ile batarya depolama ve hibrit çözümler için piyasa entegrasyonu desteklenmektedir.
- **Üniversite-sanayi işbirliği** ile yapay zeka tabanlı enerji yönetim yazılımları geliştirilmektedir.

Türkiye'nin en büyük avantajı, **genç mühendis kadrosu ve hızlı adaptasyon kapasitesidir**. Ancak donanım tarafında (batarya, güç elektroniği) ithalat bağımlılığı sürmektedir.

Kaynak: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/03/SHURA-2022-03-Turkiyede-Enerji-Sektorunun-Dijitallesmesi.pdf>

5. Dijital Enerji Dönüşümünde Gelecek Senaryoları

a) 2030 Senaryosu

- %50'den fazla elektrik yenilenebilir.
- Dijital ikiz teknolojisi tüm santrallerde standart.
- Enerji blokzinciri ticareti yaygın.

b) 2040 Senaryosu

- Fosil yakıtlı enerji üretimi %20'nin altına düşmüş.
- Küresel karbon ticareti tamamen dijital platformlara taşınmış.
- Yapay zeka tabanlı **tamamen otonom enerji şebekeleri**.

c) Türkiye'ye Özel Projeksiyon

- 2035'e kadar **en az 5 GW batarya kapasitesi**.
- Akıllı şehirlerde hibrit depolama sistemleri.
- Enerji ve karbon izleme yazılımlarının tüm OSB'lerde kullanılması.

Küresel dijital enerji dönüşümü, sadece teknolojik bir gelişme değil, aynı zamanda **ekonomik ve sosyal bir dönüşüm sürecidir**.

- **Yapay zeka ve IoT** sayesinde enerji şebekeleri kendi kendine öğrenebilen sistemlere dönüşmektedir.
- **TOPCon ve perovskit teknolojileri** güneş enerjisinde devrim yaratacaktır.
- **Enerji depolama maliyetlerindeki düşüş** ile yenilenebilir kaynakların kesintisiz kullanımı mümkün olacaktır.

Türkiye'nin bu dönüşümde **erken hareket etmesi**, gelecekte enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilir kalkınma için kritik bir avantaj sağlayacaktır.

4.5 Hidrojen Enerjisi Sektörel Bilgi Ve Yol Haritası Raporu

4.5.1 Yönetici Özeti

Güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal ve hidroelektrik gibi sürdürülebilir enerji kaynakları, çevresel etkilerden arındırılmış enerji üretimi için öncelikli tercihler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi, enerji taşıyıcısı olarak, yenilenebilir kaynakların etkin kullanımını sağlayan ve sıfır karbon emisyonu ile geleceğin temiz enerji çözümleri arasında gösterilmektedir. Türkiye'nin içinde bulunduğu teknoloji ve enerji dönüşüm çağı hidrojen enerjisini başrol oyuncusu olarak ön plana çıkarmıştır. Hidrojen üretim yöntemleri, fosil yakıtlara dayalı geleneksel süreçlerden yenilenebilir enerji tabanlı elektroliz yöntemlerine kadar çeşitlilik göstermektedir. Raporda, hidrojen üretiminde kullanılan teknolojiler (alkali, PEM, SOEC elektrolizörler gibi) detaylandırılmış, maliyet analizleri ve verimlilik odaklı gelişmeler ele alınmıştır. Ayrıca, hidrojenin taşınması ve depolanmasıyla ilgili kara, deniz ve demir yolu altyapıları ile küresel örnekler sunulmuştur. Türkiye özelinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının zenginliği ve enerji dönüşümüne katkı potansiyeli analiz edilerek, ülkenin hidrojen stratejisi ve uluslararası iş birliği fırsatları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Türkiye'nin jeopolitik avantajları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimindeki büyüme potansiyeli vurgulanmıştır. Sonuç ve önerilerde ise Türkiye'nin özellikle yeşil hidrojen geleceği için farklı alanlarda meyvesini çabuk verebilecek adımlar yer almıştır.

4.5.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji; doğada kendiliğinden bulunan, sürekliliği devam eden, çevreye ve doğaya fosil yakıtlardan ziyade salınım yapmayıp zarar vermeyen enerji türüdür. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları şunlardır; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerjisi, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisidir.

4.5.2.1 Güneş Enerjisi

Güneşte çok büyük oranda bulunan hidrojen gazlarının helyuma dönüşmesi sırasında açığa çıkan ışınların enerjilerine güneş enerjisi denilmektedir. Bu ışınlar güneş panelleri sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Dünya genelinde güneş enerjisi kullanımına baktığımızda önde gelen ülkeler Çin, ABD ve Japonya'dır. Türkiye'de 7.960 MW güneş enerjisi üretilirken Çin'de 306.973 MW enerji üretildiği görülmektedir.¹Türkiye'de coğrafi konumundan kaynaklı güneşlenme süresi bakımından önemli bir konuma sahiptir. Türkiye'nin güneş alma potansiyeline bakıldığında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırladığı Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre veriler aşağıdaki gibidir;

- ❖ Ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi = 2741,07 saat/yıl
- ❖ Ortalama günlük toplam güneşlenme süresi = 7,50 saat/gün
- ❖ Ortalama yıllık toplam ışınlam şiddeti = 1527,46 kwh/m²-yıl
- ❖ Ortalama günlük toplam ışınlam şiddeti = 4,18 kwh/m²-gün²

¹ <https://www.piagrid.com/rehber/turkiye-gunes-isinim-degerleri>

² <https://enerji.gov.tr/gunes-bilgimerkezi>

Türkiye’de güneşlenme süreleri ve güneş enerjisi potansiyeli en yüksek bölgeler Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgeleridir. Bu bölgeleri sırasıyla Doğu Anadolu, İç Anadolu, Ege ve Marmara bölgeleri takip eder. Güneyden kuzeye gittikçe ortalama güneşlenme süresi azalmaktadır.³

Ülkemizde güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha az maliyeti olması, hammadde bakımından sıkıntı yaşanmaması, sürdürülebilir, temiz ve süreklilik sağlamasından kaynaklı tercih edilmektedir. Gelişen teknoloji ile beraberinde farklı sistemler geliştirilip kurularak güneşlenme süresini uzatarak üretim yapılmasının önünü açarak gelişimini sürdürmektedir. Ülke nüfusunun artması ve temiz yenilenebilir enerjiye olan ihtiyacının fazlaşması nedeniyle güneş enerjisinde de artış olacağı öngörülmektedir.

4.5.2.2 Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr en basit şekilde havanın yer değiştirmesiyle ve yer yüzeyinde ve atmosferde oluşan sıcaklık ve basınç farkından kaynaklı oluşan hava akımıdır. Rüzgâr bir diğer adıyla yel geçmişte enerjisinden çok fazla yararlanılmıştır.⁴ Günümüz şartlarında ise rüzgâr enerjisi daha çok elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Dünya genelinde farklı bilim insanları rüzgâr türbinleri üzerinde çalışmalar yapıp rüzgâr türbinlerini geliştirmiştir.

1979’da Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretmesiyle başlamıştır. Bu üretimler bugünkü standartlardan küçüktür ve her bir türbin neredeyse 20-30 kW civarındadır. Daha sonra ise kapasitelerini 7 MW’a çıkartmışlar ve birçok ülkeye yayılmışlardır.⁵ 1939 yılında ABD, Vermont, Granpa’s Knob’da 53 metre çapında 1,25 MW’lık Smith Put- nam rüzgâr türbini kurulmuştur. Rüzgâr türbini geliştirilmesinde bir sonraki dönüm noktası ise Gedser rüzgâr türbinidir. Marshall planı savaş sonrası finansman yardımı ile 1956 – 1957’de Danimarka’nın güney doğusunda Gedser adasında 200 kW’lık 24 metre çapında bir rüzgâr tür- bini kurulmuştur. Bu makine 1958 – 1967 arasında %20 kapasite ile çalışmıştır.1960’lı yılların başında Prof.Ulrich Hütter 100 kW’lık 34 metrelik bir 2 kanatlı, yüksek rüzgâr hızlı kararsız pervanesi olan Hütter Allgaier rüzgâr türbinini geliştirilmiştir.1980 yılında merkezi devlet ve federal devlet enerji ve yatırım vergi kredileri toplam %50’ye yakın vergi kredisi sağlamasından dolayı California rüzgâr enerjisi patlamasını başlatmıştır. 1980 – 1995 arasında, çoğu vergi kredilerinin %15 civarına indirildiği 1985’ten sonra olmak üzere 1700 MW rüzgâr kapasitesi kurulmuştur. 1990’lı yılların başında Almanya’da yılda 200 MW civarında kapasite artışı ile kuzey Avrupa piyasalarında çarpıcı gelişme kaydedilmiştir. Günümüzde ise tek bir rüzgâr türbininin gücü megawattlarla ifade edilecek kadar artmış ve armaya devam etmektedir. Şu an kullanılan 7-10 MW güçlü rüzgâr türbinleri vardır.⁶

Türkiye’deki rüzgâr enerji potansiyeli yıllık ortalama değerler esas alındığında, Türkiye’nin en iyi rüzgâr kaynağı alanları kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye’nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgâr hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgâr gücü yoğunluğu Türkiye’nin orta kesimleri boyunca mevcuttur. Türkiye Rüzgâr Santralleri Atlasına göre Marmara Bölgesinde; Balıkesir, İstanbul, Çanakkale, Ege Bölgesinde; İzmir, Manisa Doğu Akdeniz çevresinde Hatay Rüzgâr Santrallerinin yoğun olarak yer aldığı illerdir. Yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinin yüksek potansiyele sahip olduğu

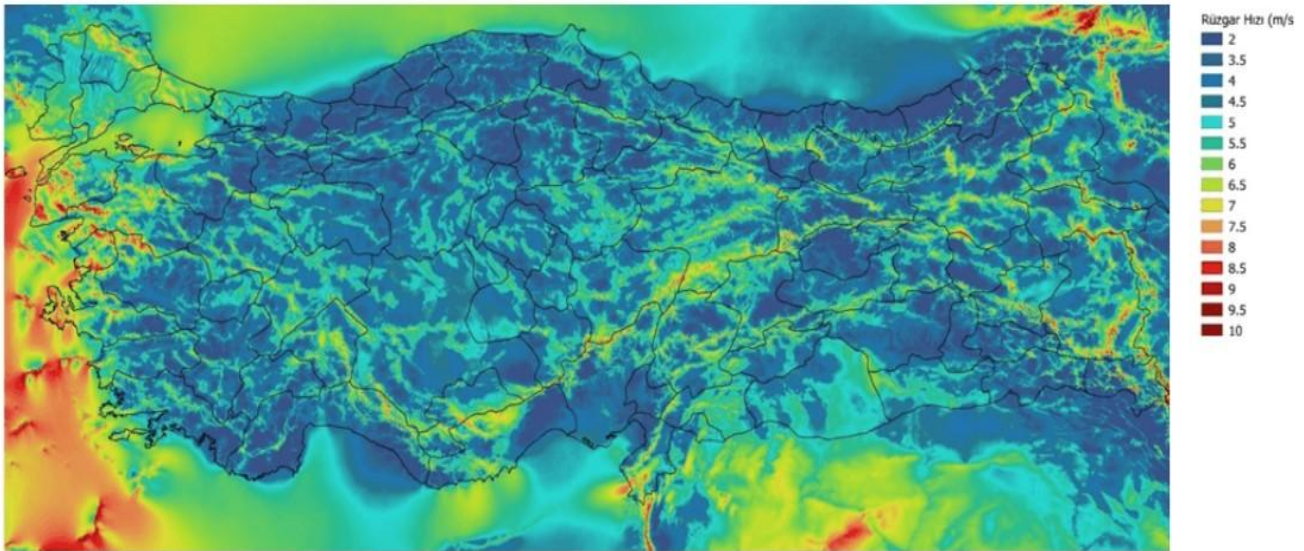
³ <https://www.piagrid.com/rehber/turkiye-gunes-enerji-potansiyeli>

⁴ <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/4-ruzgar-enerjisi-tarihcesi-ve-turkiyedeki-gelisimi/>

⁵ <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/4-ruzgar-enerjisi-tarihcesi-ve-turkiyedeki-gelisimi/>

⁶ <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/4-ruzgar-enerjisi-tarihcesi-ve-turkiyedeki-gelisimi/>

görülmektedir. 7 m/s'den büyük rüzgâr hızları göz önüne alınarak Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir.⁷



Rüzgâr enerjisi arazilerde az yer kaplamasından, doğru konumlarda kurulduğunda hammadde enerjisi yaşamamasından, doğaya herhangi bir salınım yapmamasından, temiz, sürdürülebilir enerji kaynağından olmasından dolayı tercih edilen yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır.

⁷ <https://tureb.com.tr/eng/kurumsal/neden-ruzgar-enerjisi/3>

⁸ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>

4.5.2.3 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle; canlı mikroorganizmaların veya onların atıklarının oluşturduğu bitki örtüsü, odun, bitki atıkları, tarımsal atıklar, hayvansal atıklar (mezbaha atıkları, dışkıları vb.) veya şehir atık sularının oksijensiz ortamda çürütülerek oluşturulmasıdır. Bu atıkların uygun ortam ve koşullarda muhafaza edilerek çıkardıkları gazı biyogaz, bu biyogazın yakılması sonucunda ise biyokütle enerjisi meydana gelmektedir.

5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'una göre biyokütle; ile ithal edilmemek kaydıyla, kentsel atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları dâhil olmak üzere tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünler ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları olarak tanımlanmaktadır.⁹

10

Biyoenerji kullanımı "geleneksel" ve "modern" olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Geleneksel kullanım, odun, hayvan atığı ve geleneksel kömür gibi formlardaki biyokütlenin yanmasını ifade etmektedir. Modern biyoenerji teknolojileri, bagasse ve diğer bitkilerden üretilen sıvı biyo-yakıtları; biyo-rafinerileri, kalıntıların anaerobik sindirimi yoluyla üretilen biyogaz, odun pelet ısıtma sistemleri ve diğer teknolojilerdir.¹¹ Başlıca biyokütle kaynakları şu şekildedir;

4.5.2.4 Tarımsal Biyokütle Kaynakları

- ❖ Yağlı tohumlu bitkiler (kanola, ayçiçeği, soya vb.)
- ❖ Şeker ve nişasta bitkileri (patates, buğday, mısır, şeker pancarı vb.)
- ❖ Elyaf bitkileri (keten, kenevir, sorgum, miskantus, vb.)
- ❖ Bitkisel artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk, vb.)

4.5.2.5 Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- ❖ Orman ve ormancılık endüstrisi atık ve artıkları, enerji ormanları, enerji bitkileri.

4.5.2.6 Hayvansal Biyokütle Kaynakları

- ❖ Büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar.

4.5.2.7 Kentsel ve Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- ❖ Biyolojik kökenli endüstri atıkları, belediye atıkları, arıtma çamurları.¹²

⁹ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle>

¹⁰ <https://www.hmi.com.tr/19-biyokutle-enerji-uretim-santral-otomasyonu--blog-detay>

¹¹ https://yenader.org/tr_tr/biyokutle-enerjisi-nedir/

¹² <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle>

Biyokütle enerjisinin tarihçesi çok eskiye dayanmaktadır. İnsanlar önceki çağlarda ve dünyanın birçok yerinde ısınmak için odunları, bitki atıklarını, hayvan dışkılarını kullanmaktadırlar. Örneğin, odunun direkt yakılmasıyla elde edilen ısı enerjisi yemek pişirmede ve ısınmada kullanılmaktadır. 21. yüzyılda biyokütlenin modern kullanımı ise enerji yoğunluğunun artırılarak fuel yakıtta çevrilmesini içermektedir.¹³

Dünya’da kullanılan biyokütle enerjisinin yarısından fazlası geleneksel biyokütle kullanımından oluşmaktadır. Biyokütle, Brezilya, Hindistan ve Çin gibi artan talebe sahip kalabalık ülkelerde enerji arzını artırma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Isıtma veya elektrik üretimi için doğrudan yakılabilir veya yağ, gaz ikamelerine dönüştürülebilir. Akaryakıt sektöründe çoğunlukla benzin için uygun bir yenilenebilir ikame maddesi olan sıvı biyoyakıtlar kullanılır. Brezilya sıvı biyo-yakıtlarda liderdir.¹⁴

Türkiye’de kullanılan biyokütle enerjisi tarımsal kökenli olduğundan genellikle bitki kökenlidir. Türkiye’nin yıllık 117 milyar ton civarında biyokütle potansiyeli bulunmaktadır. Bu değer yıllık 32 Mtep’dir. Bu potansiyel içinde en büyük pay yıllık bitkilere aittir (14,5 Mtep). Bitkileri takiben orman atıkları (5,4 Mtep), çok yıllık bitkiler (4,1 Mtep) gelir. Türkiye’nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz miktarının 1,5-2 Mtep olduğu tahmin edilmektedir.¹⁵

Gaz Biyoyakıtlar;

- ❖ Biyohidrojen
- ❖ Biyogaz
- ❖ CO+H₂

Katı Biyoyakıtlar;

- ❖ Odun Kömürü-Biyokömür
- ❖ Biyopelet-Biyobriket

Sıvı Biyoyakıtlar;

- ❖ Biyoetanol
- ❖ Biyodizel
- ❖ Biyometanol
- ❖ Biyodimetileter
- ❖ Biyoetiltersiyerbutileter
- ❖ Bitkisel Yağlar¹⁶¹⁷



4.5.3 Jeotermal Enerji

Jeotermal; jeo- yerküre, termal-ısı demek olup yerkabuğunun farklı derinliklerindeki ısınin oluşturduğu kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve çeşitli gazlardır. Jeotermal enerji ise yeraltından çıkan sıcak su, buhar ve çeşitli gazların doğrudan veya dolaylı santrallerde kullanılmasıdır.

¹³ <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/204132>

¹⁴ https://yenader.org/tr_tr/biyokutle-enerjisi-nedir/

¹⁵ https://yenader.org/tr_tr/biyokutle-enerjisi-nedir/

¹⁶ https://cdn.bartın.edu.tr/biyoteknoloji/86babca0507e88ae8f7ecb1dea802c6b/sunum2-biyokutle-biyoyakit-uretimi-siniflandirilmasi_wc03Xof.pdf

¹⁷ https://cdn.bartın.edu.tr/biyoteknoloji/86babca0507e88ae8f7ecb1dea802c6b/sunum2-biyokutle-biyoyakit-uretimi-siniflandirilmasi_wc03Xof.pdf

Jeotermal enerji; Jeotermal ısı merkezine gelen jeotermal akışkanın enerjisi eşanjörler ile kapalı çevrimde dolaşan temiz suya aktarılmaktadır. Bu eşanjör sistemi ise, kuyu başı ve kuyu içi eşanjörleri şeklinde sahanın ve akışkanın özelliğine göre kurulmaktadır. Enerjisi aktarılan jeotermal su, mevcut termal tesislere verilmekte veya reenjeksiyon boru hattı ile yeniden yer altına gönderilmektedir. Böylece rezervuar ömrü artmakta ve bitki örtüsüne zarar verilmemektedir. Jeotermal akışkan kimyasal özelliğine göre problem yaratmayacaksa ısıtma radyatör veya taban ısıtma sistemine direkt uygulama ile sağlanmaktadır.¹⁸

Jeotermal enerjinin tarihçesi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi milattan önceye dayanmaktadır. Banyo, mekân ve su ısıtması, pişirme aracı olarak ve de elektrik üretmek amacı ile jeotermal enerji kullanılmaktadır. Jeotermal enerji kullanım alanları şunlardır;

- ❖ Elektrik üretimi; jeotermal sahalarda açılan kuyulardan üretilen akışkan seperatörlerde buhar ve su olarak ayrıştırıldıktan sonra türbin ve jeneratör ile elektrik enerjisi üretilmektedir.
- ❖ Isı üretimi; düşük sıcaklık, basınç ve debideki jeotermal kaynakların sera, organik tarım, ürün kurutma, bölgesel ısı ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla değerlendirilmesidir.
- ❖ Termal turizm ve sağlık amaçlı kullanımı; insan sağlığına yararlı mineraller içerebilen düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklı suların sağlık amaçlı kullanımınıdır.¹⁹

Jeotermal enerji, sadece elektrik üretmek amaçlı değil farklı kullanım amaçlarından da kaynaklı ve de yenilenebilir, temiz enerji olmasından kaynaklı ülkemizde ve Dünya'nın birçok yerinde tercih edilmektedir. Jeotermal enerjinin dünya üzerindeki genel dağılımına bakıldığında, özellikle levha sınırlarının olduğu bölgeler ön plana çıkmaktadır. Alp - Himalaya kuşağı Güney ve Güneydoğu Asya (Pasifik Ateş Çemberi) ile Amerika kıtası Bu konuda öne çıkan bölgeler olarak görülmektedir.²⁰

Elektrik üretimi gelişmiş ülkelerde sürekli ve yenilenebilir bir kaynak olmasında dolayı yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Soğuk kuşakta bulunan gelişmiş bazı ülkeler yolların kaldırımların ve pistlerin ısıtılmasında da jeotermal enerjiden faydalanmaktadır.²¹

Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklindedir.²²Dünya'nın en büyük jeotermal santrallerine bakıldığında, Geysers Kompleksi - ABD, Lardello - İtalya, Cerroprieto - Meksika, Hellsheidi - İzlanda, Malaya - Filipinler, Olkaria - Kenya, Makban - Filipinler, Saltonsea - ABD, Darajat - Endonezya'dır.²³

Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa'nın 1. ülkesi ve kurulu güç bakımından ise Dünyanın 4. ülkesi konumundadır.²⁴ Türkiye'nin jeotermal potansiyeli yaklaşık 31.500 MW civarındadır. Bölgesel anlamda baktığımızda ise Ege Bölgesi ve Güney Marmara jeotermal kaynaklarının yoğunlaştığı alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bölgeleri takiben İç Anadolu Bölgesi, Doğu Anadolu Bölgesi, Karadeniz Bölgesi, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi gelmektedir. Ülkemizde jeotermal kaynaklardan faydalanma noktasına bakıldığında daha çok sağlık turizmi olduğu karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında konutlarda ve seralarda ısıtma amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Fakat geleceğe yönelik jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretme durumu ülkemiz için daha önemli hala gelecektir. Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretme ile alakalı Denizli Kızıldere santrali buna en iyi örnektir. Aktif olan bu santral, dönem dönem 15 MW güce çıkmasına rağmen ortalama olarak

¹⁸ <https://muhendis.web.tr/jeotermal-enerji-tarihcesi/>

¹⁹ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>

²⁰ <https://sehatek.com.tr/jeotermal-enerji-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>

²¹ <https://sehatek.com.tr/jeotermal-enerji-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>

²² <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>

²³ <https://sehatek.com.tr/jeotermal-enerji-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>

²⁴ <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>

12 MW elektrik üretmektedir. Bu da jeotermal enerji kaynağının ne kadar önemli bir noktada olduğunun göstergesidir. Türkiye'de elektrik üretimine uygun jeotermal sahalar şunlardır;

- ❖ Denizli - Kızıldere
- ❖ Aydın - Germencik
- ❖ Çanakkale - Tuzla
- ❖ Aydın - Salavatlı
- ❖ Kütahya - Simav
- ❖ İzmir - Seferihisar
- ❖ İzmir - Dikili
- ❖ Manisa - Caferbeyli'dir.²⁵

4.5.4 Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik akan sudan elde edilen enerji türüdür. 2000 yıl önce, eski Yunanlılar tahıl öğütmek ve tekerlekleri çalıştırmak için su gücü kullanılmıştır; bugün elektrik üretmenin en uygun maliyetli yollarından biridir ve genellikle mevcut olan yerlerde tercih edilen yöntemdir. Hidroelektrik santraller (HES) akan suyun gücünü elektriğe dönüştürmektedir. Akan su içindeki enerji miktarını suyun akış veya düşüş hızı tayin eder. Büyük bir nehirde akan su büyük miktarda enerji taşımaktadır. Ya da su çok yüksek bir noktadan düşürüldüğünde de yine yüksek miktarda enerji elde edilmektedir. Her iki yolla da kanal ya da borular içine alınan su, türbinlere doğru akar, elektrik üretimi için pervane gibi kolları olan türbinlerin dönmesini sağlamaktadır. Türbinler jeneratörlere bağlıdır ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir.²⁶

Dünyada hidroelektrik üretimine bakıldığında Çin, 370 GW'ın üzerinde kurulu toplam hidroelektrik kurulu kapasitesi açısından dünya lideri olmaya devam etmektedir. Brezilya (109 GW), ABD (102 GW), Kanada (82 GW) ve Hindistan (50 GW) ilk beşin geri kalanını oluşturmaktadır. Japonya ve Rusya Hindistan'ın hemen arkasında, onu Norveç (33 GW) ve Türkiye (31 GW) takip etmektedir.²⁷

Türkiye'deki hidroelektrik santraller 26 ana akarsu havzasına dağılmış durumda yer almaktadır. Bu havzalar içinde Fırat ve Dicle oldukça önemli bir yer tutmaktadır ve bu bölgede uygulanan Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) Türkiye'nin en büyük elektrik üretim, sulama ve bölgesel kalkınma çalışmasıdır. GAP tamamlandığında 22 baraj, 19 HES'de toplam 7476 MW bir kurulu güçte 27 milyar kWh/yıl bir elektrik üretimi gerçekleştirilecektir. Ayrıca 1,82 milyon hektar tarım arazisi de sulama olanaklarına kavuşacaktır. Türkiye'nin teknik hidroelektrik potansiyeli dünya teknik potansiyelinin %1,5'ine, Avrupa teknik potansiyelinin ise %17,6'sına tekabül etmektedir.²⁸

Hidroelektrik santrali üzerine kuruldukları su tiplerine göre değişiklik göstermektedir;

- ❖ **Akarsu Tipi (Barajsız) Hidroelektrik Santraller:** Elektrik üretmek için baraj yapılmaz. Akarsu, bir kanal veya tünele alınarak belli bir meyil kazandırılır. Türbin ise bir köprü gibi kanalın üzerine kurulur. Barajsız hidroelektrik santrallerin kurulacağı akarsuyun, türbin milini çevirebilecek potansiyele ve yıllık debisinin

²⁵ <https://sehatek.com.tr/jeotermal-enerji-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>

²⁶ https://yenader.org/tr_tr/hidroelektrik-enerji-nedir/

²⁷ [https://dunyaenerji.org.tr/2021-hidroelektrik-durum-raporu-ozeti/#:~:text=%C3%87in%2C%20370%20GW'%C4%B1n%20%C3%BCzerinde,\(31%20GW\)%20takip%20ediyor.](https://dunyaenerji.org.tr/2021-hidroelektrik-durum-raporu-ozeti/#:~:text=%C3%87in%2C%20370%20GW'%C4%B1n%20%C3%BCzerinde,(31%20GW)%20takip%20ediyor.)

²⁸ https://yenader.org/tr_tr/hidroelektrik-enerji-nedir/

asgari elektrik üretimine yetecek kadar olması gerekir. Ülkemizde Dicle Nehri Botan kolu üzerinde bu tarz bir sistem bulunmaktadır.

- ❖ **Depo Tipi (Barajlı) Hidroelektrik Santraller:** Akarsu üzerine barajlar yapılarak, önce büyükçe bir yapay göl meydana getirilir ve burada su biriktirilir. Bu suyun belli bir potansiyel enerjisi vardır. Dolayısıyla, kurak geçen yıllarda bile bu tip hidroelektrik santrallerde elektrik üretilebilir. Dünyada en yaygın kullanılan hidroelektrik santral çeşididir. Türkiye’de bugüne kadar uluslararası ölçütlere göre baraj niteliğinde olan 504 adet depolama tesisinin yapımı gerçekleştirilmiştir.
Atatürk, Keban, Altınkaya, Karakaya hidroelektrik santralleri ülkemizin önemli Depo Tipi (Barajlı) santrallerindendir.
- ❖ **Med-Cezir (Gel-Git) Hidroelektrik Santraller:** Okyanuslarda meydana gelen gel-git olayından yararlanılarak elektrik enerjisi üreten santrallerdir. Yükselen denizin suyu bir koya (haliç) alınır. Su alma işi kapaklar yardımıyla yapılır. Su yükselirken (hazneye dolarken) türbin çalışmaya başlar. Yükselme tamamlanınca, su alma kapağı kapanır ve tutulan su kanal yardımıyla türbine verilir. Su çekilirken de türbin çalışır ve elektrik üretir. Yani hazneye su dolarken de boşalırken de türbin çalışır ve elektrik üretir. Ülkemiz, gel-git enerjisi bakımından uygun değildir. Ancak dünyada uygulamaları vardır. Örneğin; Fransa’nın, Atlantik sahilinde her biri 10 MW gücünde 24 adet santrali vardır.
- ❖ **Depresyon Hidroelektrik Santraller:** Denizden alçakta olan çöllerde veya denize kıyısı olan çok sıcak bölgelerde, suyun fazla buharlaşmasından yararlanılarak elektrik üreten santrallerdir.²⁹

4.5.5 Hidrojen

Hidrojen, sembolü H olan ve doğada gaz formunda bulunan elementtir. Hidrojen, 1,00794 g/mol'lük kütlesi ile birlikte elementler arasında en hafif elementtir. Hidrojen kelimesi, günlük hayatta genellikle gaz formunda 2 hidrojen elementinden oluşan H₂ molekülü için kullanılmaktadır. Hidrojen, evrende %75’e yakın oranla birlikte en yaygın olarak bulunan; normal şartlar altında renksiz, kokusuz, yanıcı bir maddedir. Hidrojenin oksijen ile olan tepkimesinde (yakılmasında) meydana gelen çıktılarda, doğaya bir emisyon salınımı bulunmamaktadır. Hidrojenin kararsız bir yapıya sahip olmasından dolayı doğada saf (serbest dolaşım halinde), element halinde bulunmamakla birlikte genel olarak su ve hidrokarbon (kömür, petrol, gaz) formatları mevcuttur.

Hidrojenin doğada saf halinde bulunmamasından dolayı hidrojenin üretilmesi gerekmektedir. Diğer petrol, doğalgaz, kömür, güneş, rüzgar gibi birincil enerji kaynakları arasında sayılmamaktadır. Hidrojen, birincil enerji kaynaklarının kullanılması sonucu ortaya çıkan ikincil enerji kaynağı (enerji taşıyıcısı)’dır. Hidrojen, bir enerji taşıyıcısı olarak hidrokarbon yakıtlardan veya suyun elektrikle elektrolizin üretilmesi ve çok çeşitli uygulamalarda elektrik ve ısı için yakılabilir veya elektrik üretiminde yakıt hücresi olarak kullanılabilir.³⁰

Hidrojenin tarihsel gelişimi şu şekildedir;

- ❖ 1766’da Henry Cavendish bu kabarcıkların diğer gazlardan farklı olduğunu ve farklı bir element olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- ❖ 1783 yılında Fransız kimyager Antonie Lavoisier, Cavendish’in buluşlarına dayanarak Yunanca hidro ve genler kelimelerinden türetilen hidrojen adını vermiştir, “su” ve “doğmak” anlamına gelmektedir.

²⁹ <https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com/hidroelektrik-santral/2535/#Hidroelektrik-Santral-Cesitleri-Nelerdir>

³⁰ International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023.

- ❖ 1838'de Alman kimyager Christian Friedrich Schoenbein hidrojen ve oksijen gazlarının birleşmesiyle su ve elektrik akımı üretebilen yakıt pili teknolojisinin ilk adımlarını atmıştır.
- ❖ 1845'te İngiliz bilim insanı Sir William Grove, Schoenbein keşfini geliştirerek "Yakıt Pilinin Babası" unvanını almıştır. Yakıt hücresinin mucidi olan William Grove'un eski öğrencisi Lash Miller ile Stuart elektrik şebekesine eklendiğinde yeni üretim kapasitesinden hidrojen ve oksijenin kojenerasyonu fikri geliştirilmiştir.
- ❖ Alexander T. Stuart 1913'te dünyanın önde gelen elektroliz sistemlerinden biri olan "Stuart Cell'i" icat etmiştir.
- ❖ 1923 yılında genetikçi ve evrimsel biyolog olan John Burden Sanderson Haldane, Britanya'daki kömürden üretilen enerjinin tükeneceğini öngörerek, rüzgâr enerjisinden elektroliz yolu ile hidrojen üretmek için yel değirmeni ağı sistemini ve üretilen bu hidrojenin sıvılaştırılıp depolanabileceğini, hidrojenin geleceğin yakıtı olduğunu belirttiği bir konferans düzenlenmiştir. Haldane'in bu çalışması hidrojene dayalı yenilenebilir enerji ekonomisinin sürdürülebilir enerji üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.
- ❖ Hidrojenin enerji alanıyla ilgili çalışmalar ise Soğuk Savaş döneminde başlamıştır. Soğuk Savaş tarafları (ABD-SSCB) hidrojenin askeri gücünü de keşfetmiştir. 1953 yılında SSCB tarafından ilk hidrojen bombası denemesi yapılmıştır, bir yıl sonra ise ABD hidrojen bombası denemesini yapmıştır. Hidrojenin askeri yönü ile keşfedilen gücü enerji kaynağı olarak kullanılması için 1955 yılında her iki ülkenin çalışmaları ile başlatılmıştır.
- ❖ 1958 yılında Amerika Birleşik Devletleri, National Aeronautics and Space Administration/Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) kurulmuştur. NASA uzay programı roket tahrik ve yakıt hücreleri için yakıt olarak en çok sıvı hidrojeni kullanmaktadır.
- ❖ 1959 yılına gelindiğinde ise Cambridge Üniversitesinden Francis T. Bacon ilk hidrojen-hava yakıt hücresini geliştirmiştir. Bu hücre ile 5 kw'lık bir kaynak makinesini çalıştırmıştır. Geliştirmiş olduğu bu yakıt hücresine ise "Bacon Pili" adını vermiştir.
- ❖ ABD Hava Kuvvetlerinin 1943'te başlatmış olduğu uzay programında 1961 yılında nihayete erişilmiştir ve Sikorski'nin öngörülleri ile oluşturulan çalışmada sıvı hidrojenin Atlas roket motorunda kullanılması başarılı olmuştur.
- ❖ 1973 petrol krizi ile sekteye uğrayan ve bunun sonucu arz sıkıntısı yaşayan ülkeler enerji için sadece petrole bağlı olmanın yanlışlığını fark ederek hidrojen enerjisi gibi alternatif kaynaklara önem vermeye başlamışlardır. Yaşanan bu kriz yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha hızlı gelişimine öncü olmuştur.
- ❖ 1988'de Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nin (SSCB) Tupolev adlı havacılık ve savunma şirketi 164 yolcu kapasiteli TU-154B uçağına dayalı bir prototip olan TU-155 jetinin üç motorundan birini sıvı hidrojenle çalıştırılacak şekilde tasarlamışlardır.
- ❖ 13 Nisan 1994 tarihinde Daimler-Benz Almanya'nın Ulm kentinde basına düzenlediği bir etkinlikte Mercedes-Benz MB 100 minibüs modeli olan NECAR 1 (New Electric Car) yakıt hücreli aracını sergilemiştir. NECAR 1 dünyanın yakıt hücresi ile çalışan ilk araçtır 2000 yılına gelindiğinde ise yakıt hücresi üretiminde önde gelen firmalardan olan Ballard Power Systems, Detroit Otomobil Fuarında otomotiv sektörünün kullanımı için dünyanın ilk kullanıma hazır PEM6 (Protonexchange membrane fuel cell) yakıt hücresini tanıtmıştır.
- ❖ 2003 yılına gelindiğinde ise ABD Başkanı George Bush, hidrojen ile çalışabilen yakıt hücrelerini ticarileştirmek için AR-GE çalışmalarına 10 yıl süresince 1,2 milyar dolar yatırım yapılacak bir girişimi açıklamıştır. Bu gelişmeye ek olarak, U.S. DOE (United States Department of Energy) sekreteri uluslararası iş birliği yoluyla hidrojen teknolojilerinin gelişmesini teşvik etmek için Ekonomide Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Uluslararası Ortaklığı (IPHE) kurmuştur.

- ❖ 2004 yılında dünyanın ilk yakıt hücresel denizaltısı Alman Donanması tarafından derin su denemelerine tabi tutulmaya başlamıştır. 2023 yılında sıvı hidrojen yakıtlı ve pilotlu ilk gösteri uçağı olan "HY4" Slovenya'nın Maribor kentinde kullanılmıştır. Bu gelişme havacılık sektörünü karbondan arındırmak için önem arz etmektedir.

Hidrojen enerjisi için Dünya'da birçok ülke çeşitli Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmekte ve böylelikle elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücrelerinde kullanılabilir.

Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su, elektrik ve ısı üreten temiz bir yakıt olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım potansiyeli ile enerji üretim alanında önemli bir role sahiptir.

4.5.5.1 Hidrojen Üretimi

Fosil yakıtların azalması, petrol krizinin zaman zaman ülke ekonomilerini olumsuz yönde etkilemesi, fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyon salınımının Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşmasında azaltılma hedefi bireylerden başlayarak sanayi sektörünü ve ülkeleri tükenmeyen, emisyonuz ve ucuz kaynak arayışına sevk etmiştir. Elektrifikasyon süreçlerinde termik, doğalgaz ve petrol gibi kaynaklar yerine güneş, rüzgâr, biyogaz ve jeotermal gibi yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarını aktif olarak kullanımı hane halkları tarafından hedeflenmektedir.³¹ Fakat artan enerji talebine karşılık yenilenebilir enerji arzı halen istenilen seviyede elektrik üretimi gerçekleşmemektedir. Enerji arzında dengesizlik, maliyetler ve potansiyellerin tam kapasitede kullanılamaması gibi sorunlar bulunmaktadır.³²

Doğada bileşik halde bulunan hidrojen üretim yöntemlerinin farklılaşması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte dünyada ikincil enerji kaynağı olarak ön plana çıkmıştır. Hidrojen fosil yakıtlar ile üretilirken yenilenebilir enerji kaynaklarından da farklı yöntemlerle üretimi mümkündür. Dünya Enerji Konseyi ve Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yayınlanan raporlara göre hidrojen ihtiyacı halen fosil yakıtlardan elde edilerek karşılanmaktadır. Ancak Uluslararası Enerji Ajansı'nın Net Sıfır Emisyon raporuna göre 2030 yılından itibaren düşük emisyonlu hidrojen kullanımının artacağı ve 2050 yılında 530 Mt hidrojenin üretiminin hedeflendiği bildirilmektedir. Bu kapsamda başta Avrupa ülkeleri olmak üzere hidrojen üretim potansiyeli bulunan ülkeleri projelerini açıklamışlardır. Projelerin hayata geçmesi halinde 2030 yılına kadar öngörülen net sıfır emisyon senaryosunda yer alan 70 Mt karbon üretiminin yarısına karşılık gelen düşük emisyonlu hidrojen üretiminin gerçekleşmesi planlanmaktadır. Hidrojen üretimi için fosil yakıtlardan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından birden fazla yöntem ile çalışmalar sürdürülmektedir.³³ Ticarileşen faaliyetler olmakla birlikte ön Ar-Ge, Ar-Ge, ticarileştirme çabaları da hayli yüksektir.

Hidrojenin, kullanılan enerji kaynağının türüne veya üretimde kullanılacak olan proseslere göre çeşitli üretim metotları bulunmaktadır. Hidrojen kaynağına göre; su, hidrokarbonlar, nükleer kaynaklar, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir. Küresel hidrojen üretiminde büyük pay, fosil kaynaklar oluşturmaktadır. 2022 yılında doğal gazdan hidrojen üretiminin payı %62; kömürden Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama

³¹ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi s.2

³² EPDK, 2023 Sektör Raporu, s.1, s.22.

³³ IEA, Net Zero Emissions, 2023.

olmaksızın hidrojen üretiminin payı ise %21'dir. 2022 yılında fosil kaynak bazlı hidrojen üretiminden kaynaklı karbon emisyon miktarı ise 900 Mt olarak ifade edilmiştir.³⁴

4.5.5.2 Fosil Kaynaklardan Hidrojen Üretimi

Fosil kaynaklar, organik materyallerin milyonlarca yıl süren biyolojik, kimyasal, fiziksel benzeri doğal süreçler sonucundan oluşan karbon ve hidrojen bazlı kömür, doğalgaz, petrol gibi kaynaklardır. Fosil kaynaklardan hidrojen elde edilme süreçlerinde yan ürün olarak; sülfür oksit, nitrojen oksit, cıva ve diğer partiküller gibi çok sayıda kirleticinin yanı sıra karbondioksit gibi sera gazları açığa çıkmaktadır. Bu durum da Net Sıfır Emisyon hedeflerinde, hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yöntemlere eğilimi zorunlu kılmaktadır. Hidrojen üretiminde kullanılan fosil kaynaklar şu şekildedir:

- ❖ Kömür: Bitki kalıntılarından oluşan kömür, yıllar içinde yer altında biriken organik malzemenin ısı ve basınç koşulları altında dönüşmesi sonucu oluşur. Kömür, dünya enerji üretiminde özellikle elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır.
- ❖ Petrol: Deniz canlıları ve planktonlar gibi organik maddelerin çökmesi ile oluşan organik içerik bakımından zengin sedimanter kayaların jeolojik zaman içerisinde gömülmesiyle ısı ve basınç etkisi altında bir dizi kimyasal süreç sonucunda oluşan endüstriyel bir üründür. Petrol, yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra petrokimya endüstrisinde çeşitli ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır.
- ❖ Doğal Gaz: Organik maddelerin çürümesi sonucu oluşan metan ve diğer hidrokarbon gazlarını içerir. Genellikle petrol rezervlerinin yanında bulunur veya ayrı doğal gaz, ısıtma, enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynaklardan ve metan gibi hidrokarbonlardan; buhar reformasyonu, oksidasyon, piroliz, gazlaştırma gibi yöntemlerle birlikte hibrit modeller de dahil olmak üzere hidrojen elde edilmektedir.³⁵

4.5.5.3 Buhar veya Metan Reformasyonu (BMR)

Fosil yakıtların içeriğinde bulunan hidrokarbon molekülleri, belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında reformasyon tepkimesi ile birlikte yeniden biçimlendirilerek hidrojenin üretilmesi halidir. Katı formda bulunmayan, genellikle doğal gaz, metan veya diğer hidrokarbon moleküllerinden çıktı olarak hidrojen üretilmektedir. Buhar reformasyonu prosesi, gelişmiş yaygın bir hidrojen üretim teknolojisi olup günümüzde hidrojen üretiminde en çok kullanılan tekniktir. 2050 yılında öngörülen NZE'de hidrojen üretiminin yaklaşık %40'ı, KYDK ile birlikte doğalgazdan oluşmaktadır.

Reformasyon prosesinde, metanın, doğal gazın veya etanol, propan gibi diğer hidrokarbonların yüksek sıcaklıktaki (yaklaşık 700-1000 C) su buharı ile kimyasal tepkimesi söz konusudur. Bu kimyasal tepkimeden ürün olarak karbon monooksit ve hidrojen molekülü çıkmaktadır. Kimyasal tepkimeden elde edilen karbon monoksit gazı, daha fazla hidrojen gazı üretilmesi için tekrar su buharı ile tepkimeye girerek

³⁴ IEA, G lbal Hydrogen Review, 2023

³⁵ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.23, 2021.

karbon dioksit ve hidrojen üretilir. En son aşama olan soğutma ve ayırma aşamasında ise elde edilen gaz karışımı soğutulur ve hidrojen diğer yan ürünlerden ayrıştırılmaktadır.³⁶

4.5.5.4 Kısmi Oksidasyon

Kısmi oksidasyon yönteminde, fosil yakıtların, yeterli miktarda oksijenle birlikte kimyasal tepkimeye sokularak hidrojenin ayrıştırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntemde, kimyasal tepkimeye sokulan oksijen miktarından dolayı tam yanma olayı gerçekleşmemektedir.

Kısmi oksidasyonda, 1.300-1.500 C sıcaklıkları arasında ve 3-8 megapaskal basınç altında fosil yakıtın yanma tepkimesi gerçekleştirilir. Bu tepkimede yan ürün olarak karbon monoksit, karbon dioksit, su, hidrojen, metan gibi gaz karışımı çıkmaktadır. Özellikle hidrojen üretimi için kısmi oksidasyon, gaz türbinlerinde ve yakıt hücrelerinde kullanılan bir yöntemdir. Buharla reformasyona bir seçenek olan kısmi oksidasyon işlemi, metandan kömüre kadar ağır yakıtlarla çalışabilen ve hidrojen üretilen bir yöntemdir.³⁷

4.5.5.5 Piroliz

Piroliz yöntemi ile birlikte organik atıklar, atık yönetimine katkı sağlayacak şekilde hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Piroliz yönteminde depolanan biyo atıklar, oksijensiz bir ortamda 500 ile 900 derece arasında ısıtılarak katı, sıvı ve gaz fazında hidrojen, metan, etilen, benzen gibi ürünler alınmaktadır.

Bu süreçte biyokütle, buhar, katran ve kömüre dönüştürülmekte ve ardından yoğunlaşabilir buhar, biyo-yag adı verilen sıvı yakıta yoğunlaştırılmaktadır. Yoğunlaştırılmayan ürünler ise hidrojen, karbon monoksit gibi gaz halindeki ürünlerdir. Gaz halinde hidrojen yoğunluğunun artırılabilmesi için daha yüksek sıcaklıklarda su ile tepkimesi gerçekleştirilebilmektedir.³⁸

4.5.5.6 Gazlaştırma

Gazlaştırma yönteminde, kaynak olarak katı haldeki kömür ve ağır yakıt olarak nitelendirilebilecek ham petrol gibi sıvılar kullanılmaktadır. Bu süreçte fosil kaynaklar, yüksek basınç ve sıcaklıkta su buharı ile kimyasal tepkimeye sokularak hidrojen, azot, karbon monoksit ve karbon dioksit içeren gaz karışımı elde edilmektedir.³⁹

4.5.5.7 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi

Fosil kaynak kapasitelerinin sınırlı olması, nüfus ve sanayileşme artışına paralel olarak enerji arzının sürekli artması, fosil kaynakların dünya genelinde homojen olarak dağılmaması gibi sebeplerden dolayı yeni enerji kaynağı arayışları yıllardır süregelmiştir. Bu enerji arayışının cevabı olarak, yenilenebilir enerji kaynakları keşfedilmiştir. Bu kaynaklar, yenilenebilir doğal proseslerden elde edilmektedir ki bu durum ülkeler açısından enerji güvenliğini de

³⁶ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.26, 2021.

³⁷ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.27, 2021.

³⁸ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.27, 2021.

³⁹ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.28, 2021.

beraberinde getirmektedir. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji, dalga ve gel-git enerjisi jeotermal ve biyokütle enerjisidir.

Net sıfır emisyonuna ulaşabilmek, büyüyen küresel ekonominin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için temiz enerji sektörünün büyük ölçekle genişlemesini, fosil yakıt kaynaklı kullanım alanlarının elektrifikasyonunu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimini gerektirmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretiminin ortalama maliyeti, NZE'de (Net Zero Emissions) bugün 3,5-7,5 ABD Doları/kg'dan 2030'da yaklaşık 1,5-3,5 ABD Doları/kg'a ve 2050'de 1-2,5 ABD Doları/kg'a düşmektedir. Esasen CCUS ile doğal gazla üretim maliyetiyle hemen hemen aynıdır.

NZE'de hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için kömür ve doğal gazla çalışan enerji santrallerinin kullanımından yenilenebilir enerji, hidrojen, batarya depolamaya önemli bir geçiş söz konusudur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimi yöntemleri temelde iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar: biyokütle enerjisinden biyolojik ve termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretimi ve suyun ayrıştırılması yöntemiyle hidrojen üretimidir.⁴⁰

4.5.5.8 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, biyolojik kökenli fosil olmayan organik madde kitlesidir. Ana bileşenleri karbon-hidrat bileşikler olan bitkisel veya hayvansal kökenli tüm doğal maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen enerji ise biyokütle enerjisi olarak ifade edilmektedir. Biyokütle enerjisinden hidrojen elde edilmesi için biyolojik ve termokimyasal yöntemlerden yararlanılmaktadır.⁴¹

4.5.5.9 Biyolojik Yöntemler

Biyolojik yöntemlerden ilki biyofotoliz yöntemidir. Bu yöntemde; güneş ışığı ve fotosentez yapabilen mikroorganizmalardan yararlanılmaktadır. Biyofotoliz yönteminde ilk olarak güneş ışığından gelen enerji ile birlikte su molekülleri hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılmaktadır. Biyofotoliz yönteminde genellikle algler, siyanobakteriler, yeşil mikroalgler kullanılmaktadır. Biyofotoliz, yenilenebilir enerji üretimi ve enerji depolama konularında büyük ilgi çekmektedir. Bu süreç, güneş enerjisini doğrudan hidrojen enerjisine dönüştüren bir yol sunarak, sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlayabilir.

Biyofotoliz yönteminde kullanılan güneş ışığı olmaksızın gerçekleştirilen hidrojen üretim yöntemi ise karanlık fermantasyon olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemde, güneş ışığı kullanılmaksızın, bakterilerin organik maddeleri fermente etmesi yoluyla hidrojen elde edilmektedir. Bu süreçte, hidrojen, organik asitler ve karbon dioksit açığa çıkmaktadır. Ayrıca bu süreçte mikroorganizmalardan; biyogaz, biyoplastik ve diğer biyolojik ürünlerin elde edilmesi sağlanır.

4.5.5.10 Termokimyasal Yöntemler

⁴⁰ IEA, Net Zero Emissions, 2023.

⁴¹ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası, s.30, 2021.

Bu yöntemde depolanan biyokütle, yüksek sıcaklık ve basınç altında çeşitli kimyasal tepkimeler ile birlikte ayrıştırılarak hidrojen elde edilmektedir. Son yıllarda organik atıkların ve kömür karışımlarının ikili pirolizi yüksek enerji içerikleri nedeniyle tercih edilmektedir. İlk olarak biyokütle oksijensiz ortamda gazlaştırılmaktadır. Gazlaştırma ile birlikte yan ürün olarak hidrojen, karbon dioksit ve metan elde edilmektedir. Gaz karışımı daha sonrasında su buharı ile kimyasal tepkime gerçekleştirilerek, oluşan katı partiküllerin temizleme işlemi gerçekleştirilir.

Bu süreçler, yüksek sıcaklıklar ve karmaşık kimyasal tepkimeler içerdiği için teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşılabilir. Bu süreçlerin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek için Ar-GE çalışmaları yapılmaktadır.

4.5.5.11 Suyun Ayrıştırılması Yöntemleri

Elektroliz yöntemi yenilenebilir enerji kaynaklarından yeşil hidrojen üretimi için kullanılan ana yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Elektroliz yöntemi yıllardan beri var olan bir yöntem olduğu bilinmektedir. Bu yöntemde göre elektrik ile suyun elektrolizi sonucunda hidrojen ve oksijen meydana gelmektedir. Bu sistem çoğunlukla türü değişim gösteren elektroliz hücresi olarak adlandırılan bir sistem içinde gerçekleşir. Bu hücre, anot ve katot elektrotları arasında elektrolit içeren bir yapıdadır. Elektrolit, iyon taşıma yeteneği sayesinde elektrik akımını kolayca iletmektedir. Elektroliz yöntemi için gerekli olan temel iki ham madde su ve elektriktir. Ham madde bakımından su stresinin yaşandığı günümüzde suyun kullanımının düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu bakımdan suyun yer altı kaynaklarından değil denizdeki tuzlu suyun desalinasyon adı verilen yöntem ile dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Burada ise suyun desalinasyon yönteminde %50 oranında verim kaybına sebep olması elektroliz maliyetini artırıcı unsur olarak belirtilmektedir. Elektrik açısından ise güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle gibi yöntemlerle üretilen elektriğin ya da mevcut şebeke elektriğinin kullanımı sağlanmaktadır. Mevcut şebeke elektriğinin kullanımı karbon ayak izi kapsamında tartışmalara neden olmakla birlikte şebeke elektriğinin maliyeti de elektroliz yönteminin maliyetini artırır nitelikte yer almaktadır.⁴²

Elektrolizörler, suyu hidrojen ve oksijen moleküllerine ayrıştırarak hidrojen üretmek için kullanılan cihazlardır. Elektroliz işlemi, suya uygulanan elektrik akımı sayesinde su moleküllerinin ayrılması ilkesine dayanır ve bu işlemde kullanılan elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığında, üretilen hidrojen "yeşil hidrojen" olarak tanımlanır. Yeşil hidrojen, fosil yakıt bazlı geleneksel hidrojen üretim yöntemlerine kıyasla sıfır emisyonlu bir üretim süreci sunduğu için temiz enerji dönüşümünde ve dekarbonizasyon hedeflerine ulaşmada hayati bir öneme sahiptir.

Günümüzde su elektrolizi küresel hidrojen üretiminde düşük bir paya sahiptir ve toplam hidrojen üretiminin yalnızca %0,1'ini oluşturmaktadır. Ancak bu duruma rağmen, su elektrolizi projelerine olan ilgi hızla artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, 2023 yılı itibarıyla küresel elektroliz kapasitesi 700 MW'a ulaşmış ve bir önceki yıla kıyasla %20 oranında artış göstermiştir. IEA'ya göre, bu kapasitenin 2023 yılı sonunda 2 GW'a ulaşması beklenmektedir. Bu artış, NEOM Yeşil Hidrojen Projesi gibi büyük projeler tarafından desteklenmektedir. Suudi Arabistan'da 2026 yılında faaliyete geçmesi planlanan bu projenin, ülkenin hidrojen üretim kapasitesine önemli bir katkı sağlaması öngörülmektedir. Ayrıca, Umman'da yıllık 100 kiloton amonyak üretecek ve tam kapasitede 3,5 GW'a ulaşacak bir proje de finansal kapanışa ulaşmıştır. Çin ise 2023 yılında devreye alınan 260 MW kapasiteli yeni tesislerle elektroliz kapasitesini artırmada öncü bir rol oynamaktadır.⁴³

⁴² IIEEC, Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği s.127 2023.

⁴³ IRENA, Yeşil Hidrojen Stratejileri, 2023, s.19.

Elektrolizör teknolojileri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemler Alkali Elektroliz (AWE), Proton Değişim Membranlı Elektroliz (PEM) ve Katı Oksit Elektroliz (SOE) olarak öne çıkmaktadır. Ticari kullanımda olan alkali elektrolizörler, nispeten düşük maliyetleriyle dikkat çekerken, %60 ila %80 arasında verimlilik sunarlar. PEM elektrolizörler ise daha yüksek verimliliğe sahiptir ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kolayca entegre edilebilir. SOE elektrolizörler ise çok yüksek sıcaklıklarda çalışarak daha yüksek verimlilik sağlasa da kurulu kapasitesi henüz sınırlıdır. Bu teknolojinin özellikle nükleer enerji gibi yüksek sıcaklık kaynaklarıyla entegre edilerek daha fazla kullanım alanı bulması beklenmektedir. IEA ve IRENA gibi kuruluşlar, hidrojen üretiminde elektroliz teknolojilerinin maliyetlerinin düşürülmesi ve verimliliklerinin artırılması gerektiğini belirtmektedir.

2030 yılına kadar küresel elektroliz kapasitesinin 175 GW seviyesine çıkması beklenmektedir. Bu kapasitenin büyük bir kısmının Avrupa ve Latin Amerika gibi bölgeler tarafından üstlenileceği öngörülmektedir. Henüz fizibilite aşamasında olan projeler de dikkate alındığında, toplam kapasitenin 420 GW seviyesine ulaşabileceği tahmin edilmektedir. Ancak, şu ana kadar duyurulan projelerin yalnızca %4'ü finansal kapanışa (FID) ulaşmış veya inşaat aşamasındadır; %40'ı ise fizibilite çalışmaları tamamlanmış veya hâlen devam etmektedir. Bu nedenle, projelerin gerçekleşme durumuna bağlı olarak belirsizlikler bulunmaktadır.

Elektrolizörlerin üretim kapasitesi açısından da hızlı bir büyüme yaşanmaktadır. 2022 yılı sonunda küresel elektrolizör üretim kapasitesi yaklaşık 13 GW/yıl seviyesine ulaşmıştır ve bunun yaklaşık yarısı Çin'de, beşte biri ise Avrupa'da bulunmaktadır. IEA'nın tahminlerine göre, 2030 yılı itibarıyla bu kapasitenin yıllık 155 GW seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu artış, Net Sıfır Emisyon (NZE) Senaryosu'nda hedeflenen üretim kapasitesinin %90'ına karşılık gelmektedir. Ayrıca, 2030 yılı itibarıyla PEM ve SOE teknolojilerinin artan üretim kapasiteleri ile alkali elektrolizörlerin pazar payının düşmesi ancak %54 ile en büyük dilimi oluşturmaya devam etmesi beklenmektedir.

Hidrojen üretiminde yaygınlaşan elektroliz teknolojilerinin sürdürülebilir büyümesi, ülkelerin teşvik politikalarına bağlıdır. Örneğin, ABD'nin Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) ve Avrupa Birliği'nin Net Sıfır Sanayi Yasası gibi teşvik programları, hidrojen projelerine yönelik yatırımları hızlandırabilir.⁴⁴ Ancak, hidrojen üretim altyapısının hızlı gelişimi, bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle tedarik zincirleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep hızla artmaktadır. Elektrolizörlerin kurulum maliyetlerinin azaltılması ve teknolojik gelişmelerle verimliliğinin artırılması, sektörün sürdürülebilir büyümesi açısından kritik faktörlerdir. Enerji sektörü analistleri, altyapı eksiklikleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarına bağımlılığın, özellikle dalgalanan enerji üretimi nedeniyle hidrojen maliyetlerini etkileyebileceğini vurgulamaktadır.⁴⁵

Geleceğe yönelik senaryolar arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektroliz ile entegrasyonunun büyük bir potansiyel taşıdığı öngörülmektedir. IEA'nın raporlarına göre, 2030 yılına kadar 200 GW kapasitedeki yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretiminde kullanılacağı tahmin edilmektedir. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalanmasından kaynaklanan verimlilik kayıplarını engellemek için enerji depolama çözümleri önem kazanmaktadır. Özellikle rüzgar ve güneş enerjisinin hidrojen üretiminde daha geniş bir kullanım alanı bulması, bu alandaki teknolojik gelişmeleri hızlandıracaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı açısından jeotermal ve okyanus enerjisi de hidrojen üretiminde potansiyel vaat etmektedir. Jeotermal enerji, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir elektrik kaynağı sunarak hidrojen üretiminde kullanılabilirken, okyanus enerjisi sistemleri (örneğin, gelgit ve dalga enerjisi) de temiz bir enerji

⁴⁴ ABD Ulusal Hidrojen Stratejileri

⁴⁵ IEA, Net Zero Emissions, 2023.

kaynağı sağlamaktadır. Ancak, okyanus enerjisi teknolojilerinin maliyetlerinin yüksek olması ve Ar-Ge çalışmalarının hızlandırılması gerektiği belirtilmektedir.

4.5.6 Elektrolizör Teknolojileri

Elektrolizör suyu elektrik aracılığı ile ayrımını gerçekleştiren teknolojidir. Bu teknoloji basit görünse de hidrojen için elzem bir yere sahiptir. Son yıllarda suyun elektroliz yönetiminin kullanımıyla birlikte gelişim göstermektedir. Başlıca alkali ve proton exchange membran (PEM) kullanımı gerçekleştirilse de SOEC ve AEM gibi yeni tip elektrolizörlerin ticarileşmesi için çalışmalar yürütülmektedir. Aktif kullanıma rağmen fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemlerine kıyasla alkali ve PEM elektrolizörlerin maliyetleri halen OPEX ve CAPEX bakımından yüksektir. Sıklıkla kullanılan alkali ve PEM arasında PEM elektrolizör maliyet bakımından alkaliye göre %50 oranında daha maliyetlidir. Alkali elektrolizörler kapasitesinde liderlik Çin'de olarak gözüktü de Amerika Birleşik Devletleri tarafından yapılan atılımlar neticesinde sektör liderliğinde ortaklık ihtimali yakın gelecekte mevcuttur. PEM elektrolizöründe Kanada'nın Quebec eyaletinde 20 MW gibi bir kapasite ile üretim gerçekleşmiştir. Ancak Çin 30 MW PEM elektrolizör ile Kanada'nın PEM elektrolizör liderliğini ele geçirmiştir.

2024'te dünya genelinde kurulu kapasite, tahmini olarak 1,2 GW'ı geçmiştir ve çoğunluğu düşük sıcaklık teknolojilerine dayanmaktadır. Bu kapasitenin önemli bir kısmı alkali elektrolizörlere ayrılmıştır, çünkü bu yöntem daha yaygın ve ticari olarak uygun maliyetlidir. PEM (Proton Exchange Membrane) elektroliz teknolojisi de hızla gelişmekte, özellikle ABD ve Avrupa'daki projelerde kullanılmaktadır. Alkali elektrolizörler, özellikle Çin ve Hindistan gibi ülkelerde daha yaygınken, PEM elektrolizörler Avrupa ve ABD'de daha yüksek maliyetine rağmen tercih edilmektedir. Avrupa ülkelerinde kurulumun hızlanmasına yönelik düzenlemeler ve finansal destekler bu projelerin daha geniş çapta uygulanabilirliğini sağlamaktadır.

PEM, (Proton Exchange Membrane) (Proton Değişim Membranlı) yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijenin kontrollü bir kimyasal reaksiyonla elektrik üretmesini sağlayan bir teknoloji türüdür. PEM yakıt hücreleri, özellikle taşınabilirlik ve hızla yük değişimlerine uyum sağlama yeteneği nedeniyle çeşitli enerji uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

PEM yakıt hücreleri, proton değişim membranının iki tarafında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarla çalışır. Anot tarafında, hidrojenden gelen moleküller ikiye ayrılır, protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) olarak. Protonlar membran aracılığıyla katoda doğru hareket ederken, elektronlar ise bir dış devre üzerinden katoda ulaşarak elektrik akımı üretir. Katot tarafında, protonlar, elektronlar ve havadan sağlanan oksijen birleşerek su (H_2O) oluşturur.⁴⁶

Alkali yakıt hücreleri, potasyum hidroksit gibi alkali bir elektrolit kullanarak hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonu ile elektrik üreten bir yakıt hücresi türüdür. Özellikle uzay araçlarında ilk kullanılan yakıt hücrelerinden biridir ve yüksek enerji verimliliği ile bilinir. Ancak, saflaştırılmış yakıt kullanma gereksinimi nedeniyle yaygın kullanımı sınırlıdır.

Anot Reaksiyonu: Anotta hidrojen, hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girerek su ve elektronlar üretir. Elektronlar dış devre boyunca hareket ederek elektrik akımı oluşturur.

Katot Reaksiyonu: Katotta, oksijen elektronlarla birleşerek hidroksit iyonları oluşturur ve bu iyonlar elektrolit aracılığıyla tekrar anota yönelir. Bu tür yakıt hücreleri yüksek verimlidir ancak karbondioksit toleransı düşüktür, bu yüzden yakıtın karbondioksitten arındırılmış olması gerekir.

⁴⁶ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Türkiye İçin Hidrojen Çiftliği Konsepti Raporu, 2021, s.13.

Katı oksit yakıt hücreleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC), seramik bazlı katı bir elektrolit kullanarak yüksek sıcaklıklarda (genellikle 600–1000°C) çalışır. Yüksek sıcaklıkları sayesinde, fosil yakıtlar dahil farklı yakıt türlerini kullanabilir ve doğrudan elektrik üretim verimliliğini artırır.

Anyon değişim membranlı yakıt hücreleri (AEM), hidrojen yakıt hücrelerinin daha yeni bir türüdür ve alkali ortamda çalışır. AEM'ler, iyon değişim membranı olarak anyonları geçiren polimer bazlı bir yapı kullanır. Bu tür yakıt hücreleri, daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi ve nispeten ucuz katalizörler kullanabilmesi nedeniyle caziptir.

Elektroliz kapasitesinin MW'dan GW ölçeğine taşınmasında en büyük zorluklar, ham madde eksikliğinin bulunması halen yeşil yerine farklı kaynaklardan hidrojen üretiminin bulunması ve elektrolizörlerle ilgili çalışmaların ticarileşememesinden kaynaklanmaktadır. Elektrolizörün sanayide kullanılacak nitelikte üretimi için AB ülkeleri, ABD ve Kanada'da teşvik mekanizmaları gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde de Hidrojen Yol Haritası ve Kalkınma Planı içerisinde yerli elektrolizör üretimi ve yakıt pili üretimi gibi milli hedefler yer almaktadır. Günümüzde, elektroliz yatırımlarının maliyetli olması nedeniyle suyun elektrolizi yöntemiyle elde edilen hidrojen miktarı, toplam üretilen hidrojen miktarının %4'ünü oluşturmaktadır.⁴⁷

4.5.7 Hidrojen Üretiminde Yenilikçi Yöntemler

4.5.7.1 Hidrojen Sülfürün Ayrıştırılarak Hidrojen Üretimi

Hidrojen sülfür, havada düşük konsantrasyon seviyelerinde çürük yumurta kokusuna sahip renksiz ve yanıcılık oranı yüksek bir gaz olarak tanımlanmaktadır. Genellikle kanalizasyonlarda oksijen ile buluşmamış deniz altı ürünlerinde gübrelerin içerisinde bulunmaktadır. Hidrojen sülfür havadan ağır olması nedeniyle alçak ve kapalı alanlarda birikebilmektedir. Hidrojen sülfür güncel durumda nükleer reaktörler için elementel kükürt, sülfürik asit ve ağır su üretimi için kullanılmaktadır.

Türkiye'de Karadeniz bölgesinin orta ve batı kısımlarında oksijen eksikliğinden kaynaklanan bitki ve hayvan maddelerinin bakteriyel parçalanması/ayrışması neticesinde hidrojen sülfür üretilmektedir. Karadeniz'de binlerce yıldır hidrojen sülfür gazının olduğu bilinmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde tahmini 4.6. milyar ton hidrojen sülfür gazı rezervinin Karadeniz'de yer aldığı tespit edilmiştir. Hidrojen sülfürün çevreye olan zararlarını azaltmak için gazın bileşenlerine ayrılması elzemdir. Zorunluluk bulunsa da hidrojen sülfürün ayrılma işleminin suyun elektrolizine göre 3 kat doğalgaz ve kömürden hidrojen üretim yöntemlerine göre de 9 kat daha maliyetlidir.

48

Karadeniz'in enerji coğrafyası ve jeopolitik önemi, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve hidrojen sülfür gibi alternatif enerji kaynaklarının kullanım potansiyelini ön plana çıkarmaktadır. Bu bölgede hidrojen sülfürün yüzeye çıkarılması ve hidrojen üretiminde kullanılabilir hale getirilmesi için gereken süreçler, bölgenin doğal zenginlikleri ve teknolojik olanakları ile desteklenmektedir. Karadeniz'in derinliklerinde bulunan hidrojen sülfür rezervleri, hidrojen enerjisi üretiminde önemli bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Bu süreçte, yüzeye çıkarılan hidrojen sülfür, elektrik enerjisi kullanılarak sülfür bileşenlerinden ayrıştırılabilir. Özellikle bu işlemler için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması, süreci daha çevreci hale getirebilir.⁴⁹

⁴⁷ IIEEC, Türkiye İçin Yeşil Hidrojen Geleceği, 2023

⁴⁸ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi s.73

⁴⁹ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi s.73

Ayrıca Karadeniz, enerji geçiş güzergahı olarak sadece kıyıdaş ülkeler değil, Balkanlar ve Hazar Denizi bölgeleri için de stratejik bir öneme sahiptir. Rusya'nın Ural ve Sibirya bölgelerinde ürettiği petrolü, Karadeniz üzerinden Boğazlarımızdan (İstanbul ve Çanakkale) geçerek dünyaya ihraç etmesi, enerji geçişinde Karadeniz'in kritik rolünü pekiştirmektedir. Buna ek olarak, kıyıdaş olmayan Azerbaycan ve Kazakistan da çıkardıkları petrolü bu bölge üzerinden ihraç etmektedir. Bu durum, askeri, ekonomik ve siyasi açıdan Karadeniz'i jeopolitik bir rekabet alanı haline getirmekte ve ilerleyen yıllarda bu bölgede daha fazla çatışma yaşanma ihtimalini artırmaktadır.

Doğalgaz kullanımının küresel ölçekte arttığı bu dönemde, Karadeniz'in bir enerji transit merkezi olarak rolü daha da önem kazanmıştır. Avrupa'nın baş doğalgaz tedarikçisi olan Rusya, Karadeniz üzerinden doğalgaz boru hatlarıyla enerji güvenliğini sağlamakta; Mavi Akım ve Türk Akımı projeleri bu kapsamda Türkiye ve Avrupa için stratejik bir konumda bulunmaktadır. Türkiye, Karadeniz'deki doğalgaz kaynakları ve potansiyel hidrojen sülfür rezervleri sayesinde mavi hidrojen üretimi yapabilecek kapasiteye sahiptir. Zonguldak'ta inşası devam eden Filyos Limanı gibi altyapı projeleri, Türkiye'nin hidrojen ekonomisinde hidrojen sülfürden hidrojen üretimi özelinde bir bölgesel oyuncu olarak öne çıkmasına katkı sağlayabilir. Hidrojen, boru hatları ve gemiler aracılığıyla taşınarak hem iç pazara hem de ihraç edilecek şekilde değerlendirilme potansiyeline sahiptir.⁵⁰

4.5.7.2 Nükleer Enerjiden Hidrojen Üretimi

Nükleer enerjiden hidrojen üretimi, suyun yüksek sıcaklıkta ayrıştırılması ve elektroliz yöntemleriyle gerçekleştirilebilir. Bu süreçte, nükleer enerjiden sağlanan yüksek ısının, suyun oksijen ve hidrojen elementlerine ayrılmasını kolaylaştırdığı görülmektedir. Özellikle pembe hidrojen adı verilen bu üretim türü, nükleer reaktörlerde üretilen çok yüksek sıcaklıkların elektroliz sürecini daha verimli hale getirmek için kullanılmasıyla dikkat çekmektedir. Mevcut nükleer santraller, doğal gaz kazanlarından daha düşük maliyetlerle yüksek kaliteli buhar üretebilir ve buhar reformasyonu dahil birçok endüstriyel işlemde kullanılabilir. Bununla birlikte, bu yüksek kaliteli buhar elektrolize edildiğinde ve saf hidrojen ile oksijene ayrıştırıldığında yüksek verimde hidrojen elde etmek mümkün olabilmektedir. 1.000 MW'lık bir nükleer reaktörden yılda 200.000 ton hidrojen üretimi mümkün olmaktadır. Bu yöntemle suyun ayrıştırılması esnasında karbon emisyonu söz konusu olmadığından, çevreye duyarlı bir enerji üretim süreci sağlanmış olur.⁵¹

Ayrıca, nükleer enerji kullanılarak gerçekleştirilen bu süreç, hidrojen üretimi için sürekli ve kesintisiz bir enerji kaynağı sunmaktadır. Güneş veya rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olduğu durumlarda, nükleer enerji stabil bir enerji sağladığından hidrojen üretimi açısından önemli bir avantajdır. Bu açıdan, nükleer tabanlı hidrojen üretimi, hidrojen üretimi göz önüne alındığında yeşil enerjiye geçiş sürecinde karbon ayak izini azaltmaya yönelik sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Nükleer enerjiden hidrojen üretimi Türkiye'nin güncel planlamasında yer almamaktadır. Bunun temel sebebi Sinop ve Mersin illerinde kurulması planlanan nükleer enerji reaktörlerinin ülkenin elektrik ihtiyacının karşılanmasında baz yük olarak değerlendirilme amacından kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin termik ve doğalgaz çevrim santrallerinde kullanmış olduğu ham maddelerin ithal edilmesi nedeniyle nükleer enerjiden üretilen elektrik ikame güç olarak kullanımı planlanmaktadır. İlerleyen süreçte güneş ve rüzgâr enerjisinden hidrojen üretiminin piyasasının oluşması, elektrikte arz ve talebi cari açık yaratmaksızın dengelenebildiği projeksiyonda Türkiye'de hidrojen üretimi nükleer kaynaklardan sağlanabilme ihtimali bulunmaktadır. OECD ülkelerine kıyasla elektrik talebi düşük seviyede artış gösterilmesi buna karşılık Net Sıfır Emisyon Senaryosu ve Paris İklim

⁵⁰ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi s.74

⁵¹ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi s.45

Anlaşmasından kaynaklı yeşil enerjinin de desteklenmesi halinde nükleer potansiyelin hidrojenle değerlendirilmesi gündeme gelebilecektir.⁵²

4.5.7.3 Hidrojen Üretiminde Karbon Emisyonu ve Karbon Yakalama Teknolojileri

Nüfus artışı, sanayileşme, ürün çeşitliliği-arzı vb. nedenler ile birlikte oluşan enerji talebinin büyük çoğunluğu fosil yakıt ve türevi hidrokarbonlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşan karbon salınımlarının küresel iklim değişikliğine olan etkisi göz ardı edilemeyecek seviyeye ulaşmıştır. Ülkelerin, net sıfır emisyonu hedeflerinde yer alan taahhütlerin eksiksiz yerine getirilmesi halinde dahi 2050 yılında, dünya genelinde yaklaşık 22 milyar ton co2 emisyonu bulunacaktır.⁵³

Özellikle fosil yakıtlardan hidrojen üretiminde (üretilen toplam hidrojen miktarının %80'i), yan ürünlerde, hidrojenden farklı olarak sülfür oksit, nitrojen oksit, cıva, metan gazı da mevcuttur. Metan gazı atmosfere ulaştığında 100 yıldan daha uzun süre boyunca, iklime karbon dioksitten 28 kat daha fazla zarar vermektedir. Hatta 20 yıl boyunca karbon dioksit nazaran 84 kat daha güçlü bir etkisi söz konusudur.⁵⁴

Dünyada üretilen hidrojen üretiminde açığa çıkan karbon emisyonu, toplam emisyonların %2'sine denk gelmektedir. Karbon salınımları ile birlikte küresel iklim değişikliği tehlikesinin önlenmesi konusunda ülkeler ve ülkeler arası iş birlikleriyle beraber 3 ana noktada toplanmaktadır. Bunlar; Net Sıfır Karbon Emisyonu, Yeni Momentum, Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS - Carbon Capture, Utilization, and Storage) teknolojilerinin geliştirilmesidir. Küresel iklim kriziyle mücadelede etkin rol oynayacak hidrojen potansiyeli, günümüzde depolama ve transit zorluğu, taşıma maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle yaygınlaşamamıştır. Ancak hidrojen talebindeki artış ile birlikte, sektörel projelerin genişletilmesi ve geliştirilmesi, enerji verimliliği ve güvenliği önlemleri, karbon yakalama teknolojilerinin kullanımına bağlı olarak gelişme gösterecektir. Hidrojen talebinin 2030 yılında 130 Mt'a, 2050 yılına kadar ise 500-680 Mt'a çıkması beklenmektedir.⁵⁵

4.5.7.3.4 Karbon Yakalama Teknolojileri

Karbon yakalama teknolojileri ilk olarak doğal gaz rezervlerinde bulunan gaz karışımından, karbon dioksitin ayrıştırılması amacıyla kullanılmaktaydı. Böylelikle metan içerisinde bulunan karbon dioksitler ayrıştırılarak, saf halde bir gaz çıkışı sağlanmaktaydı. Ancak karbon emisyonlarının, küresel iklim değişiklikleri üzerinde yarattığı etki, Paris Anlaşması ve Yeşil Mutabakat ile küresel çapta sıcaklık artışının belirli bir seviyeye indirilmesi amacıyla, günümüzde bilinen haliyle karbon yakalama teknolojileri üzerine çalışmalar ve projeler geliştirilmeye başlamış ve yüksek ivme ile birlikte devam etmektedir.

Günümüzde bilindiği anlamıyla karbon yakalama teknolojilerinin temel fikri, diğer bir deyişle karbon dioksitin yakalanması ve atmosfere sayılmasının önlenmesi ilk olarak 1970'lerde ortaya atılmıştır. Dünyanın ilk

⁵²Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye'nin Nükleer Santral Projeleri: Soru-Cevap, 2016 s.1

⁵³ International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023

⁵⁴ Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi, 2023, Enerji Krizinin Çözümünde Yeşil Hidrojen Devrimi I: Sürdürülebilir Gelecekte Yeşil Hidrojenin Yeri, Araştırma Raporu

⁵⁵ Leah Garden, 2023, Making Sense of the Hydrogen Rainbow, World Economic Forum

⁵⁶ International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023
International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023

büyük ölçekli Geliştirilmiş Petrol Üretimi (enhanced oil recovery-EOR) projesi Ocak 1972’de Chevron tarafından Teksas’ta devreye alınan SCurry Bölgesi Kanyon Resifi İşletme Komitesi projesidir. Bu proje kapsamında sahada petrol sondajı için kullanılan karbondioksit, Colorado’daki Val Verde Havzası ve doğal karbon dioksit alanlarından temin edilmekte ve petrol sahasına boru hattı ile taşınmaktadır.⁵⁷

Karbon yakalama teknolojileri ile birlikte; fosil yakıtlardan enerji üretimi, demir-çelik ve çimento üretimi, endüstriyel ve rafine süreçleri sonucunda doğaya salınan karbon dioksitin, küresel iklim değişikliğine olan etkisinin azaltılması amaçlanmaktadır. Karbon yakalama teknolojisi ile birlikte doğaya yayılan, küresel iklimi olumsuz etkileyen gaz karışımından, karbon dioksitin ayrıştırılması gerçekleştirilmektedir.

IEA’ya göre fosil yakıtların kullanımından kaynaklı emisyonlarda, karbon yakalama teknolojilerinin kullanılmaması halinde, belirlenen Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşmanın zor veya imkânsız olacağı belirtilmektedir. Karbon yakalama teknolojilerinin yoğun olarak kullanıldığı alanlardan ikisi petrol ve doğal gaz endüstrisidir. Günümüzde yakalanan toplam 40 milyon ton karbon dioksitin yaklaşık %75’i petrol ve doğal gaz proseslerinden yakalanmaktadır. NZE'deki yakalama hacimleri, şu anda geliştirilmekte olan projeleri yansıtabilecek şekilde, önümüzdeki beş yıl içinde yıllık yaklaşık 40 Mt CO₂ seviyesinden marjinal olarak artmaktadır, ancak politika eylemi meyvelerini verdikçe sonraki 25 yıl içinde hızlı bir genişleme olacaktır. 2030 yılına kadar küresel olarak yılda 1,6 Gt CO₂ yakalanırken, bu rakam 2050 yılında 7,6 Gt CO₂ 'a yükselecektir. Karbon yakalama teknolojilerinin özellikle doğal gaz ve petrol şirketlerinin etkin rolü de göz önünde bulundurulduğunda, Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşmada anılan şirketler ile işbirliğinin gerçekleştirilmesi hükümetler açısından önem teşkil etmektedir.

Karbon yakalama teknolojileri temelde iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar biyolojik karbon yakalama ve yapay/jeolojik karbon yakalamadır. Biyolojik karbon yakalama teknolojilerinde, ormanlar, okyanuslar gibi alanlar kullanılmaktadır. Yapay yakalama metodlarında ise endüstriyel tesisler, demir-çelik fabrikaları, çimento üretim tesisleri, rafineriler gibi beşeri mekanlar kullanılmaktadır.

Yapay yakalama yöntemlerinde ise genellikle karbon soğurma, yüzeyde tutma, membran ile karbon yakalama, kriyojenik proses ile karbon yakalama teknikleri kullanılmaktadır.⁵⁸ Bu teknikler arasında karbon soğurma, 40 yılı aşkın süredir karbon dioksiti diğer gazlardan ayırtmak için kullanılan en eski teknolojidir. Uzun süredir kullanılmasından dolayı, en fazla Ar-GE çalışmaların gerçekleştiği, kısa ve orta vadelerde, projelerde en çok tercih edilecek olan yöntemdir.⁵⁹

4.5.8 Hidrojen Renkleri

Yukarıda aktarılmış olan hidrojen üretim yöntemlerine göre “Hidrojen Gökkuşağı” olarak isimlendirilen bir renk sınıflandırılması ile sistematikleştirme gerçekleştirilmiştir.

⁵⁷ TSKB Enerji Çalışma Grubu, 2023, Karbon Yakalama Ve Depolama Teknolojileri Bilgilendirme Notu,

⁵⁸ TSKB Enerji Çalışma Grubu, 2023, Karbon Yakalama Ve Depolama Teknolojileri Bilgilendirme Notu,

⁵⁹ TSKB Enerji Çalışma Grubu, 2023, Karbon Yakalama Ve Depolama Teknolojileri Bilgilendirme Notu

4.5.8.1 Kahverengi Hidrojen

Linyit kömürünün, kahverengi özelliğinden dolayı kahverengi hidrojen olarak nitelendirilmektedir. Kahverengi hidrojen, linyit kömürünün gazlaştırma prosesi ile hidrojen moleküllerine ayrıştırılması söz konusudur. Bir ton linyit kömüründen gerçekleştirilen hidrojen üretiminde açığa yaklaşık 20 ton karbon emisyonu çıkmaktadır.⁶⁰

4.5.8.2 Siyah Hidrojen

Siyah hidrojen; siyah kömürün, gazlaştırma prosesi ile moleküllerine ayrıştırılmasından üretilmektedir. Kahverengi Hidrojen’de olduğu gibi Siyah Hidrojen’de de doğaya, küresel iklim krizini tetikleyecek şekilde karbon emisyonu salınır. Siyah ve Kahverengi Hidrojen, doğaya en zararlı üretim yöntemidir.

4.5.8.3 Gri Hidrojen

Hidrojen üretim yöntemleri arasında dünya genelinde en sık başvurulan yöntemdir. Doğal gazın, buhar metan reformasyonu yöntemiyle hidrojen elde edilmesi sürecini açıklamaktadır. Her bir ton doğal gazdan, hidrojen üretiminde doğaya yaklaşık 12 ton karbon emisyonu salınımı gerçekleşmektedir.⁶¹ Ayrıca doğal gazın kullanımı ile birlikte, metan gazı sızıntısı da beraberinde gelmektedir.⁶²

4.5.8.4 Mavi Hidrojen

Doğal gaz ile yüksek sıcaklıkta bulunan su buharının tepkimesiyle hidrojen elde etme yöntemidir. Bu üretim yönteminde, süreçte ortaya çıkan karbon dioksit, CCUS yöntemleri ile yakalanmakta ve depolanmaktadır. Bu yönüyle mavi hidrojen, düşük emisyonlu hidrojen üretim teknolojileri arasında yer almaktadır.⁶³

İfade edildiği üzere Mavi Hidrojen yönteminde, açığa çıkan karbon emisyonlarının tamamı tutulmamaktadır. Özellikle doğal gazın içeriğinde yer alan metanın çevreye olan zararı da göz önüne alındığında, küresel çapta yaygın olarak kullanılan bu yöntem eleştirilebilecektir. Ancak yeşil hidrojen geçişte, birçok uzman tarafından çözüm olarak mavi hidrojen yönteminin tercih edilebileceği söylenmektedir.

Enerji ve Tâbii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye Hidrojen Stratejileri Strateji ve Yol Haritası’nda, Türkiye’nin yerli kaynaklarından üretilecek olan mavi hidrojenin, yeşil hidrojene geçişte etkililiği olacağı ve geçiş sürecinde ortaya çıkacak hidrojen talebinin, mavi hidrojenle karşılanacağından bahsedilmektedir.

⁶⁰ Gareth Dale-John Szabo, 2023, Green Hydrogen: Why Low-Carbon Fuels Are not Benefiting From High Fossil Fuel Prices, The Conservation

⁶¹ Gareth Dale-John Szabo, 2023, Green Hydrogen: Why Low-Carbon Fuels Are not Benefiting From High Fossil Fuel Prices, The Conservation

⁶² Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi, 2023, Enerji Krizinin Çözümünde Yeşil Hidrojen Devrimi I: Sürdürülebilir Gelecekte Yeşil Hidrojenin Yeri, Araştırma Raporu

⁶³ Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi, 2023, Enerji Krizinin Çözümünde Yeşil Hidrojen Devrimi I: Sürdürülebilir Gelecekte Yeşil Hidrojenin Yeri, Araştırma Raporu

4.5.8.5 Yeşil Hidrojen

Güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen, çevreye herhangi bir karbon salınımı gerçekleşmeyen hidrojen türüdür.

4.5.8.6 Turkuaz Hidrojen

Turkuaz Hidrojen, hidrojen literatürüne sonradan dahil olan üretim yöntemidir. Bu yöntemde, yeşil ve mavi hidrojen karması benimsenmiştir. Fosil kaynaklarda yer alan hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde açığa çıkan ısı ile birlikte ayrıştırılmakta ve metan gazı, piroliz yöntemi ile birlikte katı karbonlara dönüştürülerek depolanmaktadır. Bu yöntem düşük emisyonlu karbon yöntemleri arasında sayılmaktadır.

4.5.8.7 Pembe Hidrojen

Nükleer enerji santrallerinde üretilen enerjinin, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen elde edilmesi yöntemidir. Hesaplamalara göre 1.000 mW'lık bir nükleer reaktörden yılda 150.000 ton hidrojen üretilmesi mümkün hale gelmektedir.⁶⁴

4.5.9 YEŞİL HİDROJEN FİNANSMANI

4.5.9.1 Finansal Politikalar

Yeşil hidrojen yatırımları, 2024 itibarıyla hız kazanarak küresel enerji geçişinde en dinamik alanlardan biri haline gelmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen yeşil hidrojen, özellikle çelik, çimento ve ağır taşımacılık gibi karbon yoğun sektörlerde fosil yakıtların yerine geçebilecek çevreci bir alternatif sunması nedeniyle yatırım ivmesi tercih yerine zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, 2050'ye kadar karbon nötrlüğüne ulaşmayı hedefleyen birçok ülke, yeşil hidrojeni enerji stratejilerinin merkezine koymaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın Net Sıfır Emisyon (NZE) senaryosuna göre, küresel hidrojen talebinin 2050'ye kadar 500 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir. Bu büyük talep, sektörde geniş çaplı yatırım fırsatlarına işaret ederken, teknolojik gelişmelerle maliyetleri düşürme çalışmalarını da teşvik etmektedir.⁶⁵

Yeşil hidrojen sektörüne yönelik sermaye akışı, hükümetlerin ve özel sektörün destekleriyle hızla artmaktadır. 2024 ve sonrasında, düşük emisyonlu hidrojen projelerine olan talep artışı doğrultusunda önemli yatırım artışları yaşanması beklenmektedir. Örneğin, 2050 yılına kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu doğrultusunda 41 milyar dolarlık bir elektrolizör kurulum harcaması hedeflenmekte, ancak bu hedefe ulaşmak için yatırımların

⁶⁴ International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023

⁶⁵ Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector," 2021.

%50 oranında artırılması gerekmektedir.⁶⁶ 2022 ve 2023 yılları, düşük emisyonlu hidrojen projelerinde bir dönüm noktası olarak kabul edilirken, büyük ölçekli projelere yapılan nihai yatırım kararları, küresel hidrojen ekonomisine güçlü bir nakit akışı sağlamaktadır. Bu projelerden biri, Suudi Arabistan'da inşa edilen 2 GW kapasiteli elektrolizörlü yeşil hidrojen projesidir; diğeri ise Umman'da yer alan ve 320 MW kapasiteli yeşil hidrojen ve amonyak üretimi hedefleyen projedir. Her iki proje de 2026 yılı itibarıyla ihracat amaçlı üretim yapmayı hedeflemekte olup, bu girişimler iki ülkenin fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma stratejileriyle de uyumlu olarak dikkat çekmektedir.⁶⁷

Avrupa'da ise, Shell'in Hollanda'da başlattığı hidrojen projesi dikkat çekmektedir. Shell, burada Avrupa'nın en büyük hidrojen üretim tesisini kurmayı planlayarak yenilikçi teknolojilerle yeşil hidrojenin maliyetlerini düşürmeyi ve küresel hidrojen pazarında liderliği ele geçirmeyi hedeflemektedir. 2024 ve sonrası için yenilikçi teknolojilerin yaygınlaşması, elektrolizör maliyetlerinde önemli düşüşler sağlayarak yeşil hidrojenin rekabetçiliğini artıracaktır. Alkalın ve Polimer Elektrolit Membran (PEM) elektrolizörler yaygınlaşırken, katı oksit elektroliz (SOEC) gibi yeni teknolojiler daha düşük maliyetli ve verimli üretim sağlama potansiyeli sunmaktadır. 2024'te elektrolizör maliyetlerinin kilogram başına 2-4 dolar seviyelerine inmesi, 2030 yılına kadar ise 1 dolara kadar gerilemesi beklenmektedir.⁶⁸

Yeşil hidrojenin üretim maliyeti büyük ölçüde elektrolizör maliyetleri ve enerji fiyatlarına bağlıdır. Günümüzde kg başına 8-9 dolar olan üretim maliyetinin, yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüşler ve elektrolizör verimliliğindeki gelişmelerle 2030 yılına kadar kg başına 2 dolara inmesi beklenmektedir. Karbon fiyatlandırması gibi ekonomik teşvikler de yeşil hidrojenin fosil yakıtlarla daha kolay rekabet edebilmesini sağlayacaktır. Örneğin, karbon fiyatları, fosil yakıtlara dayalı hidrojen üretiminin maliyetini artırarak yeşil hidrojenin cazibesini daha da yükseltebilir.⁶⁹

Yeşil hidrojenin ekonomik katkıları ise oldukça çeşitlidir. Yeşil hidrojen yatırımları, enerji arzında çeşitlendirme sağlayarak fosil yakıt ithalatını azaltır ve enerji güvenliğine katkı sağlar. 2024'ten itibaren hız kazanan bu yatırımlar, özellikle enerji ithalatına bağımlılığı yüksek ülkeler için stratejik bir istikrar sağlamaktadır. Büyük ölçekli altyapı yatırımları, yenilikçi finansman modelleri ve sektörel teşviklerle desteklenen yeşil hidrojen ekonomisi, fosil yakıtlardan bağımsız bir enerji sistemine geçişte önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.⁷⁰

Küresel pazarda düşük emisyonlu hidrojenin boyutlandırılması yukarıda bahsedilen projelere bağlı olmakla birlikte talep artışı ile şekillenmesi hedeflenmektedir. Zira projelere yapılan yıllık sermaye yatırımları taleple birlikte artış gösterecek, bu artış değer zincirinin diğer parçası olarak kabul edilen donanım aşimleri ve kurulum sözleşmeleri ile birlikte tedarikçilere geçecektir. Salt yeşil hidrojenin üretimi odaklı dünya çapında sermaye akışı sağlansa da hidrojenin depolanması ve taşınması hidrojen sektörünün kaçınılmaz bir ihtiyacı olarak düşünülmektedir. Günümüz itibarıyla yapılan yatırımlar tam piyasa oluşumunu karşılamayabilir. Ekipman, altyapı, üretim, nakliye ve dönüşüm kısmının tam olarak oluşması için yatırımların artış göstermesi gerekmektedir. Belirlenmiş Politikalar Senaryosunda pazar büyüklüğünün 2030 yılında 12 milyar dolara yükselmesi beklenmektedir. Kıyas yapıldığında 2024 yılı güneş yatırımlarının bir kısmı kadar bir Pazar büyüklüğü eşdeğer olarak kabul edilmektedir.⁷¹

⁶⁶ International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023.

⁶⁷ NEOM Yeşil Hidrojen Şirketi, "Basın Bülteni: Yeşil Hidrojen Projesi Detayları," 2023.

⁶⁸ Shell, "Hollanda Hidrojen Tesisi Proje Açıklaması," Shell Resmi Basın Bildirisi, 2024.

⁶⁹ Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), "Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolyzers to Meet Net Zero Goals," 2023.

⁷⁰ IEA, "The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities," 2023

⁷¹ Avrupa Komisyonu, "Clean Hydrogen Partnership: Strategic Research and Innovation Agenda," 2023.

Küresel enerji krizinin etkilerinin sürdüğü bu dönemde, Avrupa ve Kuzey Amerika'da hidrojen ekonomisini desteklemeye yönelik önemli politika girişimleri dikkat çekmektedir. Bu politikalar, özellikle yeni hidrojen projelerinin finansmanı ve altyapısının güçlendirilmesine odaklanmakta olup, kamu finansmanı yoluyla bölgesel değer zincirlerinin güvence altına alınmasını hedeflemektedir.⁷² Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2022 tarihli Enflasyon Azaltma Yasası, Hidrojen Merkezleri girişi ve genişletilen Krediler Program Ofisi, yeni yatırımlar için önemli destek mekanizmaları sunmaktadır. Avrupa'da ise Avrupa Hidrojen Bankası ve IPCEI çerçevesinde sunulan hibeler, sürdürülebilir hidrojen projelerine yönelik önemli teşvikler sağlamaktadır.⁷³

ABD Enflasyon Azaltma Yasası, düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji teknolojilerini teşvik etmek için kapsamlı bir vergi kredisi sistemini uygulamaya koymuştur. Bu yasanın sağladığı vergi teşvikleri, özellikle elektrolizör üretim tesislerinin ABD'de kurulmasına yönelik güçlü bir çekim merkezi oluşturmuştur. Bu yasayla sunulan teşviklerin temel avantajı, performansla göre ödeme ve proje bazlı finansman yarışmalarından farklı olarak, uzun vadeli projelere finansal istikrar sağlamasıdır. Ayrıca, bu vergi kredileri ABD sınırları dışında da projelere yatırım yapılmasını engellemeyecek şekilde tasarlanmıştır, çünkü yasada yerel içerik gereklilikleri bulunmamaktadır.⁷⁴

2021'de başlatılan Hidrojen Merkezleri girişi, ABD'de hidrojen değer zincirinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu girişim kapsamında, bölgesel hidrojen merkezlerinin kurulması için kaynak sağlamak ve hidrojen altyapısının geliştirilmesi desteklenmektedir. Bu merkezler, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak temiz hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımı için bölgesel ağlar oluşturmayı hedeflemektedir.⁷⁵

Krediler Program Ofisi'nin Genişletilmesi ABD Enerji Bakanlığı'na bağlı Krediler Program Ofisi, yenilenebilir enerji projeleri için geniş bir kredi havuzu sunarak hidrojen projelerine ek finansman sağlama kapasitesine ulaşmıştır. Bu program, yüksek sermaye gereksinimleri olan elektrolizör gibi projelere yönelik yatırım riskini azaltarak, daha fazla özel sektör yatırımını çekmeyi amaçlamaktadır.⁷⁶

Avrupa'nın hidrojen politikası, 2021 yılında Avrupa Komisyonu'nun Fit for 55 paketi kapsamında sunduğu önerilerle gündeme gelmiş ve 2023 yılında Yenilenebilir Enerji Direktifi'nin (RED II) revize edilmesiyle bağlayıcı hedeflerle desteklenmiştir. Bu kapsamda, sanayi ve ulaşım sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımı teşvik edilerek, 2030 yılına kadar bu sektörlerde hidrojenin yaygın bir enerji kaynağı haline gelmesi amaçlanmaktadır. Yenilenebilir hidrojenin karbon emisyonlarını azaltmadaki kritik rolü göz önünde bulundurularak bu hedefler bağlayıcı hale getirilmiştir.

Hidrojen politikasının diğer önemli bir parçası da 2024 yılında yürürlüğe giren "Hidrojen ve Karbondan Arındırılmış Gaz Piyasa Paketi"dir. Bu paket, Avrupa'da hidrojen için özel altyapının kurulmasını, hidrojenin dağıtımı ve kullanımında daha verimli bir piyasa oluşturulmasını amaçlamaktadır. Piyasa paketi, hidrojenin üretimden nihai kullanıma kadar taşınabilmesi ve depolanabilmesi için gerekli altyapı standartlarını ve piyasa düzenlemelerini kapsamaktadır. Ayrıca bu paket, yenilenebilir ve düşük karbonlu gazların Avrupa enerji sistemine entegrasyonunu hızlandırmak için bir dizi teşvik mekanizması içerir.⁷⁷

⁷² Uluslararası Hidrojen Konseyi, "Global Hydrogen Flows 2023: Financing the Future of Green Hydrogen," 2023.

⁷³ Avrupa Komisyonu, "AB Hidrojen Bankası: Yenilenebilir Hidrojen İçin İlk Açık Artırmanın Başlatılması," 2023.

⁷⁴ ABD Enerji Bakanlığı (DOE), "Inflation Reduction Act: Clean Hydrogen Production Tax Credit," 2022.

⁷⁵ ABD Enerji Bakanlığı, "Hydrogen Hubs Initiative Overview," 2021.

⁷⁶ ABD Enerji Bakanlığı Krediler Program Ofisi, "Loan Programs for Clean Energy Projects," 2023.

⁷⁷ Avrupa Komisyonu, "Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target," 2021; "Renewable Energy Directive (RED II) Revision," 2023

Avrupa Birliği'nin hidrojen stratejisi (AB Hidrojen Stratejisi – COM/2020/301) çerçevesinde, 5 ana başlık altında 20 temel eylem belirlenmiştir. Bu strateji, öncelikle temiz hidrojenin ölçeklendirilmesine, piyasa oluşumuna, altyapı geliştirilmesine ve uluslararası iş birliklerine odaklanmaktadır:

Hidrojen Üretimi ve Yaygınlaştırılması: İlk aşamada (2020-2024) AB, en az 6 GW yenilenebilir hidrojen elektrolizörü kurmayı ve yıllık 1 milyon tona kadar yenilenebilir hidrojen üretimini hedeflemektedir. 2025-2030 döneminde ise bu hedef, 40 GW'a yükseltilmiş olup yıllık 10 milyon ton üretim kapasitesine ulaşılması amaçlanmaktadır. Bu hedefler, hidrojen teknolojisinin ölçeklendirilmesini sağlayacak yatırımlar ve teknoloji geliştirme projeleriyle desteklenmektedir.⁷⁸

Hidrojen, özellikle çelik ve kimya gibi karbon yoğun endüstrilerde fosil yakıtların yerine geçerek emisyonları azaltmada kritik rol oynamaktadır.⁷⁹ Hidrojenin rafinerilerde ve kimya tesislerinde kullanımı ile bu endüstrilerde karbon ayak izinin önemli ölçüde düşürülmesi hedeflenmektedir. Bunun yanında, hidrojenin ulaşımda tır ve otobüs gibi ağır taşıtlarda ve uzun mesafeli taşımacılıkta kullanımı da önceliklendirilmiştir.⁸⁰

AB'nin hidrojen stratejisi, hidrojenin taşınması ve depolanması için altyapının geliştirilmesini içermektedir. Yenilenebilir hidrojen üretimi, özellikle yenilenebilir enerjinin yüksek olduğu dönemlerde üretilip depolanarak enerji sistemine esneklik kazandırmaktadır. Bu aşamada, hidrojenin yerel olarak üretildiği ve kullanıldığı "hidrojen vadileri" konsepti geliştirilmiştir. Hidrojen vadileri, belirli bir coğrafi bölgede hidrojen üretim ve kullanımını entegre ederek yerel ekonomiyi desteklemektedir.⁸¹

Avrupa Birliği, hidrojenin karbon ayak izini hesaplamaya yönelik düzenlemeler getirmiştir. Bu kapsamda 2023'te kabul edilen iki devredilmiş yasa bulunmaktadır: Birincisi, biyolojik olmayan yenilenebilir yakıtlar (RFNBO) için kriterler belirlerken; ikincisi, yenilenebilir hidrojenin sera gazı emisyonlarının yaşam döngüsü bazında hesaplanmasını sağlayan bir hesaplama sistemini içermektedir. Buna ek olarak, düşük karbonlu hidrojenin yaşam döngüsü emisyonlarının belirlenmesi ve bu standartların izlenmesi için çalışmalar devam etmektedir.⁸²

Uluslararası İş Birlikleri ve Yatırım Stratejisi: AB, hidrojen teknolojilerini geliştirme ve üretme konusunda dünya çapında bir lider olmayı hedeflemekte olup, bu hedefe ulaşmak için dış pazarlarda iş birliklerini teşvik etmektedir. Komisyon, AB içinde temiz hidrojen değer zincirinin geliştirilmesi ve uluslararası pazarlarda AB menşeli teknolojilerin rekabet gücünün artırılması için Avrupa Temiz Hidrojen İttifakı'nı kurmuştur. 2050 yılına kadar, AB'de yenilenebilir hidrojen alanında 470 milyar Euro'ya kadar yatırım yapılması öngörülmektedir. Bu ittifak, hidrojen projelerinin koordinasyonunu sağlamak ve hidrojen altyapısına yönelik finansman olanakları sunmaktadır.⁸³

AB Hidrojen Stratejisi, enerji bağımsızlığı, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyüme hedeflerini birleştiren bir vizyon ortaya koymaktadır. Bu strateji kapsamında, Avrupa Hidrojen Bankası, Mart 2023'te Avrupa Komisyonu tarafından kurulmuş bir finansman aracı olarak kullanılmıştır. Banka, hidrojen projeleri için tersine açık artırmalar yoluyla destek sağlamaktadır. İlk açık artırma, İnovasyon Fonu'ndan 800 milyon Avro bütçe ayırarak, hidrojen birimi başına en düşük teklifi veren projelere finansman sağlayacaktır.⁸⁴ Bu teşvik, özellikle Avrupa Birliği çevresel kriterlerine uygun projelere yönelik olup, sürdürülebilir hidrojen projelerini desteklemeye odaklanmaktadır. Hidrojen projelerinde 2022'den bu yana maliyet enflasyonu, ekipman ve işçilik maliyetlerinin yanı sıra kredi faiz oranlarının artmasına neden olmuştur. Bu durum, özellikle yüksek sermaye gereksinimleri olan elektrolizör gibi altyapı projeleri için maliyetleri artırmış, bazı projelerin finansal planlarının yeniden

⁷⁸ Avrupa Komisyonu, "A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe," COM/2020/301, 2020.

⁷⁹ Avrupa Çelik Derneği (EUROFER), "Hydrogen in Steelmaking: A Decarbonisation Opportunity," 2023.

⁸⁰ Uluslararası Ulaşım Forumu (ITF), "Hydrogen as a Fuel for Heavy Transport," 2023.

⁸¹ Avrupa Komisyonu, "Hydrogen Valleys: Boosting Local Hydrogen Economies," 2023.

⁸² Avrupa Komisyonu, "Delegated Regulations on RFNBO and Renewable Hydrogen GHG Emissions," 2023.

⁸³ Avrupa Komisyonu, "European Clean Hydrogen Alliance: Strengthening Hydrogen Value Chains," 2023

⁸⁴ Avrupa Enerji Ajansı (IEA), "Hydrogen Projects and Cost Dynamics in Europe," 2023.

değerlendirilmesine yol açmıştır. Avrupa'da, doğal gaz fiyatlarının düşmesi ile hidrojen projelerinin rekabet edebilirliği artarken, yüksek maliyetler bazı projelerde gecikmelere neden olmaktadır.⁸⁵

4.5.9.2 Türkiye Projeksiyonu

Türkiye yayınlamış olduğu Hidrojen Teknolojileri Stratejileri ve Yol Haritasında elektrolizör kapasitesi ile hedefleri 2030 2 GW, 2035 5 GW ve 2053 yılında 70 GW olmak üzere üç parçaya ayırmıştır. Bu doğrultuda yıllık ortalama 2 GW elektrolizör kapasitesinin devreye alınması beklenmektedir. Bu beklentiye karşılamak için sermaye akışının elektrolizör kapasitesi kurulumuna yönelmesi hedeflenmektedir. Kapasitede gelişim ivmesinin 2035 yılı sonrası artacağı tahmin edilmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte talepte gelişimin olması yerli imalat teknikleri ile yetkinliklerinin varlığı büyüme ivmesini destekleme ihtimali barındırmaktadır.⁸⁶

Yeşil hidrojenle eş değer olarak küresel net sıfır gelişim patikasında enerji sektörünün de ihtiyaçları karşılaması diğer bir strateji gerektiren unsurdur. Özellikle elektrik sektöründe genel talep büyümesinin, enerji arz güvenliği ihtiyaçlarının, elektrifikasyonda gelişimin hızla büyümesinde kritik bir viraj bulunmaktadır. Nükleer tesislerle birlikte desteklenen güneş ve rüzgâr gibi elektrifikasyon kaynaklarının artış gerçekleştirilmesi yeşil hidrojen üretiminin büyüme perspektifini artıracaktır. Depolama üniteli elektrik santralleri ile birlikte güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanım sürelerinin uzaması elektrik arzında artış meydana getirecektir.⁸⁷

Bununla birlikte elektrolizör kapasitesinde yol haritasında beklenen gelişim olması elektrik girdisi ihtiyacında da artışı beraberinde getirmektedir. IICEC analizlerinde hedeflenen elektrolizör kurulu gücünü destekleyecek elektrik gereksinimi 2030 yılında 12 TW/saat 2035 yılında 31 TW/saat olarak hesaplanmıştır. Elektrolizör kapasitesinin gerekecek elektrik enerjisi miktarının brüt elektrik talebinin 2035 yılında %6 oranına 2040 yılında %12 oranına 2050 yılında ise %20 oranına denk geleceği beklenmektedir. Oranlar incelendiğinde yeşil hidrojen üretiminin sanayi, ulaştırma gibi elektriğin yüksek miktarda talep edildiği segmentlerden birisi olarak değerlendirilmektedir.

Elektrik girdisinin olduğu yeşil hidrojen üretimi su kullanımını da ihtiyacın olduğu bir proses olarak kabul edilmektedir. 1 kilogram hidrojen üretimi için 16-20 litre su kullanımının sağlandığı bilinmektedir. Yüksek miktarda su kullanımının olduğu sektörde elektrolizör kapasiteleri göz önüne alındığında sürdürülebilir üretim için yer altı kaynak suları, yüzey suları ve deniz suyunun kullanım dengesinin belirlenmesi gerekecektir. Yeşil hidrojen için kullanılacak su miktarının desalinasyon adı verilen yöntemle gerçekleştirildiği senaryoda 56 milyon metreküp su gereksinimine ihtiyaç doğuracağı hesaplanmıştır.⁸⁸

Su ve elektrik girdilerinin yüksek olması sebebiyle Türkiye perspektifinde de yeşil hidrojen maliyetlerinin şu an itibarıyla yüksek olacağı bilinmektedir. 2023 yılında yeşil hidrojen üretim maliyeti kg başına 8.5-9.0 ABD doları seviyesinde yer almaktadır. Maliyeti düşürebilecek rekabetçi elektrik veya su girdisiyle maliyetin azalması beklenmektedir. Türkiye yol haritasında 2053 yılı için kilogram başına 1.2 Dolar maliyeti öngörülmüştür.⁸⁹ Maliyetlerin 8.5-9.0 dolardan 1.2 Dolar seviyesine gerilemesi için yatırımların gerçekleşmesi, yeşil hidrojen sektörünün kalıcı biçimde tüm unsurları ile ülke içi pazarda yer alması gerekmektedir. Yol haritasında yerli yakıt

⁸⁵ Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "The Role of Natural Gas Prices in Hydrogen Market Competitiveness," 2023.

⁸⁶ T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası," 2023.

⁸⁷ ICEC (Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi), "Türkiye'nin Enerji Dönüşümünde Hidrojenin Rolü," 2023.

⁸⁸ Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), "Green Hydrogen Production and Water Use," 2023.

⁸⁹ T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Hidrojen Stratejisi ve Maliyet Projeksiyonları," 2023

pili ve elektrolizör üretiminden bahsedildiyse de AB tarafından desteklenen Güney Marmara Hidrojen Vadisi, Tüpraş ve SOCAR gibi girişimlerin hedeflerinden başka bir yeşil hidrojen elektroliz kapasitesi oluşturulmamıştır.

Yeşil hidrojen yatırımlarının halen oluşmamasında birden fazla etken bulunmaktadır. İlki maliyet enflasyonudur. Maliyet enflasyonu farklı kaynaklardan etkilenmektedir. Bunlar, daha yüksek ekipman maliyetleri, kurulum ve işletme için artan işçilik maliyetleri, borçlanma için daha yüksek faiz oranları (sermaye maliyeti olarak bilinir), daha yüksek yakıt ve elektrik fiyatları, az sayıda mühendislik, tedarik ve inşaat (EPC) yüklenicisiyle çalışmanın getirdiği sınırlı rekabet gibi unsurları içermektedir. ⁹⁰Bu faktörlerin elektrolizör kurulumlarına etkisi oldukça olumsuzdur. Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji tesislerinde olduğu gibi, elektrolizör maliyetleri de genellikle önden karşılanır ve özel yenilenebilir enerji kapasitesi kurulursa işletme maliyetlerinin düşeceği hesaplanmaktadır. Örneğin, sermaye maliyetinin %5'ten %8'e yükselmesi, proje maliyetini yaklaşık üçte bir oranında artırabilir. Ancak elektrolizörlerin yüksek işçilik gerektirmesi, maliyetlerin diğer yenilenebilir enerji türlerine göre daha hızlı artmasına yol açmaktadır. ⁹¹

Bu maliyet artışları, Türkiye özelinde politika hedefleri ve sektörün mevcut durumu arasındaki kopukluktan kaynaklanan gerilimi daha da artırmaktadır. Elektrolizör tedarikçileri arasında rekabet olmasına rağmen bazıları, müşterilerin maliyet beklentilerini karşılayacak ölçekte henüz üretim yapmamaktadır ve endüstri standartlarına uygun performans garantileri sağlayamamaktadır. ⁹²

Türkiye'nin yüksek kaynak potansiyeline sahip bölgelerinde kapasite kullanım faktörleri, rüzgâr için %35, güneş için ise %20 civarındadır. Kaynakların gündüz güneş ve gece rüzgâr olarak birbirlerini tamamlaması varsayımıyla 1 GW güneş ve 1 GW rüzgâr enerjisi, %55 oranında birleşik kapasite faktörü sağlar. Bu kapasitenin günün her saatinde kullanılabilir olması, toplamda en az 36,3 GW yenilenebilir enerji kapasitesini gerektirir ve yaklaşık 36,3 milyar Dolarlık bir yatırım anlamına gelir.

En büyük zorluklar maliyetlerle, yabancı teknolojiye bağımlılıkla ve hidrojen elektrik sistemlerinin verimliliğiyle ilgilidir. Maliyetlerin düşürülmesi, yerli teknolojinin geliştirilmesini gerektirir ve bu durum, sadece kurulu gücün artırılmasından daha fazla çaba gerektirir. ⁹³ Hidrojen üretiminin verimliliğinin artırılması ve enerji sistemine ekonomik entegrasyonu, elektriğin hidrojene çevrilip yakılması gibi çözümlerle sağlanabilir. Yeşil hidrojen üretimi, fosil yakıt muadillerine kıyasla halen maliyet açısından rekabet edebilir durumda değildir ve rekabetçi olabilmek için üretim maliyetlerinin 2-3 ABD\$/kg seviyesine düşmesi gerekmektedir. Bu da elektrolizör maliyetlerini azaltmak için teknolojik gelişime ve ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarına erişimin sürmesine bağlıdır.

4.5.10 Hidrojenin Depolanması

Enerji geçiş sürecinde hidrojeni önemli bir yere taşıyan unsurlardan biri, enerjinin depolanabilirliği ve kullanılabilirliğidir. Özellikle rüzgâr ve güneş gibi değişken enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlamak ve uzun vadeli enerji depolama gereksinimlerini karşılamak açısından hidrojen, çözüm olarak dikkat çekmektedir. Ancak, hidrojenin depolanması yüksek basınç veya düşük sıcaklık gibi teknik gereksinimler nedeniyle hala çeşitli zorluklar içermektedir

⁹⁰ Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "Hydrogen Electrolyzers: Costs and Financing Challenges," 2023.

⁹¹ Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "Hydrogen Electrolyzers: Costs and Financing Challenges," 2023.

⁹² T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Yenilenebilir Enerji Kapasitesi ve Hidrojen Üretimi," 2023.

⁹³ T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Türkiye'nin Enerji Sektöründe Yerli Teknoloji Vizyonu," 2023.

4.5.10.1 Hidrojen Enerjisinin Depolama Yöntemleri

Hidrojen, enerji yoğunluğu açısından cazip bir kaynak olsa da depolanması ve taşınmasında gelişmelerin olma ihtiyacı bulunmaktadır. Hidrojen doğalgaza kıyasla daha hızlı alev alma özelliğine sahiptir. Hidrojen depolanma aşamasında dönüşüm gerçekleşirken kayıplar Depolanması için doğal yerler sınırlı olarak kabul edilmektedir. Yapay depolama teknolojilerinde son yıllarda meydana gelen gelişmeler neticesinde özellikle doğalgaz depolama ve taşıyıcısı şirketlerin hidrojene dair yatırımları bulunmaktadır. Maliyeti azaltıp verimi artırma amacıyla eşitli depolama yöntemleri geliştirilmiş olup her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır.⁹⁴

4.5.10.2 Sıkıştırılmış Gaz Depolama

Araştırmalar neticesinde hidrojen gazının genellikle 350-700 bar arasında basınç altında depolandığı bilinmektedir. Bu, hidrojenin gaz yoğunluğunu artırarak daha az yer kaplamasını sağlamaktadır. 700 bar altında depolanan hidrojenin enerji yoğunluğu yaklaşık 5,6 MJ/L civarında olduğu analizlenmiştir. Depolama maddesi olarak karbon fiber, çelik ya da kompozit tanklar kullanılmaktadır.

1 kg hidrojen için sıkıştırılmış gaz olarak depolama maliyeti 400-600 dolar aralığında seyretmektedir. Hidrojenin sıkıştırılması işleminde %10-15 oranında enerji kaybının bulunduğu bilinmektedir. Enerji kaybının azaltılması için sıkıştırma tekniğinde ar-ge aşamaları devam etmektedir. 350 bar tank maliyeti kg başına yaklaşık 600 dolar, 700 bar ise 700-800 dolar arasında değişmektedir. Hareketli araçlar ve mobil uygulamalarda kolayca kullanılabilir. Mobilite açısından yüksek basınçlı tanklar büyük hacim kaplar ve taşınması sırasında güvenlik riskleri oluşturmaktadır.⁹⁵

4.5.10.3 Sıvılaştırılmış Hidrojen Depolama

Hidrojen -253°C'ye kadar soğutularak sıvı hale getirilmektedir. Sıvı hidrojenin enerji yoğunluğu, gaz fazındaki haline kıyasla yaklaşık 8 MJ/L seviyesinde olduğu bilinmektedir. Sıvılaştırma işleminde yalıtımlı, kriyojenik tanklar kullanılır. Sıvılaştırma enerji yoğun bir işlem olup %30-40 enerji kaybına neden olması nedeniyle halen aktif olarak tercih edilen bir yöntem olarak piyasada yer almamaktadır. Kriyojenik tankların maliyeti tank başına 1000-1500 dolar arasında değişebilir. Tankların maliyeti yüksek olsa da daha yüksek enerji yoğunluğu, uzun mesafe taşıma ve büyük ölçekli depolamada avantaj sağlar. Yüksek soğutma maliyetleri nedeniyle verimlilik düşüktür.⁹⁶

4.5.10.4 Metal Hidrit Depolama

Hidrojen atomları, metal atomlarıyla kimyasal bağ kurarak metal hidrit bileşikler oluşturabilme yapısına sahiptir. Bu sayede düşük basınçta güvenli depolama sağlanmaktadır. İşlemin enerji yoğunluğu yaklaşık 6 MJ/L civarında olduğu bilinmektedir. Piyasa verilerine göre metal hidrit bileşiklerinin maliyetinin kg başına 800-1200 dolar arasında değişmektedir. Sıvılaştırılmış depolamaya kıyasla daha düşük bir maliyete sahiptir. Sıkıştırma yöntemine göre de güvenli ve düşük basınçta çalışma imkanı sağlamaktadır. Yüksek maliyetleri ve ağır yapısı

⁹⁴ Prof. Dr. İbrahim Dinçer, Prof. Dr. İnci Eroğlu, ve Merve Öztürk, Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, 2021.

⁹⁵ Prof. Dr. İbrahim Dinçer, Prof. Dr. İnci Eroğlu, ve Merve Öztürk, Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, 2021.

⁹⁶ Prof. Dr. İbrahim Dinçer, Prof. Dr. İnci Eroğlu, ve Merve Öztürk, Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, 2021.

nedeniyle mobil uygulamalarda sınırlı olması hidrojenin mobilitesinde önemli bir engel teşkil etmektedir. Hidrojen molekülleri karbon nanotüpler veya metal-organik çerçeveler (MOF'lar) içine kimyasal veya fiziksel olarak absorbe edilmektedir. MOF ve karbon nanotüpler, hidrojen depolamada %5-10 kapasiteyle çalışabilir.

Laboratuvar seviyesinde yüksek maliyetlidir, ancak ticari kullanıma uygun hale geldiğinde düşmesi beklenmektedir. Nano teknoloji ile daha yüksek depolama kapasitesi sağlaması hedeflenmektedir. Şu anda geniş çapta uygulanabilir bir seçenek olarak değerlendirilmemektedir.⁹⁷

4.5.10.5 Gelecekteki Hidrojen Depolama Teknolojileri ve Beklentiler

Gelecekteki hidrojen depolama çözümleri, mevcut yöntemleri daha verimli, güvenli ve ekonomik hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar, hidrojen depolama teknolojilerini geliştirmeye ve daha geniş çapta uygulanabilir hale getirmeye odaklanmaktadır. Yenilikçi malzemeler, hidrojen depolama teknolojilerinde önemli gelişmeler sunmaktadır. MOF'lar, zeolitler ve karbon bazlı nanoyapılar, hidrojeni yüksek kapasitede ve düşük basınç altında depolama potansiyeline sahiptir. MOF'lar, gözenekli yapıları sayesinde hidrojeni yüksek yoğunlukta tutarak düşük enerji tüketimiyle verimli bir depolamaya doğru konumlandırmaktadır. Bu tip malzemeler, gelecekte büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde kritik rol oynayabilir.⁹⁸

4.5.10.6 Hidrojenin Bor ile Depolanması

Hidrojen depolama yöntemlerinin ana odakları ekonomik, güvenli ve verimli taşıması olarak kabul edilmektedir. Bu yönde yukarıdaki depolama yöntemlerine ek olarak var olan madenlerin etkin kullanımı için de ar-ge çalışmaları ve öneriler sunulmaktadır. Türkiye bor rezervleri ile dünya çapında ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda borun ulaşım, sanayi, yakıt gibi sektörlerde kullanılmasına yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Bor bazlı antibakteriyel ve temizlik ürünlerinin ticarileştirilebilmiştir. Hidrojende kaynaklar bakımından zengin bir yere sahip olan ülkemizde hidrojen üretimi ve ihracatı için tüm potansiyellerin kullanılması amaçlanmaktadır. Üretimin yoğun olarak yapılması halinde depolama ve taşıma ihtiyacını beraberinde getirecektir.

Yüksek basınç veya düşük sıcaklık gerektiren gaz ve sıvı depolama yöntemleri, genellikle maliyetli ve güvenlik açısından riskli olarak değerlendirilmektedir. Alternatif olarak, katı bor bileşikler, hidrojenin depolanması için güvenilir, yüksek enerji yoğunluklu bir seçenek sunabileceği düşünülmektedir. Bu bileşiklerden özellikle sodyum borhidrür (NaBH_4) ve amonyak boran, yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahip olup, taşınabilirlik ve güvenlik açısından da önemli avantajlar sağlayacağı gözlemlenmektedir. Türkiye'nin sahip olduğu zengin bor rezervleri, hidrojen depolamada bor bazlı malzemelerin kullanılmasını mümkün kılmakta ve enerji dönüşümü sürecinde ülkeye stratejik bir üstünlük sunma ihtimalini barındırmaktadır.⁹⁹

Bu bileşiklerin uzun süre saklanabilmesi ve kontrollü bir şekilde kullanılabilmesi, NaBH_4 'ü taşınabilir enerji sistemleri için cazip bir seçenek haline getirilebilme ihtimalini barındırmaktadır. NaBH_4 ayrıca yakıt hücreleriyle elektrik üretimi için de kullanılma ve özellikle insansız hava araçları (İHA) ve deniz taşıtları gibi taşınabilir enerji gereksinimlerinde büyük bir potansiyelini de içerebilmektedir.

⁹⁷ Prof. Dr. İbrahim Dinçer, Prof. Dr. İnci Eroğlu, ve Merve Öztürk, Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, 2021.

⁹⁸ Fatih Kılıç ve Muhammed Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi, İKSAD Yayınları, 2023.

⁹⁹ Boran A. Development of Sodium Borohydride Hydrogen Gas Generator for portable PEM Fuel Cell Applications, Doktora tezi ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü, 2018

Amonyak boran ise yüksek hidrojen içeriği ve düşük ağırlığı nedeniyle gelecekte hidrojen ekonomisinde daha fazla kullanılabilecek bir diğer bileşik olarak ön plana çıkmaktadır. Katı halde depolanabilirliği sayesinde, enerji taşınımı ve depolama konularında NaBH_4 'e alternatif bir çözüm sunabilecektir. NaBH_4 ve amonyak boranın hidroliz, termal dehidrojenasyon ve metanoliz gibi farklı yollarla hidrojeni serbest bırakma kabiliyeti, bu bileşiklerin çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımını da olanaklı kılacağı araştırma sonucu olarak yer almaktadır.¹⁰⁰

4.5.10.7 Türkiye'nin Bor Kaynakları ve Hidrojen Ekonomisine Katkısı

Türkiye, dünya bor rezervlerinin yaklaşık %70'ini elinde bulundurarak, bor temelli hidrojen depolama alanında büyük bir potansiyele sahiptir. Türkiye'nin hidrojen ekonomisine yönelik stratejik planları doğrultusunda, bor bazlı hidrojen sistemleriyle entegre edilmiş projeler, Türkiye'yi enerji taşınımında dışa bağımlı olmaktan kurtarabilir. Özellikle enerji, ulaşım ve sanayi gibi alanlarda bor bileşikleri sayesinde hidrojenin güvenli depolanması ve taşınması, bu alanlarda karbon salınımını düşürerek temiz enerjiye geçişi hızlandırabilir. Türkiye'nin bu alandaki liderliği, sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik avantajlar da sağlayacaktır. Bor rezervlerinin değerlendirilmesiyle elde edilecek yüksek katma değerli ürünler, ülkenin enerji sektöründe dışa bağımlılığını azaltırken, yeni teknolojilerin gelişmesi için de yerli bir ekosistem yaratılmasına katkı sağlayacaktır.

Bor bazlı hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, Türkiye için sadece bir enerji alternatifi değil, aynı zamanda stratejik bir gelecek olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda hidrojen ekonomisinin bu alanda geliştirilmesi için üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel sektör iş birliğinde AR-GE projeleri desteklenmeli ve yeni teknolojiler teşvik edilmelidir. Bor bazlı hidrojen depolama sistemleri, NaBH_4 ve amonyak boranın yanı sıra diğer bor türevleri üzerine araştırmalarla genişletilebilir. Bu çalışmaların sağladığı bilgi birikimiyle, Türkiye'nin küresel hidrojen pazarında rekabet avantajı elde etmesi imkânı doğabilecektir.¹⁰¹

4.5.10.8 Hidrojen Depolama Ekonomisinin Gelişmesi İçin Gereklilikler

Hidrojenin enerji taşıyıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılması, güvenilir, ekonomik ve yüksek kapasiteli depolama sistemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Hidrojenin maliyetinin düşürülmesi ve depolama sistemlerinin enerji yoğunluğunun artırılması, hidrojenin daha fazla uygulama alanında kullanılabilir olmasını sağlayacaktır. Bu amaçla hidrojen üretim, depolama ve dağıtım altyapılarının geliştirilmesi önemlidir. Örneğin, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen, arz-talep dengesizliklerini gidermede önemli rol oynayabilir. Gelecekte, hidrojen depolama ve kullanım sistemlerinin dijitalleşme ve akıllı ağ sistemleriyle entegre edilmesi beklenmektedir. Bu sayede hidrojen talebine göre arzın otomatik olarak optimize edilmesi mümkün olacak, depolama maliyetleri düşürülecek ve daha sürdürülebilir bir enerji ağı oluşturulacaktır. Dijital teknolojiler, hidrojen altyapısının güvenliğini artıracak ve işletme maliyetlerini azaltacaktır.

4.5.11 Hidrojenin Taşınması

¹⁰⁰ Prof. Dr. İnci Eroğlu ve Prof. Dr. Aysel Kantürk Figen, *Hidrojen Ekonomisinde Bor*, 2021.

¹⁰¹ Aynı metinden.

Hidrojenin üretildikten sonra kullanımına ilişkin bir uygun bir yöntem olarak üretim tesislerinin kullanıcıya yakın bir mesafede kurulumun sağlanmasıdır. Yakın mesafede olmaması halinde üretim tesislerindeki hidrojenin tüketim alanlarına taşınması için hatlara ihtiyaç bulunmaktadır. Üretim tesislerinin son kullanıcıya ulaşımın sağlanmadığı lokal üretimin olmadığı opsiyonlarda hidrojenin geniş çapta dağıtımı kaçınılmaz olacaktır.¹⁰²

Güncel durumda üretim tesislerinden hidrojenin dağıtımı sıvılaştırılmış ve sıkıştırılmış olarak gerçekleştirilmektedir. Hidrojen düşük bir enerji yoğunluğuna sahip bir gazdır. Diğer ham maddelere kıyasla düşük enerji yoğunluğunda bulunması taşınması ve kullanımı açısından sıkıştırılma ihtiyacını barındırmaktadır. Gaz sıkıştırma işleminde kullanılan enerji de halen yüksektir.

Hidrojen, en hafif element olduğu için taşınmasında yoğunluk problemi bulunmaktadır. Düşük yoğunluğu, taşıma sırasında daha fazla hacme ihtiyaç duyulmasına ve maliyetlerin artmasına neden olur. Bu sebeple, hidrojenin taşınmasında boru hatları, demiryolu, deniz ve kara yolları gibi çeşitli taşıma yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin taşınması sırasında güvenlik ve maliyet açısından dikkat edilmesi gereken önemli noktalar vardır. IEA'nın "Global Hydrogen Review 2024" raporu, hidrojen taşınmasının, enerji geçiş hedefleri doğrultusunda büyümesi gerektiğini ve özellikle uzun mesafeli taşımada maliyetleri düşürmeye yönelik çözümlerin öncelikli olduğunu belirtmektedir.

Hidrojen taşımada boru hatları en yaygın yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle orta ve uzun mesafelerde yüksek hacimlerde taşımayı olanaklı kılmaktadır. Ancak, hidrojen moleküllerinin çok küçük yapıda olması nedeniyle çelik boru hatlarında çatlama riski bulunmaktadır. IRENA'nın hidrojen taşımacılığı raporu, bu duruma çözüm olarak fiber takviyeli polimer (FRP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) gibi alternatif malzemelerin kullanılmasını önerir. Bu tür borular, hidrojenin gevrekleştirici etkilerine karşı daha dayanıklıdır ve çatlama riskini azaltır.

Ayrıca, FRP boruların montaj maliyetleri çelik borulara göre %20 daha düşüktür. Bu özellikleri nedeniyle FRP borular, hidrojen taşımacılığı maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir çözüm olarak görülmektedir.¹⁰³

4.5.12 Hidrojenin Kara Yolu ile Taşınması

Genellikle düşük hacimlerdeki taşımalarda kullanılır ve özellikle kısa mesafeler için uygundur. Sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış hidrojen, özel olarak tasarlanmış tankerlerle taşınmaktadır. Bu tankerlere, basınca dayanıklı ve kriyojenik şartları sağlayacak özel yalıtımlar yapılır. Ancak, sıvı hidrojen taşımak için gerekli -253°C derecede düşük sıcaklıkların korunması enerji yoğun bir süreçtir ve bu durum maliyetleri artırır. IEA ve IRENA, bu taşıma yönteminin maliyetlerini düşürmek için alternatif enerji yoğun olmayan çözümler üzerinde araştırmalar yapılmasını önermektedir.¹⁰⁴

4.5.13 Demir Yolu Taşımacılığı

Karayoluna göre daha büyük hacimlerde ve daha düşük maliyetle hidrojen taşımacılığına olanak sağlar. IRENA raporlarına göre, özellikle kara yolu altyapısının sınırlı olduğu ülkelerde demir yolu, hidrojen taşımacılığı için etkili bir seçenek sunar. Hidrojenin demir yolu ile taşınması, geniş alanlarda dağıtım yapılması gereken ülkelerde

¹⁰² IEA, Global Hydrogen Review 2024.

¹⁰³ IRENA, Hydrogen Transport Study.

¹⁰⁴ IEA, Global Hydrogen Review 2024.

özellikle kıymetli bir çözümdür. Demir yolları, büyük tank konteynerleriyle sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış hidrojen taşımak için kullanılabilir, ancak her ülkenin demir yolu altyapısının kriyojenik veya basınçlı taşıma sistemlerine uygun hale getirilmesi gerekmektedir.¹⁰⁵

SHURA'nın analizine göre, demir yolu taşımacılığı maliyet etkinliği açısından boru hattı taşımacılığına göre daha esneklik sunar ve gerekli altyapı yatırımları yapıldığında hidrojen için güvenilir bir taşıma çözümü olabilir. Avrupa'da bazı ülkelerde demir yoluyla hidrojen taşımacılığı için pilot projeler başlatılmış olup, bu projelerde güvenlik standartlarının geliştirilmesine odaklanılmıştır.¹⁰⁶

4.5.14 Deniz Yolu Taşımacılığı

Özellikle uluslararası ticarete hidrojenin büyük hacimlerde taşınması için önemli bir seçenektir. IRENA'nın analizine göre, sıvılaştırılmış hidrojen ve amonyak türevlerinin deniz yoluyla taşınması, uluslararası ticaret için uygun bir maliyet-fayda dengesine sahiptir. Deniz taşımacılığı için kriyojenik tankerlerin geliştirilmesi ve liman altyapılarının hidrojen ve türevlerinin transferi için uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Ancak bu taşımacılık sürecinde çok düşük sıcaklıkların korunması zorunluluğu enerji tüketimini artırır ve uzun yolculuklarda önemli miktarda buharlaşma kayıpları yaşanabilir.

IEA, Japonya ve Avustralya arasında yürütülen deniz yoluyla sıvılaştırılmış hidrojen taşımacılığı pilot projelerini öne çıkararak, hidrojenin sıvı veya amonyak olarak taşınmasının gelecekte uygulanabilir bir seçenek haline geleceğini ifade etmektedir. Deniz taşımacılığının, geniş alanlarda hidrojen taşınmasında daha büyük bir rol üstlenmesi beklenirken, depolama ve güvenlik standartlarının da geliştirilmesi önem arz etmektedir.¹⁰⁷

SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi ise kara yolu taşımacılığının esnekliğini vurgulamakta, küçük ölçekli dağıtım ağlarında ekonomik bir çözüm sunduğunu belirtmektedir. Ancak, karayolu taşımacılığı uzun mesafelerde, büyük miktarlarda taşımada daha yüksek maliyetlere yol açar ve büyük ölçekli hidrojen projeleri için ekonomik bir seçenek olarak öne çıkmaz.¹⁰⁸

4.5.15 Doğalgaz ile Taşıma

Boru hatlarıyla hidrojen taşınmasında bir diğer çözüm, mevcut doğalgaz boru hatlarının hidrojen taşımacılığına uyarlanmasıdır. Hidrojenin doğalgaz hatlarına belirli bir oranda (genellikle %20) enjekte edilmesiyle, hidrojen doğalgazla birlikte taşınabilir hale gelmektedir. Bu yöntem, karbon salınımını azaltarak doğalgazın çevresel etkilerini hafifletmektedir. Ancak, doğalgaz boru hatlarının hidrojen taşımak için modifikasyona ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Boruların sızıntıya karşı daha dayanıklı hale getirilmesi, hidrojenin güvenli taşınması için gereklidir.¹⁰⁹

¹⁰⁵ IRENA, Hydrogen Transport Study.

¹⁰⁶ SHURA, Hidrojen ve Enerji Geçiş Analizleri.

¹⁰⁷ IEA, Global Hydrogen Review 2024.

¹⁰⁸ IEA, Global Hydrogen Review 2024.

¹⁰⁹ IEA, Global Hydrogen Review 2024.

Hidrojen, doğalgaza belirli oranlarda karıştırılarak mevcut doğalgaz altyapısı üzerinden taşınabilir. Bu karışım, doğalgaz boru hatlarına enjekte edilerek evsel, endüstriyel ve ticari cihazlarda kullanılabilir hale gelir. Boru hatlarında %5-20 oranında hidrojen karıştırılması, genellikle doğalgaz şebekesi ve kullanıcı cihazlarının güvenli ve sorunsuz çalışmasını sağlar. Bu oranlar, ülkelerin altyapı kapasitelerine ve teknolojik gelişmişlik düzeylerine göre değişiklik gösterebilir. Hidrojenin doğalgaza karıştırılması, yakıtın yanma karakteristiğini değiştirir. Hidrojenin metan gazına kıyasla daha yüksek yanma sıcaklığına sahip olması, karışımın yanma verimliliğini artırır ancak boru hatlarının malzemesi ve gaz cihazlarının uyumu açısından dikkat edilmesi gereken bazı güvenlik unsurları bulunur. Güvenlik amacıyla malzeme dayanıklılığı ve sızıntı riski gibi faktörler göz önünde bulundurularak karışım oranları belirlenir. Örneğin, Almanya'da yapılan bazı çalışmalarda %10-15 oranında hidrojen karışımı güvenle taşınabilmektedir. Hollanda'da ise Ameland projesinde, %20 oranında hidrojen karışımı evsel cihazlarda test edilmiştir ve güvenli bir kullanım sağlanmıştır.

4.5.16 Dünya Örnekleri

Birçok ülke hidrojenin doğalgazla taşınması konusunda pilot projeler yürütmektedir. Bu projeler, hidrojenin yenilenebilir enerjiyle üretildiği ve mevcut doğalgaz altyapısına entegre edildiği çeşitli sistemler içermektedir. Bazı örnekler:

Almanya: WindGas Falkenhagen projesi, rüzgâr enerjisi ile üretilen hidrojenin doğalgazla karıştırılarak doğalgaz şebekesine enjekte edilmesini amaçlamaktadır. Proje kapsamında, saatte 360 Nm³ hidrojen doğalgaz hattına %20 oranında karıştırılarak taşınmıştır. Almanya'da ayrıca Hybridge projesi, 100 MW kapasiteli bir elektrolizörle üretilen hidrojenin metanlaştırma ve doğalgaz enjeksiyon yoluyla kullanılması için tasarlanmıştır.

Hollanda: Ameland projesinde, hidrojenin %5 ile %20 arasında değişen oranlarda doğalgaza karıştırılarak evsel cihazlarda kullanımı sağlanmıştır. Proje, ev tipi cihazlarda yanma güvenliğini ve karışımın şebeke uyumluluğunu test etmek için başlatılmıştır. Ayrıca, Delfzijl Energy Valley projesinde hidrojen kimya endüstrisinde hammadde olarak kullanılmak üzere doğalgazla birlikte taşınmaktadır.

Fransa: GRHYD projesinde, Dunkirk bölgesinde hidrojen, doğalgaz boru hattına karıştırılarak 200 konutun enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Projede, güneş enerjisiyle çalışan elektrolizörle üretilen hidrojen %6 ile %20 oranında doğalgaza karıştırılarak taşınmıştır.

Birleşik Krallık: HyDeploy projesi, Keele Üniversitesi kampüsünde %20 oranında hidrojenin doğalgaz şebekesine enjekte edilerek bina ısıtma sistemlerinde kullanılmasını test etmektedir. Bu projeyle İngiltere, hidrojenin doğalgazla taşınması ve enerji altyapısında kullanımı konusunda önemli bir adım atmıştır.

Türkiye'de, Konya'da GAZBİR-GAZMER'in yürüttüğü projede, hidrojenin doğalgaza karıştırılmasıyla evsel cihazlara gaz beslemesi yapılmaktadır. Bu projede, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleriyle üretilen yenilenebilir enerji kullanılarak hidrojen üretilmiş ve doğalgaza %20 oranında karıştırılarak boru hatları üzerinden taşınmıştır. Hidrojen-doğalgaz karışımı, ocak ve kombilerde test edilerek yanma verimliliği ve çevreye etkileri değerlendirilmiştir.¹¹⁰

¹¹⁰ Detay için bkz: Almanya: WindGas Falkenhagen projesi, Hybridge Project. Hollanda: Ameland projesi, Delfzijl Energy Valley.

Fransa: GRHYD projesi. Birleşik Krallık: HyDeploy projesi. Türkiye: GAZBİR-GAZMER hidrojen karışımı projesi.

Hidrojenin taşınması sırasında güvenlik önemli bir konudur, çünkü hidrojen oldukça yanıcı bir gazdır ve sızıntılar ciddi güvenlik riskleri oluşturabilir. IEA'nın raporuna göre, mevcut doğalgaz boru hatlarının hidrojen taşımacılığına adapte edilmesi sırasında güvenlik önlemlerinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca, hidrojen taşınmasında kullanılan malzemelerin hidrojene dayanıklı olması ve çatlama gibi riskleri azaltması gerekmektedir. Çelik borularda meydana gelebilecek çatlamalar, hidrojenin moleküler yapısı nedeniyle daha yaygındır ve bu durum taşıma sırasında güvenlik riski oluşturabilir. Bu nedenle, FRP ve HDPE boru hatları, hidrojenin güvenli taşınmasını sağlayarak maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır Hidrojen taşımacılığı için daha güvenli ve maliyet etkin çözümler bulma süreci devam etmektedir. IRENA ve IEA gibi kurumlar, hidrojen taşımacılığı için yeni malzemelerin geliştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması yönünde çalışmalar yürütmektedir. Özellikle boru hatlarının hidrojen taşımacılığına uygun hale getirilmesi için yapılan araştırmalar, enerji geçişinde hidrojenin geniş çapta kullanılabilmesi adına kritik önem taşımaktadır. Hidrojenin, özellikle deniz yoluyla amonyak formunda taşınması ve mevcut doğalgaz boru hatlarının hidrojen taşımak için uyarlanması gibi yöntemler, bu sürecin maliyetlerini düşürebilecek alternatifler olarak değerlendirilmektedir.¹¹¹¹¹²



¹¹¹ IEA, Global Hydrogen Review 2024.

¹¹² IRENA, Hydrogen Transport Study.

4.6 Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen enerjisinin uzun zamandır dünyada kullanım alanları bulunmaktadır. Gri ve mavi olarak adlandırılan ve emisyonlu hidrojen özellikle petro kimya endüstrisinde rafineri sektöründe, amonyak haliyle tarım sektöründe, yakıt pilleri aracılığı ile araçlarda tercih edilmektedir. Hidrojenin amonyak dönüşümü ile kullanılması ile tarımsal verimliliğin artış gösterdiği bilinmektedir. Son yıllarda hidrojenin kullanım alanlarının artırılmasına yönelik çalışmalar geliştirilmektedir. Bu çalışmalardan en önemlisi karbondan arındırılması zor olan sektörler olarak tanımlanan cam, demir çelik ve çimento sektörleri olarak ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinden doğan hidrojen enerjisi ulaşım sektöründe yakıt hücreleri aracılığı ile deniz yolu taşımacılığında ve havacılık sektöründeki yakıt dönüşümünde de yer alma imkânı bulunmaktadır.

4.6.1 Çelik Sektörü

Karbondan arındırılması zor olan sektörlerden çelik sektöründe yüksek miktarda karbon salınımı bulunmaktadır. Üretimde taş kömürünün yoğun ve sürekli kullanılması nedeniyle küresel emisyonun %9 oranını çelik endüstrisinden kaynaklanmaktadır. Küresel ısınmayı sınırlama hedefleri doğrultusunda karbon emisyonlarının azaltılması, bu sektörde zorunlu hale gelmiştir. Geleneksel termik proseslerinin kullanımı ilerleyen süreçte karbon ayak izinden kaynaklı olarak demir çelik sektörünü olumsuz olarak etkileyecektir. Zira sınırda karbon düzenlemesi, özellikle emisyon maliyetlerinin düşük olduğu ülkelere AB'ye yapılan ithalatlarda sektörü etkileyebilecektir. Bu düzenlemeler, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel bir uyumu teşvik etmekte ve demir çelik sektörü gibi enerji yoğun sektörlerde karbon yoğunluğunu azaltmak için ek finansal baskılar oluşturacaktır. Bu nedenle, sektörde karbon salınımını düşürmek için yeni teknolojilere geçiş, enerji verimliliğini artırma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme gibi yöntemler değerlendirilmektedir.

Karbon vergisi ve sınırda karbon düzenlemelerinin demir çelik endüstrisine etkisi, üretim maliyetlerinin artması, rekabetin yer değiştirmesi ve düşük karbon teknolojilerinin uygulanmasını hızlandırması şeklinde özetlenebilir. Bu düzenlemelere uyum sağlamak için demir çelik sektöründe gelişmiş enerji yönetimi sistemlerine yatırım yapılması, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelinmesi ve karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin uygulanması gerekmektedir. Yeşil hidrojen kullanımı da tam olarak ihtiyaçların karşılanmasında cazip bir yeni teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır.¹¹³

Sanayide karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel çabalar, demir çelik gibi yüksek karbon salımı yapan sektörlerde yenilikçi teknolojilerin gelişmesine öncülük etmektedir. Geleneksel termik proseslere dayalı demir ve çelik üretimi, dünya genelinde sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu bağlamda, elektrik bazlı alternatiflerin kullanımına ve hidrojenin bu süreçlerdeki yerine dair ilgi her geçen gün artmaktadır.¹¹⁴

Geleneksel olarak yüksek karbon emisyonları ile bilinen demir çelik sektörü, yeni teknolojilerle bu yükü hafifletmeye çalışmaktadır. Özellikle doğrudan indirgenmiş demir (Direct Reduced Iron, DRI) teknolojisi, çelik üretiminin karbonsuzlaştırılmasında kilit bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. DRI sürecinde hidrojen kullanılarak demir cevheri doğrudan indirgenebilir, bu sayede fosil yakıt ihtiyacı azalır ve karbon salımı minimuma iner. Literatürde belirtildiği üzere, DRI'nin her tonu için yaklaşık 65 kg yüksek ısı değerli (HHV) veya 750 Nm³ hidrojen gerekmektedir. Bu teknolojinin geliştirilmesi, küresel ölçekte karbon emisyonlarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.¹¹⁵

¹¹³ Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making, 2020.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. Türkiye'de Elektrik Sektöründe Karbonsuzlaştırma Potansiyeli Raporu, 2021.

¹¹⁴ SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları, 2021.

¹¹⁵ SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları, 2021.

Dünya çelik üretiminde hidrojen kullanımına yönelik yatırımlar hız kazanmıştır. Avrupa Birliği ve Japonya gibi ülkeler, düşük karbonlu üretim süreçlerini teşvik eden programları destekleyerek bu dönüşüme öncülük etmektedir. Örneğin, Avrupa'da HYBRIT projesi, İsveç'te fosilsiz çelik üretimi için hidrojen bazlı bir sistem geliştirmekte olup küresel çapta büyük ilgi görmektedir. Japonya'da ise JFE Steel ve Nippon Steel gibi büyük çelik üreticileri, hidrojen kullanımı ile emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir.¹¹⁶

Türkiye, dünya demir çelik üretim kapasitesi bakımından ilk 10 ülke arasında yer almakta olup, 40 milyon ton yıllık üretim kapasitesi ile Avrupa'nın en büyük üreticilerinden biridir. Ülkede üç büyük demir çelik üretim tesisi – Kardemir, İsdemir ve Ereğli – demir cevherinden çelik üretim kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, Marmara, Ege ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşan elektrikli ark ocakları (EAF) da Türkiye'nin toplam üretiminin büyük bir kısmını karşılamaktadır. Bu durum, çelik sektörünün rekabetçiliği açısından Türkiye'yi yeşil hidrojen teknolojilerine geçiş için elverişli bir konuma getirmektedir. DRI teknolojisi ile elektrikli ark ocaklarının entegrasyonu, Türkiye'deki mevcut hurda çelik üretim kapasitesini ve lojistik altyapıyı iyileştirme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, Türkiye'nin sürdürülebilir üretim hedefleri, enerji bağımsızlığı arayışları ve çevresel yükümlülükleri göz önüne alındığında, yeşil hidrojen destekli DRI uygulamaları stratejik bir öneme sahiptir. Öte yandan, bu teknolojilerin uygulanabilir hale gelmesi için devlet desteği, altyapı yatırımları ve enerji arz güvenliği konularında kapsamlı çalışmalar gereklidir.

4.6.2 Çimento Sanayi

Çimento sanayi fırınlar aracılığı ile çimento üretimini gerçekleştirmektedir. Artan nüfus ile yapıların dönüşümünün sağlanması çimento sanayisini olumlu yönde etkilemektedir. Çimento üretimi, genellikle kireçtaşı ve kil gibi doğal hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda işlenmesiyle gerçekleşir. Bu üretim sürecinde, hammaddeler önce fırınlarda ısıtılma tabi tutulur. Kireçtaşı ve kil gibi malzemeler büyük döner fırınlarda 1,450 °C'ye kadar ısıtılır, bu da bu malzemelerin kimyasal yapısını değiştirerek "klinker" denilen küçük, sert topraklara dönüştürür. Bu klinkerler, daha sonra bir miktar alçıtaşıyla öğütülür ve nihai çimento tozu elde edilir.

Çimento üretimi sırasında emisyonlar üç ana nedenle ortaya çıkmaktadır:

- ❖ Kimyasal Reaksiyonlar: Kireçtaşı, yüksek sıcaklıklarda ısıtıldığında kalsiyum okside dönüşür ve karbon dioksit (CO₂) açığa çıkar. Bu, çimento üretimindeki karbon emisyonlarının büyük bir kısmını oluşturur. Kimyasal olarak, her ton çimento üretimi için yaklaşık yarım ton karbon açığa çıkar.
- ❖ Enerji Kullanımı: Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlar büyük miktarda enerji gerektirir ve genellikle bu enerji fosil yakıtlardan elde edilir. Fosil yakıt kullanımı ise yanma yoluyla karbon emisyonuna sebep olur. Çimento fabrikalarında bu enerji ihtiyacını karşılamak için çoğunlukla kömür veya doğal gaz gibi kaynaklar kullanılır.
- ❖ Taşıma ve Yardımcı Prosesler: Hammaddelerin ve bitmiş ürünlerin taşınması da enerji gerektirir ve bu da dolaylı olarak karbon salınımına yol açar.¹¹⁷

Çimento üretimi, dünya genelinde insan kaynaklı karbon emisyonlarının yaklaşık %7'sini oluşturmaktadır. Gelenekselleşmiş çimento üretim yöntemi emisyonun yükselmesine neden olmaktadır. Sınırdaki karbon düzenleme

¹¹⁶ <https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-future/>

¹¹⁷ SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları, 2021.

mekanizması bağlamında demir çelik sektöründe olduğu gibi çimento sektöründe de kullanılan enerjinin dönüşümü elzemdir. Elektrolizörlerin çimento ve kireç fabrikalarında kullanılması, sadece hidrojen değil aynı zamanda serbest oksijen üretmesi nedeniyle önemli avantajlar sağlamaktadır. Çimento üretim sürecinde oksijen, daha kısa ve daha istikrarlı bir alev oluşumu, verimli bir yanma süreci, daha kaliteli klinker üretimi ve düşük kaliteli alternatif yakıtların daha fazla kullanılabilmesi gibi birçok fayda sağlamaktadır. Bu sayede üretim oranları artmakta ve ID fanının elektrik tüketimi de azalmaktadır. Ayrıca, hava yerine saf oksijen kullanılması NOx emisyonlarını da azaltabilmektedir, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır.

Çimento sektörünün tamamen karbondan arındırılması uzun bir süreç olsa da, mevcut olgun teknolojiler ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yeşil hidrojen bu dönüşümü hızlandırabilmektedir. Ancak, hidrojenin yakıt olarak tam geçişi teknik ve mali zorluklar barındırmaktadır. Hidrojenin çimento fırınlarında kullanımı, fırının fiziksel yapısını, ısı transferini ve güvenlik gereksinimlerini etkilemektedir. Geleneksel fosil yakıtların yerini tamamen alamayan hidrojen, fırın sisteminde kısmen kullanılabilmekte, ancak bu konuda fizibilite çalışmaları devam etmektedir.

Çimento endüstrisinde hidrojenin kullanımı, yüksek yanma hızı ve görünür olmayan alev gibi özelliklerinden dolayı çeşitli teknik engeller barındırmaktadır. Alevin optik olarak izlenmesinin zor olması ve düşük radyasyonlu ısı transferi gibi zorlukları aşmak için hidrojen, amonyak gibi diğer yakıtlarla karıştırılabilmektedir. Ayrıca, mevcut fırınların hidrojene uygun hale getirilmesi için yeniden tasarım gerekebilmektedir. Hidrojenin taşıma ve depolama aşamaları da patlayıcı özelliklerinden dolayı ek zorluklar oluşturmaktadır. Bu sorunları aşmak adına hidrojeni amonyak formunda depolamak daha güvenli bir seçenek sunmaktadır.¹¹⁸

Çimento sektöründe öne çıkan bazı hidrojen projeleri şunlardır:

Hynovi Projesi: Fransa'daki Montalieu-Vercieu çimento fabrikasında karbon emisyonlarının %40'ını yakalamayı hedefleyen bu projede, 2025'te 330 MW'lık bir elektrolizör kurulması planlanmaktadır. Üretilen oksijen oksijen yanma için, karbon ise karbon-nötr metanol üretimi için kullanılmaktadır.

H2CEM Projesi: Yunanistan'da yer alan TITAN çimento fabrikasında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretimini içermektedir. 60 milyon Euro bütçeli bu proje, fosil yakıtların sürdürülebilir yakıtlarla değiştirilmesini amaçlamaktadır.

HYIELD Projesi: Atıklardan hidrojene dönüşüm odaklı olan bu proje, biyogenik atık akışlarını yüksek saflıkta yeşil hidrojene dönüştürmeyi hedeflemektedir. Dört yıl sürecek proje sonunda 400 ton yeşil hidrojen üretilmesi planlanmaktadır.

Concrete Chemicals: Almanya'da Cemex Deutschland ve diğer partnerlerin yürüttüğü bu projede, CO₂'nin hidrojene dönüştürülmesiyle çimento sektöründe karbonsuzlaştırma sağlanmaktadır.

Argos Honduras: Piedras Azules fabrikasında hidrojen enjeksiyonu yapılmış ve bu uygulamanın klinker üretimini artırırken petrokok tüketimini azalttığı bildirilmiştir.¹¹⁹

¹¹⁸ SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. Türkiye'de Elektrik Sektöründe Karbonsuzlaştırma Potansiyeli Raporu, 2021.

¹¹⁹ <https://www.globalcement.com/news/item/13007-vicat-and-hynamics-to-produce-methanol-from-captured-co2-at-montalieu-vercieu-cement-plant>

4.6.3 Ulaşım Sektörü

Ulaşım sektörü, küresel sera gazı salımlarının %28'ini oluşturmasıyla dekarbonizasyon için kritik bir alan olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’de bu sektör, petrol ürünlerine dayalı enerji tüketiminin büyük bir kısmını temsil eder ve elektrik ile yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki payı hâlâ oldukça düşüktür. Karayolu taşımacılığı, Türkiye’nin enerji tüketiminde en büyük paya sahiptir; toplam enerji talebinin önemli bir bölümü, otomobiller, hafif ticari araçlar ve kamyonlar tarafından karşılanmaktadır. Ulaşım sektöründe yer alan araçlar arasında şu anda Türkiye’de yaklaşık 12,5 milyon binek araç bulunmakta olup toplamda 22 milyonun üzerinde karayolu taşıtı trafikte yer almaktadır.¹²⁰

Hidrojen, küresel ulaşım sektörünün karbon nötr bir yapıya geçişinde önemli bir rol oynayacak kritik bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye özelinde, ulaşım sektörü enerji tüketiminin büyük bir kısmını temsil etmekte ve ağırlıklı olarak fosil yakıtlara dayanmaktadır. Karayolu taşımacılığı bu tüketimin en büyük payını alırken, havacılık ve denizcilik de hızla artan enerji talepleriyle dikkat çekmektedir. Hidrojen, sıfır karbon salımı, yüksek enerji yoğunluğu ve geniş üretim olanakları gibi avantajlarıyla doğrudan elektrifikasyonu zor olan sektörlerde kullanım potansiyeline sahiptir. IRENA’nın analizine göre, hidrojenin ulaşım sektöründe 2050 yılına kadar 2.2 gigaton CO₂ emisyonunu azaltabileceği öngörülmektedir. Bu süreçte hidrojen, ağır taşımacılık, denizcilik ve havacılık gibi enerji yoğun sektörlerde fosil yakıtların yerini alabilir. Örneğin, hidrojenin ısı değeri (120 MJ/kg) benzine (43.4 MJ/kg) ve dizele (42.6 MJ/kg) kıyasla oldukça yüksektir.¹²¹

Yakıt hücresel elektrikli araçlar ve hidrojen içten yanmalı motorları, ulaşımında hidrojenin kullanımını mümkün kılan iki ana teknolojidir. Yakıt hücresel araçlar, daha uzun menzil ve hızlı dolum süreleri (5-7 dakika) sunarken, içten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı emisyonları azaltmak için geçiş teknolojisi olarak değerlendirilmektedir. Ancak, bu teknolojilerin geniş çapta benimsenmesi için altyapı yatırımları, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve dolum istasyonlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. IRENA, 1.5°C senaryosunda hidrojenin ulaşım sektöründe küresel enerji talebinin %14’ünü karşılayabileceğini öngörmektedir. Bunun gerçekleşmesi için elektrolizör kapasitesinin 2050 yılına kadar 5.722 GW’a çıkarılması gerektiği belirtilmektedir. Hidrojenin uluslararası ticareti de bu dönüşümün önemli bir parçasıdır; üretim ve lojistik altyapısının oluşturulması, yeşil hidrojen ticaretinin ekonomik etkilerini artırabilir.

Hidrojenin ulaşımında iki temel kullanım şekli bulunmaktadır:

- ❖ **Yakıt Hücresel Elektrikli Araçlar (FCEV):** Hidrojen yakıt hücresel araçlar, elektrokimyasal bir süreçle doğrudan elektrik üretir ve motorları çalıştırır. Bu araçların başlıca avantajları, kısa dolum süreleri (5-7 dakika), uzun menzil ve zorlu iklim koşullarında yüksek performanstır. Ancak, altyapı eksiklikleri ve hidrojen üretim maliyetleri gibi zorluklar, geniş ölçekli kullanımını sınırlamaktadır.
- ❖ **İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen:** Hidrojen, içten yanmalı motorlarda ya doğrudan yakıt olarak ya da hava-yakıt karışımını zenginleştirme yoluyla kullanılabilir. Bu yöntemler, CO₂ ve partikül madde salımlarını büyük ölçüde azaltabilir. Özellikle LPG-benzin çift yakıt teknolojisinin hidrojenle geliştirilmesi, geçiş sürecini hızlandırabilir.

Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarındaki potansiyeli, hidrojen üretim maliyetlerini düşürerek bölgesel bir hidrojen ihracatçısı olmasını sağlayabilir. Bu bağlamda, ulusal bir hidrojen stratejisi oluşturulması

¹²⁰ SHURA. Türkiye’de Hidrojen Ekonomisi ve Altyapısı Raporu, 2021.

¹²¹ IRENA. Renewable Power-to-Hydrogen: Cost Analysis and Projections, 2022.

hem yerli yatırımcıları teşvik edecek hem de uluslararası iş birlikleriyle teknolojik gelişmeleri hızlandıracaktır. Hidrojenin kullanımı, Türkiye'nin enerji bağımsızlığı ve karbon nötr hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunurken, ulaşım sektöründeki karbon salımını azaltmak için kritik bir rol oynayacaktır.¹²²

4.6.4 Doğalgaz Sektörü

Hidrojenin doğal gazla karıştırılması, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji altyapısının etkilerinin hafifletilmesi için hem ulusal hem de uluslararası düzeyde önem kazanan bir stratejidir. Doğalgaz rezervine sahip olmayan ülkeler doğalgaz rezervine alternatif yaratmak isteyen ülkeler ve ihracat kalemi yaratma amacını haiz ülkeler olmak üzere doğalgazda hidrojen şekillenmiştir. Yapılan deneylerde mevcut doğalgaz şebekesinin değişimi olmaksızın hidrojenin enjekte edilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Hidrojenin doğalgaz gibi ihtiyacı karşılaması sebebiyle alt yapı yatırımlarına ihtiyaç duyulmayan oranda enjekte hedefleri günümüzde gerçekleştirilmektedir. Deneylerin başarılı olması halinde ülkeler altyapı yatırımlarını dönüştürerek hidrojeni tüm kullanıcılara arz etmeyi hedeflemektedirler. Hidrojen üretiminin maliyeti ve hidrojen şebeke yatırımlarının uzun süreli bir plana ihtiyaç duyması nedeniyle minimal ölçekte çalışmalar sürdürülmektedir.

Türkiye ölçeğinde cari açığın önemli bir payını oluşturan doğalgaz ithalatı son dönemde yeni rezervlerle birlikte bir nebze azalsa da halen enerji arzında doğalgazın payı hem sektörel kullanımda hem de elektrifikasyonda önem arz etmektedir. Ülkemizde de doğalgaza alternatif hidrojenin kullanım yollarını arayan ülkelerde olduğu gibi bir çok ölçekte çalışmalar devam etmektedir. GAZMER-GAZBİR ortaklığındaki hidrojen enjekte çalışmaları umut verici gelişmeler olarak ön plana çıkmaktadır. Ticarileşmesi halinde yılda %5 oranındaki hidrojen enjektisi 600 milyon dolarlık doğalgaz ithalatını önleyecek niteliğe sahiptir.¹²³

4.6.4.1 Doğal Gaza Hidrojen Karıştırma Teknikleri

Hidrojenin doğal gaza karıştırılma işlemi, genellikle aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmektedir:

- ❖ Hidrojen Üretimi: Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla üretilir. Türkiye'de bu süreç, güneş panelleri ve rüzgar türbinleriyle desteklenen alkali elektrolizörler ile uygulanmaktadır.
- ❖ Gaz Karışımı ve Kontrol: Üretilen hidrojen, özel gaz karıştırıcılar ve kontrol sistemleri aracılığıyla doğal gazla birleştirilir. Karışım oranı genellikle %20'yi geçmemek üzere ayarlanır; bu oran, hem güvenlik hem de şebeke uyumluluğu açısından optimaldir.
- ❖ Şebeke Entegrasyonu: Karıştırılmış gaz, mevcut doğal gaz boru hatları ve altyapı sistemleri aracılığıyla tüketiciye ulaştırılır. Karışımın yanma özelliklerini değiştiren Wobbe İndeksi gibi parametreler, süreç boyunca kontrol edilir.
- ❖ Son Kullanıcı Testleri: Bu karışım, evsel cihazlarda (ör. kombiler, ocaklar) ve endüstriyel sistemlerde test edilerek yanma performansı ve emisyon verileri değerlendirilir.

4.6.4.2 Uluslararası Çalışmalar ve Uygulamalar

Hidrojenin doğal gazla karıştırılması üzerine birçok ülkede deneysel ve ticari projeler yürütülmektedir:

¹²² IEA. *The Role of Low-Carbon Hydrogen in Transport*, 2020.

¹²³ European Hydrogen Backbone Initiative. *Hydrogen Transport: European Perspectives*, 2022.

Almanya: WindGas Falkenhagen projesinde, rüzgar enerjisinden elde edilen hidrojen %20'ye kadar doğal gazla karıştırılmış ve boru hatlarına enjekte edilmiştir. Bu proje, yenilenebilir enerjinin depolanması ve enerji sistemlerine entegrasyonu için model bir uygulama olarak kabul edilmektedir.

Fransa: GRHYD projesi, Dunkirk bölgesinde hidrojen ve doğal gaz karışımının yerel şebekelere dağıtımını hedeflemiştir. Bu proje, %6-20 oranında karışımların güvenlik ve performans analizini içermektedir.

Hollanda: Ameland projesinde, PEM elektrolizör ile üretilen hidrojen %5 ila %20 oranında doğal gazla karıştırılarak evsel kullanıma sunulmuştur. Bu proje, hidrojenin mevcut şebekelerde güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

İngiltere: Keele Üniversitesi'nde HyDeploy projesi, doğal gaz hattına %20 hidrojen ekleyerek yerleşim alanlarındaki kullanımını test etmiştir. Güvenlik açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.¹²⁴

4.6.4.3 Konya GAZBİR-GAZMER Hidrojen ve Doğalgaz Karışım Projesi

Türkiye'de hidrojenin doğalgaz ile karıştırılarak enerji sektöründe kullanılmasına yönelik çalışmalar, çevresel etkileri azaltma ve enerji dönüşümünü hızlandırma hedefleri çerçevesinde yoğunlaşmıştır. Özellikle Konya'da GAZBİR-GAZMER Test ve Kalibrasyon Merkezi bu alandaki en önemli projelerden birine ev sahipliği yapmaktadır. Aşağıda bu çalışmalara dair detaylar bulunmaktadır:

- ❖ Proje Kapsamı: Türkiye'de ilk kez, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin doğal gaz şebekelerine belirli oranlarda karıştırılarak evsel cihazlarda kullanımı test edilmiştir. Bu süreç, rüzgar türbinleri ve güneş panelleri ile üretilen elektriğin alkali elektrolizörler aracılığıyla hidrojene dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmiştir.
- ❖ Laboratuvar Altyapısı: Kurulan sistem, tüm enerji ihtiyacını yenilenebilir kaynaklardan karşılamaktadır. Hidrojen ve doğal gaz karışımı, kombiler ve ocaklarda test edilerek yanma performansı ve emisyon değerleri analiz edilmiştir.
- ❖ Sonuçlar: %20'ye kadar hidrojen karışımı, mevcut boru hatlarında ve evsel cihazlarda güvenli bir şekilde kullanılabilir bulunmuştur. Bu oran, karbon emisyonlarında önemli bir azalma sağlarken doğal gazın enerji yoğunluğunu da artırmaktadır.¹²⁵

4.6.5 Hidrojen Ve Doğalgaz Karışımının Avantajları

Karbon Emisyonlarını Azaltma: %20 oranında hidrojen karışımı, karbon emisyonlarını %7-8 oranında düşürebilir. Bu, doğal gazın karbon yoğunluğunu azaltmak için etkili bir yöntemdir.

Mevcut Altyapının Kullanımı: Türkiye'nin 147.500 km uzunluğundaki doğal gaz şebekesi, hidrojenin entegre edilmesi için güçlü bir altyapı sunmaktadır. Böylece yeni boru hattı yatırımlarına ihtiyaç duyulmadan enerji dönüşümü desteklenmektedir.

Gaz Karışım Sisteminin Detayları

¹²⁴ Hidrojen Teknolojileri Derneği, Hidrojenden Doğalgaza Karıştırma Çalışmaları, 2021.

¹²⁵ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi

- ❖ Karışım Oranı: Projede kullanılan hidrojen oranı, boru hattı uyumluluğunu ve güvenliğini sağlamak için %20 ile sınırlıdır.
- ❖ Teknik Değerlendirme: Hidrojenin yanma özellikleri ve boru hattındaki davranışı, doğal gaz ile uyumlu hale getirilmiştir. Wobbe İndeksi gibi parametrelerle karışımın yanma özellikleri optimize edilmiştir.
- ❖ Yenilenebilir Enerji Kullanımı: Üretilen hidrojenin tamamı, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrikle üretilmiştir.¹²⁶

4.6.6 Türkiye'deki Diğer Çalışmalar Ve İş Birlikleri

BOTAŞ: Türkiye'nin gaz dağıtımında lider kuruluşu olan BOTAŞ, mevcut altyapıyı hidrojen karışımına uyumlu hale getirmek için teknik çalışmalar yürütmektedir. Bu kapsamda uluslararası standartlar ve güvenlik kodları incelenmektedir.

Akademik İş Birlikleri: Çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi gibi akademik kuruluşların katkılarıyla ilerletilmekte ve teknolojik yenilikler geliştirilmektedir.¹²⁷

4.6.7 Uluslararası Hidrojen Politikaları

4.6.7.1 Avrupa Birliği

Avrupa Birliği enerji politikasının yasal temelini oluşturan Avrupa Birliği'nin İşleyişine İlişkin Antlaşma uyarınca Avrupa Birliği ile üye devletler arasında enerji, ortak sorumluluk alanı olarak belirlenmiştir. Birlik ve üye devletlerin işbirliği ile birlikte net sıfır karbon emisyonu, yenilenebilir enerji kaynakları, temiz kaynak olarak hidrojen üzerine stratejiler geliştirilmektedir.

Birlik tarafından enerji politikası reformu ve organizasyonu amacıyla 25 Şubat 2015 tarihinde "İleriye Dönük İklim değişikliği Politikası ile Dirençli Bir Enerji Birliği için Çerçeve Stratejisi" belgesi yayınlanmıştır. Bu belgede enerji talebi güvenliği, ortak enerji pazarı, enerji verimliliğinin artırılması, ekonomi ve sanayinin karbondan arındırılması, araştırma ve geliştirme faaliyetleri üzerine öncelikler belirlenmiştir.

Birliğin Paris Anlaşması'nı onaylamasından sonra yenilenebilir enerji dönüşümünde dünyaya liderlik etme amacıyla 30 Kasım 2016 tarihinde "Tüm Avrupalılar İçin Temiz Enerji Paketi" açıklanmıştır. Avrupa Komisyonu bu paket kapsamında, 2009 tarihli "Yenilenebilir Enerji Direktifi" revize edilerek, enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payının 2030 yılına kadar %27'e çıkarılması amaçlanmıştır.

11 Aralık 2019 tarihinde ise Birlik tarafından yeni büyüme stratejisi olarak Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı açıklanmıştır. Mutabakatın temel amacı, Avrupa Kıtası'nın, ilk karbon nötr kıtası haline getirme çabasıdır. 2050 yılına kadar net sera gazı emisyonlarının olmadığı ve ekonomik büyümenin kaynak kullanımından ayrıştırıldığı bir çevreci ortam hedeflenmektedir. Yeşil mutabakatın, temel amaçlarından birisi de temiz hidrojenidir. Avrupa Birliği sanayisinde, 2030 yılına kadar temiz enerji geçişi için gerçekleştirilecek; temiz hidrojen, yakıt hücreleri, hidrojen ve

¹²⁶Hidrojen Teknolojileri Derneği , Hidrojenden Doğalgaza Karıştırma Çalışmaları, 2021.

¹²⁷ Kılıç, Oral, Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi.

enerji depolama, CCUS teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Ulaşım, çelik, ağır sanayi, gübre üretimi gibi alanlar başta olmak üzere fosil kaynaklı hidrojen, yeşil hidrojene geçişin yaygınlaştırılması hedefler arasındadır. Özellikle yeşil hidrojen geliştirilmesine yönelik destek ve rekabetçi bir yeşil hidrojen gazı piyasası ile birlikte sektörün karbonsuzlaştırılması amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda Temmuz 2020'de Avrupa Komisyonu tarafından "*İklim Nötr Bir Avrupa İçin Hidrojen Stratejisi*" yayınlanmıştır. Strateji belgesi, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Fit for 55'in tamamlayıcı unsurlarından birisi olarak görülmektedir. Strateji metnine göre; araştırma, inovasyon, geliştirme, proje, üretim, altyapı gibi alanlarda ihtiyaç duyulan ortamın yaratılması amaçlanmaktadır. Hidrojen enerjisi, Birlik tarafından, 2050 yılı hedeflerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikli araç olarak görülmektedir. Strateji belgesinde öncelikli olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından, yeşil hidrojen üretimi hedeflenmektedir.

Çünkü bu süre zarfında oluşacak enerji arzı, sadece yenilenebilir enerjiden karşılanamayacaktır. Hidrojen; ortaya çıkacak enerji arzında özellikle elektriğin depolanması ve taşınmasında anahtar, öncelikli enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Ayrıca 2050 yılında hidrojen tüketiminin, enerji kaynakları arasında %14'lük pay edineceği öngörülmektedir.

Mayıs 2022'de Avrupa Komisyonu tarafından, enerji arz güvenliğinin sağlanması amacıyla, Avrupa Birliği'nin Rusya'ya olan fosil yakıt bağımlılığının sona erdirilmesi için "REPOWEREU" planı açıklanmıştır. Bu plan doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru olan geçiş sürecinin hızlandırılması amaçlanmaktadır. Planla birlikte "hidrojen hızlandırıcısı" kavramı literatüre kazandırılmıştır. Temiz hidrojen ile birlikte, enerji sisteminin karbondan arındırılması daha hızlı ve mümkün hale gelecektir. 2030 yılına kadar 10 milyon ton hidrojen üretimi ve 10 milyon ton ithal hidrojen ile birlikte 20 milyon tonluk enerji talebi karşılanmış olacaktır.

Avrupa Komisyonu, 2022 yılında, yenilenebilir hidrojen üretimi için yatırım güvenliğinin oluşturulması ve desteklenmesi amacıyla Avrupa Hidrojen Bankası faaliyetlerini başlatmıştır. Böylelikle AB tarafından, yenilenebilir hidrojen üretiminde ilk yatırım zorluklarının aşılması, küresel hidrojen pazarının ihale yoluyla desteklenmesi planlanmaktadır. Nisan 2024 tarihinde 720.000,00-Euro'luk, 7 yenilenebilir hidrojen projesine sübvansiyon verilmiştir. Aralık 2024 tarihinde ikincisi gerçekleştirilecek olan ihale ile birlikte Avrupa Ekonomik Alanı'nda bulunan yenilenebilir hidrojen üreticilerine 1,2 milyar Euro'ya kadar sübvansiyon sağlanacaktır.

Avrupa Birliği Temiz Hidrojen Ortaklığı programı ile birlikte yenilenebilir hidrojen üretimi, hidrojen vadileri, hidrojen depolama, dağıtım ve taşıma alanları da dahil olmak üzere hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi için 195 milyon Euro fon tahsis edilmiştir.

Şubat 2023 tarihinde ise Avrupa Birliği tarafından çıkarılan yasa ile birlikte hidrojen, hidrojen bazlı yakıt ve enerji taşıyıcılarının hangi şartlar altında yeşil hidrojen olarak değerlendirileceği açıklığa kavuşturulmuştur. Avrupa Birliği'nde 2030 yılına kadar sanayi, ulaşım ve havacılıkta biyolojik kökenli olmayan yenilenebilir yakıtların (RFNBO) kullanımına yönelik bağlayıcı hedefler belirlenmesi konusunda siyasi bir anlaşma sağlanmıştır. Yasalarla birlikte; hidrojen üretiminde kullanılacak elektrolizörler, halihazırda faaliyette bulunana yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre bir şekilde kullanılacaktır. Ayrıca AB'ye ihraç edilecek, hidrojenlere de belirlenmiş olan kriterler uygulanacaktır. Böylelikle AB tarafından küresel çapta bir hidrojen pazarının oluşturulması için temeller güçlendirilmeye devam etmektedir.

4.6.7.2 Amerika Birleşik Devletleri

2004 yılında USA Enerji Bakanlığı tarafından, Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi (EERE) bünyesinde Hidrojen ve Yakıt Hücre Teknolojileri Ofisi (HTFO) programı başlatılmıştır. Bu program dahilinde;

hidrojen üretimi, dağıtımı, altyapı, depolama ve hidrojen bazlı yakıt hücreleri ve ulaşım üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir.¹²⁸

2018 yılında ABD Enerji Bakanlığı, yenilikçi enerji teknolojilerini desteklemek amacıyla sermaye kaybına yol açmayacak şekilde ödüller, başvurulara ödenen doğrudan kamu hibelerini içeren, belirlenen teknoloji ihtiyaçlarına göre American-Made Challenges programı başlatılmıştır.¹²⁹

2021 yılında ise ABD Enerji Bakanlığı tarafından türbin bazlı elektrik üretimi için yüksek performanslı, verimli bir gaz olarak hidrojeni geliştirmeye yönelik 8 üniversite liderliğinde hidrojen türbini araştırma (University Hydrogen Turbine System Research) programı başlatılmıştır. Bu program için 6.2 milyon ABD doları fon sağlanmıştır. Programda saf hidrojen, hidrojen ve doğal gaz karışımları ve diğer temiz hidrojen içeren yakıtlarla çalışan türbinlerin yanma performansı ve verimliliklerine yönelik çalışmalar güncel olarak yürütülmektedir.

Yine aynı yıl içerisinde Beyaz Saray tarafından, Climate Innovation Research Opportunity investment programı başlatılmıştır.¹³⁰ İnovasyon girişim programında iklim krizi ile mücadelede düşük karbonlu enerji teknolojilerine yönelik araştırma faaliyetleri yürütülmektedir. ABD Enerji Bakanlığı tarafından bu program için 100 milyon dolar hibe ayrılmıştır. İklim İnovasyon Çalışma Grubu; net sıfır karbon binalar, sıfır karbonlu enerji şebekesinin oluşturulması için yönetim araçları, sıfır karbonlu taşıma ve toplu taşıma ulaşım sistemleri, hava ve deniz taşımacılığı için yenilenebilir yakıtlar, sera gazı emisyonlarının yer altında depolanması için toprak yönetimi, karbon yakalama ve depolama teknolojileri üzerine çalışmalar yürütmektedir.

ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından 2022 yılında temiz enerji alanında faaliyetlerin ilerletilmesi amacıyla Enerji Sınır Araştırma Merkezleri (EFRC) için 420 milyon dolar fon tahsis edilmiştir. Bu fon yenilenebilir enerji, enerji depolama, karbon yakalama ve diğer düşük emisyonlu enerji teknolojilerinde projelerin geliştirilmesi için kullanılmıştır. 2009 yılında başlatılan programın meyveleri olarak yüzlerce bilimsel keşif ve 200'den fazla patentle sonuçlanmıştır.¹³¹

Infrastructure and Jobs act, temiz hidrojen girişimleri kapsamında 2022 yılında temiz hidrojen üretimini, kullanımını ve yaygınlaştırılmasını hızlandırma amacıyla 9.5 milyar dolar fon tahsis edilmiştir. Ayrılan fon miktarının 8 milyar doları, bölgesel temiz hidrojen merkezlerinde istihdam ve ağır sanayi sektöründe yeşil hidrojen kullanımını genişletmek amacıyla en az 4 Regional Clean Hydrogen Hubs için ayrılmıştır. Fon miktarının 1 milyar doları, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojenin maliyetinin düşürülmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ayrılmıştır. 500 milyon doları ise yeşil hidrojen üretiminde, yerel yatırımların desteklenmesi ve genişletilmesi amacıyla ayrılmıştır.¹³²

ABD'de Ağustos 2022 yılında küresel enerji krizinin tetiklediği iç enflasyonu azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele amaçları doğrultusunda Inflation Reduction Act (IRA) onaylanmıştır. Yasanın temel hedefi, 2030 yılına kadar ülke çapındaki karbon emisyonlarının %40 oranında azaltılmasıdır. Yasa ile birlikte temiz enerji yatırımları,

¹²⁸ <https://www.hydrogen.energy.gov/>

¹²⁹ <https://americanmadechallenges.org/>

¹³⁰ <https://www.iea.org/policies/13684-university-hydrogen-turbine-system-research>

¹³¹ <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/02/11/biden-harris-administration-launches-american-innovation-effort-to-create-jobs-and-tackle-the-climate-crisis/>

¹³² <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-420-million-advance-clean-energy-breakthroughs-energy-research-centers>

elektrikli araçlar, metan emisyonlarının azaltılması, binaların enerji verimliliğinin azaltılması gibi enerji güvenliğinin artırılması ve yeşil enerjiye geçiş için yaklaşık 370 milyar dolar fon tahsis edildiği duyurulmuştur.

ABD Ulaştırma Bakanlığı (DOT), Carbon Reduction Program (Karbon Azaltım Programı) tarafından eyaletlerin karbon azaltma stratejileri geliştirmeleri ve ulaşımdan kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik projeler için 6.4. milyar dolar fon tahsis edildiği duyurulmuştur. Bu fonla birlikte trafik yönetimi, toplu taşıma, alternatif yakıtlar, liman elektrifikasyonu alanlarında çalışmalar yürütülecektir.

ABD 2023 yılında Japonya ile kritik mineraller tedarik zincirlerinin güçlendirilmesine yönelik anlaşma imzalamıştır. Temiz enerji için hayati önem taşıyan kobalt, grafit, lityum, nikel gibi kritik mineraller çeşitlerinin ithalat ve ihracat kısıtlamalarının kaldırılarak rekabetçi bir ortamın oluşturulması amaçlanmaktadır. Yine aynı yıl içerisinde ABD ile Avustralya arasında temiz enerji dönüşümü için gerekli olan kritik minerallerin sürdürülebilir şekilde tedarik edilmesi, minerallerin çıkarılması, ticarileştirilmesi için ortak bir pakt oluşturulmuştur. (Australia - US Climate, Critical Minerals and Clean Energy Transformation Compact)

2023 yılında yayınlanan ABD Ulusal Temiz Hidrojen Stratejisi ile birlikte 2030 yılına kadar ABD sera gazı emisyonlarının, 2005 yılına nazaran %50 oranlarında azaltılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda 2030 yılına kadar 10 MMT, 2040 yılına kadar 20 MMT ve 2050 yılına kadar 50 MMT yeşil hidrojen üretilmesi hedefler arasında yer almaktadır. Temiz hidrojen üretiminde yakın vadede odaklanılması gereken hidrojen üretiminde elektrilizörler başta olmak üzere diğer efektif yeşil hidrojen üretim yöntemleri, CCUS ile fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemleri için araştırma ve geliştirme faaliyetlerini desteklemektir. Hidrojen üretiminde orta vadeli planlar arasında gW ölçekli elektrilizörlerin konuşlandırılması ve tedarik zincirlerinin oluşturulması yer almaktadır (2026-2029). Karbon salınımlarının büyük çoğunluğunu oluşturan enerji, endüstri, taşımacılık alanlarının öncelikli olarak karbondan arındırılarak büyük ölçekte araştırma ve geliştirme faaliyetleri teşvik edilmektedir. 2026 yılına kadar yeşil hidrojen üretim maliyetinin kilogram başına 2 dolar; 2031 yılına kadar ise 1 dolara kadar düşürülmesi hedefler arasındadır.¹³³

4.6.7.3 Çin Halk Cumhuriyeti

Çin hükümeti tarafından 2001 yılında 863 Electric Fuel Cell Vehicles Project kapsamında, elektrikli yakıt hücreli araçların araştırılması ve geliştirilmesi için 800 milyon RMB (yaklaşık 127 milyon dolar) tutarında bir yatırım gerçekleştirilmiştir. Bu yatırım ile birlikte, temiz enerji teknolojilerine geçişin hızlandırılması, hidrojen yakıt hücreli araçların yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Hükümetin mevcut programı, hidrojen altyapısının geliştirilmesi, teknolojik faaliyetlerin teşvik edilmesi ve yeşil ulaşım çözümleri için kullanılmaktadır.¹³⁴

Çin Halk Cumhuriyeti tarafından yenilenebilir enerjinin, daha öncelikli bir enerji kaynağı haline gelmesi için 2006 yılında Yenilenebilir Enerji Yasası (Renewable Energy Law) kabul edilmiştir. Yasanın kabul edilmesi ile birlikte yenilenebilir enerji sektörünün ticarileştirilmesi, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yürütülmesi, proje geliştirme süreçlerinin hızlandırılması amaçlanmıştır. Yasa ile birlikte elektrik şebekeleri, biyo yakıtların taşındığı gaz boru hatlarına bağlanmaya ilişkin şartlar da entliğe kavuşturulmuştur. Böylelikle Çin Halk Cumhuriyeti bir bakıma hidrojenin taşınması için gerekli alt yapı hazırlıklarına da başlamış olmaktadır. Yine 2006 yılında Çin hükümeti tarafından kabul edilen 11. Beş Yıllık Plan ile birlikte, devlet kurumlarının ve konutlarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla devlet binalarının yeniden inşasında %20 oranının enerji verimliliğinin sağlanması,

¹³³U.S. National Clean Hydrogen Strategy And Roadmap at a Glance, 2023

¹³⁴ https://ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf%20p.%20192

2002 baz yılına göre 2010 yılına kadar birim inşaat alanı başına enerji tüketimi miktarının %10 azaltılması hedeflenmiştir.

2008 yılına gelindiğinde ise Çin Hükümeti tarafından "Shandong Province One Million Rooftops Sunshine Plan" duyurulmuştur. Plana göre binalarda güneş ve jeotermal enerjinin entegre bir şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Duyuru takiben Çin'in Yantai ve Ji şehirlerinde binaların inşaatında güneş enerjisinin entegrasyonuna yönelik zorunlu düzenlemeler getirilmiştir.

2009 yılında ise karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin gösteriminin hızlandırılması, teknik, düzenleyici, kurumsal, finansal, çevresel faktörlerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için Avustralya'nın desteğiyle Asya Kalkınma Bankası Karbon Yakalama ve Depolama fonu oluşturulmuştur. Çin Halk Cumhuriyeti, Hindistan ve Endonezya bu fondan yararlanan öncelikle ülkeler arasındadır.

2010 yılında "863 Key Technology and System Integration Project for Electric Vehicles" projesi, Çin'in ileri teknoloji gelişimini desteklemek amacıyla, elektrikli araç teknolojilerinde kilit teknolojilerin geliştirilmesi ve sisteme entegrasyonun sağlanması amaçlanmaktadır. Elektrikli araçlar ve batarya entegrasyonu için toplam 738 milyon RMB (yaklaşık 117 milyon ABD Doları) ayrılmıştır. Bu fon ile birlikte batarya kapasitesi, şarj süresi gibi ilerlemeler kaydedilmesi hedeflenmektedir. 2015 yılına gelindiğinde ise elektrikli araçlar için şarj altyapısının geliştirilmesine yönelik kılavuz yayınlanmıştır. Kılavuza göre, 12.000'den fazla yeni merkez şarj ve batarya değiştirme istasyonu, 4,8 milyonun üzerinde merkezi olmayan şarj istasyonu eklenmesi planlanmaktadır.

2012 yılında ise Çin hükümeti tarafından yayınlanan "China Energy White Paper" planı ile birlikte 2015 yıl sonuna kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerjinin payını %11,4'e çıkarmayı planlamaktadır. Çin açısından çeşitli ve temiz enerji gelişimini teşvik amacıyla yeni stratejik endüstrilerin oluşturulması için önemli adımlardan birisidir. 2015 yılına kadar ülke genelinde toplam 200 yeşil enerji ilçesi kurulması planlanmaktadır.

2019 yılında ise büyük ölçekli endüstri etkinliklerinde karbon nötrlüğü için uygulama kılavuzu (deneme) yayınlanmıştır. Bu kılavuza göre faaliyet sırasında oluşabilecek sera gazı emisyonlarının hesaplanması, emisyon tahminleri, emisyon azaltma önlemleri, telafi yöntemlerinin raporlanması gerekecektir.

Eylül 2020'de Başkan Xi Jinping'in 2030 yılına kadar emisyonların zirveye ulaşması ve 2060 yılına kadar karbon nötrlüğü duyurusunun ardından, Ekoloji ve Çevre Bakanlığı iklim değişikliği ile ilgili bir dizi yüksek düzeyde politika belgesi yayımlamıştır. Karbon emisyon ticareti için geçici kurallar, ulusal karbon pazarının çeşitli tanımlarını netleştirmekte ve ana emisyon varlıklarının dahil edilme kriterlerini, toplam izinlerin belirlenmesi ve tahsisi, ticaret varlıkları, doğrulama yöntemleri, raporlama ve bilgi açıklama, denetim ve ihlal cezalarını kapsamaktadır. Bu kurallar 1 Şubat 2021'de yürürlüğe girmiştir.¹³⁵

2020 yılında Çin, özel hidrojen üretimi için kurulan küresel elektrolizör kapasitesinin %10'undan daha azını oluştuyordu ve bu kapasite küçük demonstrasyon projelerinde yoğunlaşmıştı. 2022 yılında Çin'deki kurulu kapasite, dünyanın en büyük elektroliz projesi (150 MW) de dahil olmak üzere küresel kapasitenin %30'unu temsil eden 200 MW'ın üzerine çıktı.¹³⁶

2021 yılın Çin Hükümeti "Sinopec Green Hydrogen Plant" ile birlikte yeşil hidrojen üretiminde ilk somut projesini başlatmıştır. Projenin hayata geçirilmesi ile birlikte yıllık 20.000 ton kapasiteli elektrolizle birlikte yeşil

¹³⁵ <https://www.iea.org/policies/12988-interim-regulations-for-the-management-of-carbon-emissions-trading>

¹³⁶ IEA, Global Hydrogen Review, 2023

hidrojen üretilmektedir. Proje, 2021 yılına kadar inşaat aşamasında olan en büyük fotovoltaik yeşil hidrojen üretim projesidir. Ayrıca 120,000 metreküp hidrojen depolama kapasitesine sahip depolama tanklarıyla desteklenecektir. Bu sayede her yıl 485.000 ton karbondioksit emisyonunun azaltılması hedeflenmekte ve sıfır emisyon hedeflerine yaklaşılması planlanmaktadır.¹³⁷

Çin hükümeti tarafından 2022 yılında "Hydrogen Industry Development Plan" yayınlanmıştır. Çin Halk Cumhuriyeti'nin hızla büyüyen hidrojen endüstrisi için ulusal düzeyde ilk planlamayla karşılaşmıştır. Ulusal planda 2025 yılı itibarıyla yeşil hidrojen üretimi ve hidrojen yakıt hücresi araçlar için iki endüstri hedefi belirlenmiştir. Buna göre; 2025 yılına kadar hidrojen yakıt hücresi araç sayısı 50.000'e ulaşacak ve doldurma istasyonları geliştirilecektir. Ülkenin yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin ise yıllık 100.000-200.000 ton arasında olması hedeflenmektedir. Çin hükümeti yeşil hidrojen üretiminde, tüketime yakınlık ilkesi benimsenmektedir. Çin hükümeti tarafından, üretim noktalarına yakın olacak bir hidrojen pazarı kurulması hedeflenmektedir. Hidrojen üretiminde, gri hidrojenin kademeli olarak azaltılması da planlar arasındadır. Hidrojen üretiminde ise temiz teknolojilere dayalı yan ürün ve yenilenebilir elektroliz gücü tercih edilecektir.

4.6.7.4 Almanya

Almanya'nın yenilenebilir enerji politikalarının temeli, 1991 yılında "Stromeinspeisungsgesetz" (Electricity Feed-In Law) ile atılmış ve sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişte önemli bir adımdır. Yasa ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin şebekeye erişimi sağlanmıştır. Enerji dağıtım şirketleri ise enerji santrallerinden sağlanan elektrik için ödemeye zorlanmıştır. 1996 yılında ise tedarikçiler için belirlenen tarifeler, kömür katkısı nedeniyle aşamalı olarak düşürülmüştür. 1998 yılında ise yapılan değişiklikle birlikte elektrik tedarik şirketlerinin, toplam elektrik arzlarının en fazla %10'una kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılama sınırı getirilmiştir. Bu süreçten en olumlu şekilde etkilenen yenilenebilir enerji kaynağı ise rüzgar olmuştur. 2000 yılına gelindiğinde ise yenilenebilir enerji kaynakları yasası çıkarılmıştır. Yasa ile birlikte 2010 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik miktarının iki katına çıkarılması hedeflenmiştir.

Kasım 2000 yılında, küresel iklim krizinin önlenmesi amacıyla, 2005 yılına kadar karbondioksit emisyonlarının %28 azaltılması ve Kyoto Protokolü'nde belirtilen sera gazlarının 2012 yılına kadar %35 azaltılması hedeflenmiştir. Bu önlemin ve enerji tasarrufunun desteklenmesi amacıyla yatırım yapmak isteyenlere düşük faizli kredi imkânları sunulmuştur. Kreditanstalt für Wiederaufbau ve Deutsche Ausgleichbank finansmanı ile birlikte programlar yürütülmektedir.

2008 yılında ise "Ulusal Hidrojen ve Yakıt Hücresi Teknolojisi İnovasyon Programı" ile birlikte Almanya, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin geliştirilmesi, genişletilmesi ve uygulanması için finans kaynakları ayırmıştır. Programla; teknolojilerin ticarileştirilmesi, hükümetin enerji ve iklim politikası hedeflerine katkı, endüstriyel araştırma ve arge faaliyetleri desteklenmektedir. Bu doğrultuda 1.4 milyar Euro bütçe ayrılmıştır.

2009 yılında Alman federal hükümeti tarafından elektrikli mobiliteyi desteklemek için teşvik ve finansman desteği sağlanmıştır. Bu doğrultuda 2019 yılına kadar en az 300.000 elektrikli aracın satın alınmasının desteklenmesi amacıyla 600 milyon Euro ayrılmıştır. Yine elektrik sarj istasyonlarının yaygınlaştırılması için 300 milyon Euro finansman sağlanmıştır.

¹³⁷ <http://www.xinhuanet.com/energy/20211130/7d7a74eff26a4641ad692f3e9a2e73a7/c.html>

Almanya hükümeti tarafından 2019 yılında "Climate Action Programme 2030" planı yayınlanmıştır. Plana göre Almanya'nın sera gazı emisyonları 1990 seviyelerine göre 2030 yılına kadar %55 azaltılması hedeflenmektedir. İklim eylem programı ile birlikte hem ekonomik hem de sürdürülebilir bir adil geçiş gerçekleşecektir. Enerji verimliliğinin daha fazla kullanımını desteklemek, daha sürdürülebilir konutlar inşa etmek ve eski ve kirlotici ısıtma sistemlerini değiştirmek, ayrıca daha çevre dostu ulaşım önlemlerini desteklemek için fonlar ayrılacaktır.

Almanya federal hükümeti tarafından, hidrojenin rolünün genişletilerek fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması amacıyla 2021 yılında Ulusal Hidrojen Stratejisi yayınlanmıştır. Almanya, yeşil hidrojen üretiminin geliştirilmesi için 7 milyar Euro ayırmıştır. Almanya 2030 yılına kadar 5 gW hidrojen üretim kapasitesine sahip elektrolizör inşa etmeyi planlanmaktadır. 2030-2040 yılları arasında ise ek 5 gW'lık kapasite inşa edilecektir. Elektrolizörlerden hidrojen üretimi için ihlae süreçleri, yeni tesislerin inşası, pilot programlar aracılığıyla hedefe ulaşılacaktır. Yine endüstri alanında yeşil hidrojen teşvik edilecektir. Yeşil hidrojen ayrıca, hava taşımacılığında motor yakıtı olarak kullanılabilmesi için gerekli araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülecektir. Bu strateji, Almanya'nın yalnızca iç iklim hedeflerine ulaşmadaki kararlılığını değil, aynı zamanda kendisini küresel hidrojen ekonomisinde bir lider olarak konumlandırma hedefini de vurgulamaktadır.¹³⁸

Almanya ve Kanada, yeşil hidrojen odaklı araştırma ve geliştirme hibeleri için 2021 yılında bir proje çağrısı yapmıştır. Bu girişim, iki ülke arasındaki karşılıklı ilgi alanlarına yönelik ortak araştırma ve geliştirmeyi teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu çağrı kapsamında finanse edilen projeler, hidrojen üretimi, depolama, taşımacılık, altyapı, lojistik ve hidrojen değer zincirlerinin ulusal enerji sistemlerine entegrasyonu gibi çeşitli konuları ele alacaktır.

Avustralya ve Almanya arasında hidrojen teknolojisinin geliştirilmesine yönelik işbirliğini güçlendirmek amacıyla iki taraflı bir girişim başlatılmıştır. Avustralya Yenilenebilir Enerji Ajansı (ARENA) ve Alman Federal Eğitim ve Araştırma Bakanlığı, sırasıyla AUD 50 milyon (2021-2022 Bütçe girişiminde düşük emisyonlu teknoloji ortaklıkları için sağlanan 565.8 milyon AUD'den) ve 50 milyon € tutarında finansman sağlayarak yeni bir ortak Hidrojen İnovasyon ve Teknoloji İnkübatörü olan HyGATE'yi desteklemeyi taahhüt etmektedir. ARENA, hidrojen tedarik zinciri boyunca gerçek dünya pilot, deneme, gösterim ve araştırma projelerini destekleyerek HyGATE'de lider bir rol üstlenmektedir.

Almanya federal hükümeti tarafından Haziran 2024'te bir Hidrojen Ana Ağı (Hydrogen Core Network) kuruldu ve bu ağ, hidrojen üretim altyapılarını inşa etmek ve birbirine bağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Alman hükümeti, başlangıç finansmanı sağlamaktadır; Avrupa Komisyonu, Hidrojen Ana Ağı'nın (HCN) inşasını desteklemek amacıyla AB tarafından 3 milyar € tahsis edilmesini onaylamıştır. İlk yıllarda hidrojen talebinin düşük olması beklenmektedir. Ancak Federal Ağ Ajansı, uzun vadede bir hidrojen pazarının kurulmasını ve daha fazla şebeke müşterisi olmasını öngörmektedir. Bu nedenle, şebeke ücreti başlangıçta maliyetleri karşılayacak bir ücretten daha düşük olarak belirlenmiştir, böylece ağın ilk yıllarındaki yüksek ücretlerin hidrojenin gelişimini engellemesi önlenmiştir.

2024 yılı içerisinde Almanya ve Cezayir, yeşil hidrojen üretimi alanında daha yakın işbirliği yapmayı planlıyor (Algeria-Germany, Declaration of Intenr in Green Hydrogen Cooperation). Amaç, özellikle Cezayir'in hidrojen altyapısını ve üretimini kurmasına yardımcı olmaktır. Bu amaçla, iki ülke enerji ortaklığı çerçevesinde bir ikili hidrojen görev gücü oluşturacaktır. Alman-Cezayir hidrojen görev gücü, yeşil hidrojen ve türevlerinin üretimi, depolanması ve taşınması için politika ortamını teşvik edecektir. İkili işbirliği, her iki ülkede de özel yatırımları

¹³⁸ The Federal Governmet, The National Hydrogen Strategy

desteklemeyi ve böylece Avrupa'daki enerji güvenliğine katkıda bulunmayı, aynı zamanda Paris İklim Anlaşması'nı uygulamayı hedeflemektedir.¹³⁹

Almanya federal hükümeti tarafından Ağustos 2024 tarihinde çıkarılan Federal Bütçe Planı Hakkında Kanunun Tasarısı ile birlikte 2024-2027 dönemi için Germany's Special Climate and Transformation Fund (KTF) ayrılmıştır. Bu fon ile birlikte; elektromobilité, uluslararası hidrojen pazarı işbirlikleri, sıfır karbon ısıtma altyapıları, enerji verimliliği, ulaşımda hidrojen ve yakıt hücresi uygulamaları için araç endüstrisini teşvik edilmesi amaçlanmaktadır.^{140 141}

4.6.7.5 Japonya

1970'li yıllarda yaşanan petrol krizlerinden sonra Japon hükümeti tarafından 1980 yılında petrole alternatif olabilecek enerji kaynaklarının geliştirilmesi, ikame enerji kaynaklarının teşvikinin sağlanması için yasa yürürlüğe konulmuştur. Bu yasa ile birlikte petrolün yerine geçebilecek, yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere, geliştirilmesi ve tanıtılması için faaliyetlere başlanılmıştır. Ekim 1980'de New Energy Development Organization (Yeni Enerji Geliştirme Organizasyonu - NEDO) kurulmuştur. NEDO, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında ortaya çıkan maliyetlerinin düşürülmesi ve iyileştirilmesi önemli bir rol oynamıştır. Japon hükümeti tarafından 1996'da "Renewable Energy Target of 2010" planı ile birlikte 2010 yılına kadar toplam enerji arzında güneş, rüzgar, biyokütle gibi enerji kaynaklarından üretilecek enerji miktarı için hedefler belirlenmiştir. Mayıs 2002 yılında ise Japonya hükümeti, Kyoto protokolünü onaylamış ve karbondioksit emisyonunu azaltma taahhütlerini yerine getirmek için küresel ısınma karşıtı önlemler için teşvik yasası çıkarılmıştır. Bu programla birlikte sanayi sektöründe mevcut olan karbondioksit emisyonlarının %7 oranını azaltılması hedeflenmiştir. 2006 yılında yapılan değişiklikle beraber, Kyoto Kredi Mekanizması Sistemi'nin uygulanması için banka rehberliği açıklanmıştır.

2002 yılında Act No. 94 ile birlikte Japonya'nın petrol, doğal gaz, kömür ve mineral tedarik güvenliğinin sağlanması için gerekli fonları sağlama yetkisi tanınmıştır. Yasa ile birlikte Japonya Petrol, Gaz ve Metaller Ulusal Kurumu kurulmuş olup kurumun amacı, hidrokarbonlar ve minerallerin devamlı ve uygun fiyatlarla temin edilmesine, çevre kirliliğini en aza indirilmesi ve korunmasıdır. Bu hedeflere ulaşılabilmesi için hem yurt içi hem de yurt dışında arama ve çıkarma, rafine edilmesi, sıvılaştırılması ve depolanması için gerekli fonların sağlanması gerekmektedir. 2004 yılında ise Metan Piyasalarına (Methane to markets partnership) katılım sağlanmıştır. Metan emisyonlarının maliyet açısından etkili ve kısa vadeli olarak azaltılması hedeflenmiştir. Ortaklıkla beraber 2015 yılına kadar toplam metan emisyonlarının 50 Mt karbondioksit olarak azaltılması hedeflenmiştir. 2007 yılında ise Japonya Kalkınma Bankası ile Japan Smart Energy Co., karbondioksit emisyonlarının azaltılması için kurulacak olan tesislerin yatırımları desteklemek amacıyla "Energy Bank" isimli fonu kurmuşlardır. Fon ile birlikte endüstride enerji verimliliğinin sağlanması gerçekleştirilmiştir.

2010 yılında yeni nesil araç stratejisi ile birlikte 2030 yılına kadar yeni nesil teknolojilerin, otomobiller içindeki payının %50-%70 arasında artırılması hedeflenmektedir. Yine aynı yıl içerisinde Japonya'nın da dahil olduğu 41 hükümet ile birlikte Global Methane Initiative (GMI) kurulmuştur. GMI, devlet ve devlet dışı aktörleri iş

¹³⁹ https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240606_wanda.html

¹⁴⁰ Entwurf Eines Gesetzes Über Die Feststellung Des Bundeshaushaltsplans Für Das Haushaltsjahr 2025 (<https://dserver.bundestag.de/btd/20/124/2012400.pdf#page=3283>)

¹⁴¹ <https://www.iea.org/policies/21185-germanys-special-climate-and-transformation-fund-hydrogen-and-fuel-cell-applications-in-transport>

birliği içinde bir kamu-özel ortaklığında bir araya getirmektedir. GMI, metan azaltımı, geri kazanımı ve kullanımı konusunda beş ana insan kaynaklı emisyon sektörüne odaklanarak (tarım, kömür madenleri, belediye katı atıkları, belediye atık suları ve petrol ve gaz sistemleri) özel olarak metanı hedefleyen tek uluslararası çabadır.

2011 yılında meydana gelen 9.0 büyüklüğündeki Tohoku depremi ve tsunamisi sonrasında, Fukushima-1 Nükleer Santrali'nde bir nükleer kaza gerçekleşmiştir. Tsunami ile birlikte 1-2-3 numaralı reaktörlerde erime gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak da atmosfere ve denize radyoaktif maddeler karışmıştır. Nisan 2014'te Japon hükümeti tarafından Stratejik Enerji Planı açıklanmıştır. Plan, büyük Japonya depremleri, nükleer kazalar gibi enerji güvenliğini doğrudan etkileyen zararların önüne geçilmesini hedeflemektedir. Enerji arz ve talebine yönelik olarak; kaynakların istikrarlı bir şekilde temin edilmesi, enerji tasarrufu, yenilenebilir enerjinin hızla devreye alınması, nükleer enerji politikasının yeniden tesisi, hidrojen gibi ikincil enerji yapılarının geliştirilmesi gibi çalışmaların yürütülmesi planlanmıştır. 2018 yılında yayınlanan Strateji Plan'ına göre Japonya'da 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarında %26 azalma; 2050 yılına kadar ise sera gazı emisyonlarında %80 oranında azalma hedeflenmektedir. 2019 yılına gelindiğinde ise Hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin geliştirilmesi stratejisi ile birlikte hidrojen teknolojileri üzerine temel iki hedef belirlenmiştir. Hidrojen teknolojisinde üç alan ve bu alanlara bağlı olarak öncelikli faaliyetlerin belirlenmesi ve teknolojilerin geliştirilmesi, teşvik edilmesi ve işbirlikleri için çaba göstermektir.

2019 yılında Japonya Ticaret ve Sanayi Bakanlığı tarafından karbon geri dönüşüm teknolojileri yol haritası yayınlanmıştır. Bu yol haritasında, CCUS teknolojilerinin araştırılması ve geliştirilmesi, doğrudan karbon yakalama teknolojileri, karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

Küresel Sıfır Emisyon Araştırma Merkezi (Global Zero Emission Research Center) (GZR), 2020 yılında İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Ulusal Enstitüsü bünyesinde, özellikle G20 ülkelerinden araştırmacılar arasında en son araştırma ve geliştirme çalışmalarını birleştiren yerel ve uluslararası kolektif çabaları bir araya getiren bir platform olarak kurulmuştur. G20 üyesi ülkelerdeki önde gelen ulusal araştırma enstitüleri ve diğer kuruluşlarla birlikte, yenilikçi çevre ve enerji teknolojileri için araştırmalar yürütecektir. Merkez, organik-inorganik hibrit fotovoltaik, çoklu eklem fotovoltaik, termoelektrikler ve termal yönetim, iyonik cihazlar, yapay fotosentez, hidrojen üretimi ve depolanması, karbon bazlı enerji taşıyıcıları, akıllı CO2 kullanımı, kaynak döngüsü ve çevresel ve sosyal etki değerlendirmesi gibi karbonsuzlaştırmaya yönelik teknolojilerin geliştirilmesine odaklanan on araştırma ekibinden oluşmaktadır.

Japonya ile Birleşik Arap Emirlikleri arasında 2021 yılında, hidrojen politikası ve standart geliştirme konusunda bilgi alışverişinin sağlanması, hidrojen üretimi ve taşınması, uluslararası bir tedarik zinciri oluşturma amacıyla hidrojen üzerine bir işbirliği mutabakatı imzalanmıştır. Hidrojen arz-talebi, hidrojen güvenliği, fosil yakıtlı kaynaklı hidrojen üretimi, karbon depolama ve ihracat konularında araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Yine aynı yıl içerisinde hidrojen ile ilgili projelerin finanse edilmesi için Yeşil İnovasyon Fonu oluşturulmuştur. Fon kapsamında, geniş ölçekte hidrojen tedarik zinciri geliştirme için 300 milyar yen'e kadar bütçe ayrılmıştır. Fon, hidrojenin taşınması, sıvılaştırılma teknolojilerinin geliştirilmesi gibi konulara odaklanmaktadır. Yine yenilenebilir enerji kaynaklarından su elektrolizi yoluyla temiz hidrojen üretiminin gerçekleştirilmesi için 70 milyar yen'e kadar bütçe ayrılmıştır. Demir-çelik üretim endüstrilerinde, hidrojen kullanım kapasitelerinin geliştirilmesi içinse 450 milyar yen'e kadar bir bütçe ayrılmıştır.

Ocak 2023 tarihinde ise Japonya Ekomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI) tarafından karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanmasını hızlandırmayı amaçlayan CCS Uzun Vadeli Yol Harita'sı yayınlanmıştır. Yol Haritası, 2030 yılına kadar yıllık 6-12 milyon ton karbondioksit depolama kapasitesine ulaşmayı; 2050 yılında ise bu kapasitenin 120-240 milyon tona artırılmasını hedeflemektedir. 10 Şubat 2023 tarihinde ise 10 yıl içerisinde

kamu ve özel sektörün karbon azaltımı yatırımları için 20 trilyon yen yatırım yapmayı hedefleyen Yeşil Dönüşüm (GX) Politikasını onayladı. Bu politika, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, diğer temiz teknolojiler ve enerji güvenliğine yönelik karbon azaltımı yatırımlarını destekleyerek Japonya'nın enerji sektöründe geçiş yapmayı amaçlamaktadır. 2024 yılında ise Yeşil Dönüşüm Politikası kapsamında batarya üretim tedarik zincirlerinin desteklenmesi, enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunun desteklenmesi amacıyla 238 milyar yen bütçe ayrılmıştır.

4.6.7.6 Küresel Hidrojen Politikaları

Düşük emisyonlu hidrojen üretimi, duyurulmuş olan projelerin hayata geçirilmesi halinde 2030 yılında 38 Mt'a ulaşabilecektir. Ancak bu miktarın 17 Mt'si erken aşamada olan projelerden kaynaklanmaktadır. Hidrojen üretiminin 27 Mt'su elektroliz ve düşük emisyonlu elektriğe, 10 Mt'si ise CCS teknolojilerine dayanmaktadır.

Hükümetler, büyük ölçekli hidrojen üretim politikalarını desteklemek amacıyla fonlar ayırmaktadır. Kuzey Amerika ve Avrupa, düşük emisyonlu hidrojen üretimini teşvik eden girişimlerin uygulanmasında ön sıralarda yer almaktadır. Yine Birleşik Krallık'ta Düzenlenmiş Varlık Tabanı Modelleri, Fark Sözleşmeleri gibi devlet destekli finansman kaynakları mevcuttur.

Net Sıfır Karbon emisyon hedefleri doğrultusunda, yeşil hidrojene dayalı üretim, ülkeler arasında öncelikli sıradadır. Ancak elektrolizör yatırımlarının maliyetli olması, yeşil hidrojene dayalı geçişte sıkıntılar yaratmaktadır. 2030 yılına kadar toplam 175 gW yıllık üretim kapasitesine sahip elektrolizör kurulumları hedeflenmektedir. Elektrolizörlerin ise %75'ini alkalın elektrolizörler oluşturmaktadır. 2030 yılına gelindiğinde ise PEM üretim kapasitesinin %25'ini; Alkali elektrolizörler ise %54'ünü oluşturacaktır. Günümüzde bir elektrolizör için sermaye maliyeti; teçhizat, gaz arıtma, mühendislik, tedarik, inşaat maliyetleri de dahil olmak üzere 1700-2000 dolar/kW arasında değişmektedir (Sırasıyla alkali ve PEM için). Elektrolizörlerin önümüzdeki on yıl içinde mevcut duyurularda öngörülen dağıtımına bağlı olarak, ölçek ekonomileri ve seri üretim nedeniyle sermaye maliyeti düşebilir. Duyurulan projelerin kapasite kullanımına bağlı olarak, kurulu bir elektrolizörün maliyeti 2023'e kıyasla 2025'e kadar %50 ve 2030'a kadar %60 oranında düşerek yaklaşık 720-810 USD/kW'a ulaşabilir.¹⁴²

Suudi Arabistan'da 2026 yılında faaliyete geçmesi planlanan, dünyada inşaatına başlanmış en büyük hidrojen projesi olan NEOM Yeşil Hidrojen Projesi ile birlikte Neom isimli bir şehir inşa edilmektedir. NEOM Yeşil Hidrojen Şirketi, ACWA Power, Air Products ve NEOM'un eşit ortaklıkta kurduğu bir girişim olup, 2026'da yeşil amonyak üretmek üzere dünyanın en büyük yeşil hidrojen tesisini inşa edilmektedir. Toplam değeri 8,4 milyar ABD doları olan proje, yerel, bölgesel ve uluslararası 23 banka ve finans kuruluşundan 6,1 milyar ABD doları tutarında kredi ile finanse edilmektedir. Üretilen tüm yeşil amonyakın 30 yıllık münhasır alım anlaşması güvence altına alınmıştır. 4GW'a kadar güneş ve rüzgar enerjisini entegre ederek, 2026'nın sonunda günde 600 ton karbonsuz hidrojen üretmek için yeşil amonyak şeklinde bir çözüm sunacaktır. Umman'da yeşil hidrojen sektörünün gelişimini hızlandırmak için, 4.5. gW rüzgar ve güneş enerjisine entegre elektrolizör ile birlikte yılda yaklaşık 178.000 tob yeşil hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Projenin 2030 yılına kadar Umman'ın yeşil hidrojen üretiminde yıllık 1.38 milyon tona çıkarılması beklenmektedir. Proje, İngiltere, Japonya ve Avustralya'da bulunan şirketlerin konsorsiyumu ile birlikte gerçekleştirilecektir.

Özel sektörde, hidrojen alım-satım anlaşmaları yoluyla düşük emisyonlu hidrojeni benimsemeye başlamıştır, ancak çabalar çok küçük ölçekte kalmaktadır. Şirketler 2 Mt'a kadar düşük emisyonlu hidrojen için alım anlaşmaları imzalamışlardır, ancak bunların yarısından fazlası bağlayıcı olmayan koşullara sahip ön anlaşmalardır.

¹⁴² IEA, Global Hydrogen Review, 2023

Uluslararası işbirliği girişimleri, düşük emisyonlu hidrojene yönelik talebin düzenlenmesinde yardımcı olabilir. Hükûmetler ve şirketler, hidrojen de dahil olmak üzere düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaştırılmasını teşvik etmek için bir dizi işbirliği girişimi başlatmıştır. Bu girişimler tarafından verilen taahhütlere dayanarak, 2030 yılına kadar 0,8-3 Mt düşük emisyonlu hidrojen talebi yaratabilirler. ¹⁴³

Güncel olarak Şu anda toplam 41 hükûmetin bir hidrojen stratejisi var ve Japonya, Çin gibi hükûmetler orijinal stratejilerini güncelleyerek hedeflerini yükseltiyor. Düşük emisyonlu hidrojenin, emisyonların azaltılmasının zor olduğu sektörlerin karbondan arındırılması için önemli bir fırsat olduğu konusunda ülkeler arasında fikir birliği mevcuttur. ¹⁴⁴

Yeşil hidrojenin ülkeler arasında benimsenmesi, ticarileştirilmesinin kolaylaştırılması için, hidrojenin çevresel niteliklerini ele alan ve uluslararası uyumluluğunu saplayan standartların, düzenlemelerin, sertifikasyon sistemlerinin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Dünya genelinde hükûmetler, hidrojene ilişkin standartların belirlenmesi noktasında çalışmalar yürütmektedir. Bu sertifikasyon sistemleri ve düzenleyici çerçeveler kapsam, sistem sınırları ve uygunluk kriterleri açısından belirli benzerlikleri paylaşıırken, önemli farklılıklar da vardır. Dolayısıyla küresel bir hidrojen pazarının kurulabilmesi için, hükûmetler ve örgütler arasında ortak çalışma yürütülmesi gerekmektedir. ISO tarafından 2023 yılında ISO TS/19870-2023 yayınlanmıştır. Standartlar, hidrojen üretimi, sıvılaştırılması, taşınması, sera gazı emisyonları belirleme, tedarik zincirlerini içermektedir. ISO/CD 19870-1.2. taslağı ise Komite tarafından gözden geçirilmektedir. ¹⁴⁵

4.6.7.7 Hidrojen Stratejisinde Türkiye'nin Rolü

Türkiye, jeopolitik avantajları, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki yüksek potansiyeli ve 2053 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yeşil hidrojen ekonomisinde lider ülkelerden biri olmayı hedeflemektedir. Türkiye güneş ve rüzgâr enerjisi açısından potansiyeli yüksek bir ülke konumundadır. 2022 yılında güneş enerjisinde toplam 15,84 TWh üretim gerçekleşmiştir, toplam üretimdeki payı ise %4,5'tir. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre Türkiye'de yıllık ortalama güneşlenme süresi 2741 saattir, yıllık ortalama ışıınım süresi ise 1527 kWh/m²'dir. ¹⁴⁶ Ayrıca YEKDEM 2022 verilerine göre 62 adet rezervuarlı hidroelektrik santrali bulunmaktadır, bu santrallerin ayrıca yardımcı kaynak olarak yüzer güneş enerjisi santralleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca Türkiye rüzgâr enerjisinde de önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Türkiye'nin 50 m yükseklikte yıllık ortalama hızı 7,5 m/s'dir. Bu rüzgâr hızına sahip alanlarda km² başına 5 MW gücünde RES'ler kurulabileceği tespit edilmiştir. Karasal (on-shore) rüzgâr enerji santralleri dışında Türkiye'nin denizlerde de (offshore) rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksektir. Görüldüğü üzere özellikle Ege ve Marmara denizinde offshore santraller kurmak mümkündür. Bunun sonucunda rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi daha fazla artacaktır, üretim fazlası elektrik enerjisi ile de yeşil hidrojen üretimi gerçekleşecektir. ¹⁴⁷

Özetle Türkiye'nin yenilenebilir enerjide potansiyelleri incelendiğinde teknik açıdan Avrupa ülkelerine nazaran güneş radyasyonunun ve güneşlenme süresinin yüksek olması, nehirlerin elektrik üretimindeki verimliliği, özellikle güney ege bölgesinde rüzgar potansiyelinin yüksek olması, üç tarafının denizlerle çevrili olması sayesinde

¹⁴³ IEA, Global Hydrogen Review, 2023

¹⁴⁴ IEA, Global Hydrogen Review, 2023

¹⁴⁵ IEA, Global Hydrogen Review, 2023

¹⁴⁶ Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023

¹⁴⁷ Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), "Enerji İstatistikleri Raporu", 2023.

zengin su kaynaklarına haiz olması gibi Afrika ülkelerine kıyasen gelişmiş altyapı ve siyasi istikrarının sağlanması yeşil hidrojen için önemli bir nokta olarak yatırımcılar için cazip bir merkez konumundadır.¹⁴⁸

Türkiye yayınlamış olduğu Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası ile bu doğrultuda bir planı da yürürlüğe almaktadır.¹⁴⁹Yol haritasının çerçevesini çizen kalkınma planlarında yerli elektrolizör ve yakıt pillerinin üretimi ve hidrojeni sektörlerde kullanmak hedef haline gelmiştir. Bu stratejilerle, ülkenin enerji ithalat bağımlılığını azaltma, söz verilen karbon emisyonlarını düşürmeyi yerine getirmek ve yeşil hidrojen ihracatçısı olunması amaçlanmaktadır. Türkiye, 2030 yılına kadar 2 GW, 2035 yılına kadar 5 GW ve 2053 yılına kadar 70 GW elektrolizör kapasitesine ulaşmayı planladıysa da maliyetlerin artması ve hidrojen pazarının gelişim göstermesiyle birlikte elektrolizör kapasitesinin artış göstermesi yerinde bir beklenti olacaktır.¹⁵⁰

Türkiye güncel durumda Güney Marmara Hidrojen Vadisi gibi büyük ölçekli projeler, hem yeşil hidrojen üretimini artırmayı hem de bölgeyi bir hidrojen merkezi haline getirmeyi hedefiyle yeşil hidrojen pazarına giriş yapmıştır. Projenin alanında uzman birden fazla sektörün temsilcisini bir araya getirmesi Avrupa Birliği tarafından 9 milyon Euro gibi bir hibe ile desteklenmiştir. Hidrojen vadisi projesindeki konsorsiyum ortaklarının enerjide dönüşümü hedeflemeleriyle bölge özelinden ülke geneline doğru bir yeşil hidrojen vadileşmesinin önünü açması beklenmektedir. Özellikle fizibilitelele belirlenen yeşil hidrojen üretim-depolama ve ihracat için optimum verimliliğin yakalandığı noktalardaki organize alanlar ile yeşil hidrojendeki 2030 hedefinin yakalanması beklenmektedir.

Hidrojenin kullanımına yönelik ise GAZBİR-GAZMER projeleri ise hidrojenin doğal gaz altyapısına entegrasyonuna yönelik testlerle altyapının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Altyapı geliştirme sürecinde, depolama, taşımacılık ve enerji şebekesi entegrasyonu öncelikli alanlar olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin mevcut mevzuatındaki eksiklikler, hidrojen ekonomisinin büyümesini sınırlayan faktörler arasında yer alsa da sektörel dönüşüm tıpkı yenilenebilir enerji piyasasında olduğu gibi mevzuatlaşma ve regülasyon sürecini de inşasını zorunlu kılması beklenmektedir. Bu nedenle, hidrojenin üretimi, taşınması ve kullanımına dair düzenlemeler yapılması kritik bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır.

Güney Marmara Hidrojen Kıyısı gibi projelerin yanı sıra TÜPRAŞ, Bandırma'daki yatırımlar, hidrojen üretiminin sanayi ve enerji sektörlerine entegrasyonunu hedeflemektedir. Hidrojenin kimya, çelik ve taşımacılık gibi enerji yoğun sektörlerde kullanımının artırılması, karbon emisyonlarının azaltılması açısından stratejik öneme sahiptir.¹⁵¹ Zira karbonsuzlaşması zor sektörlerdeki hidrojen ikamesi emisyonlar ve maliyetler açısından yatırım cazibesi olarak ön plana çıkmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, küresel hidrojen talebinin 2050'ye kadar 450 milyon tona ulaşması beklenirken, Türkiye bu talebi karşılamak için güçlü bir tedarikçi olma yönünde gerek ham madde gerek teknoloji bakımından ön plana çıkmaktadır. Türkiye, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklardan ürettiği elektriği kullanarak hidrojen maliyetlerini düşürmeyi hedefleyerek uluslararası piyasada rekabet gücü elde etmeyi planlamaktadır. Bu bağlamda hedeflenen maliyet ise 2035'e kadar kilogram başına 2,4 dolar, 2053'e kadar ise 1,2 dolar olarak belirlenmiştir.¹⁵²Hidrojen ihracatı için Avrupa pazarına yönelirken, Körfez ve Orta Asya ülkeleriyle de enerji iş birliklerini artırmak istenilmektedir. Zira körfez ülkelerinin enerji dönüşümünde yatırımlarının yetersiz kalması halinde petrol arzının tam tersi bir sistemle Türkiye'nin hidrojen arz merkezi olarak körfez ülkeleri üzerindeki siyasi hakimiyetini güçlendirme fırsatı bulunmaktadır. Örneğin, yeşil hidrojen ve amonyak ticareti, bu stratejinin önemli parçalarından biri olarak görülmektedir.

¹⁴⁸ <https://www.irena.org/>

¹⁴⁹ Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefleri, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2021.

¹⁵⁰ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası", 2022

¹⁵¹ Marmara Kalkınma Ajansı, "Güney Marmara Hidrojen Vadisi Fizibilite Raporu", 2023.

¹⁵² Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "The Future of Hydrogen: Key Insights", 2023.

Türkiye'nin enerji ticaret yollarındaki merkezi rolü hem ekonomik büyümeyi hem de bölgesel iş birliklerini destekleyebilir.

Hidrojen altyapısının geliştirilmesi, Türkiye'nin enerji stratejisinin kritik bir bileşenidir. Türkiye, özellikle elektrolizör üretimi ve yerli teknoloji geliştirme konusunda önemli hedefler belirlemiştir. Hidrojenin depolanması ve taşınması için ileri teknolojiler, enerji güvenliğini artırmada anahtar rol oynayacaktır.¹⁵³

Türkiye'nin hidrojen enerjisi ile resmi tanışması, 02 Mayıs 2007 tarihli ve 26510 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Enerji Verimliliği Kanunu" ile gerçekleşmiştir. ¹⁵⁴Bu kanunda, hidrojen ve biyoyakıt gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının özendirilmesi ve kullanımının teşvik edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ancak Türkiye'nin ekonomik, sosyal ve kültürel kalkınmasını şekillendiren kalkınma planlarında, hidrojen enerjisi kapsamlı bir şekilde ele alınmamıştır. Yalnızca 9. ve 11. Kalkınma Planlarında hidrojen enerjisine değinilmiş ve bu planlarda hidrojenle ilgili bazı temel hedefler ve öngörüler belirtilmiştir.¹⁵⁵

4.6.7.8 Pilot Projeler ve Teknolojik Gelişim

Türkiye'nin hidrojen enerjisi alanındaki çabaları, çeşitli pilot projeler ve teknolojik girişimlerle hız kazanmıştır. Bu projeler, hem hidrojen üretim ve kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi hem de mevcut altyapının bu yeni enerji taşıyıcısına uygun hale getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Güney Marmara Hidrojen Vadisi Projesi, Türkiye'nin bu alandaki en kapsamlı girişimlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Proje, bölgede bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak yeşil hidrojen üretimini ve bu hidrojenin sanayi, ulaştırma ve enerji sektörlerinde kullanımını hedeflemektedir. Proje kapsamında, hidrojenin üretiminden depolanmasına ve dağıtımına kadar tüm değer zinciri ele alınmakta ve bu süreçte yerli teknoloji geliştirme çalışmaları önceliklendirilmektedir. Güney Marmara bölgesinin rüzgar ve güneş enerjisi potansiyeli, bu projeye enerji arzı açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, proje kapsamında hidrojen dolum istasyonları ve sanayiye yönelik hidrojen boru hattı entegrasyonu gibi altyapı çalışmaları da planlanmaktadır. Bu girişim, hem bölgesel ekonomik kalkınmayı desteklemekte hem de Türkiye'nin uluslararası hidrojen ekonomisindeki yerini güçlendirmeyi hedeflemektedir.

Güney Marmara Hidrojen Vadisi Projesi, yerel ve ulusal ölçekte çok sayıda paydaşın iş birliğiyle hayata geçirilmektedir. Projenin ana paydaşları arasında kamu kurumları, yerel yönetimler, özel sektör temsilcileri, üniversiteler ve araştırma merkezleri bulunmaktadır. Bu paydaşlar, yeşil hidrojen üretimi ve kullanımıyla ilgili çeşitli teşviklerden faydalanabilmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji yatırımlarına verilen teşvikler, Ar-Ge projelerine yönelik destek programları ve vergi muafiyetleri, proje kapsamında sağlanan avantajlar arasındadır. Ayrıca, uluslararası fonlardan yararlanma ve Avrupa Birliği destekli projelere entegrasyon imkânları da proje paydaşlarına sunulmaktadır.

Proje süresi toplamda 10 yıl olarak planlanmıştır. İlk 3 yıllık süreçte altyapı çalışmalarının tamamlanması, pilot uygulamaların hayata geçirilmesi ve teknolojik sistemlerin kurulumu hedeflenmektedir. Geri kalan 7 yıllık dönemde ise geniş ölçekli hidrojen üretimi, depolama ve dağıtım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi öngörülmektedir. Projede kullanılacak elektrolizörlerin toplam kapasitesi 2 GW olarak belirlenmiştir. Bu kapasite,

¹⁵³ Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), "Green Hydrogen Cost Reduction Outlook", 2023.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Enerji Stratejisi ve Hidrojen Raporu", 2022.

¹⁵⁴ Resmî Gazete, "Enerji Verimliliği Kanunu", 02 Mayıs 2007, Sayı: 26510.

¹⁵⁵ 9. ve 11. Kalkınma Planları, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2007 ve 2019.

bölgedeki yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile sağlanacak elektrik arzına dayanmaktadır. Elektrolizörlerin ilk etapta 500 MW kapasiteyle devreye alınması ve bu kapasitenin ilerleyen yıllarda kademeli olarak artırılması planlanmaktadır. Hidrojen üretim süreçleri, yerel teknolojilerin geliştirilmesi ve maliyetlerin optimize edilmesi amacıyla sürekli olarak izlenecek ve iyileştirilecektir.¹⁵⁶

Gazbir-Gazmer tarafından yürütülen test projeleri, hidrojenin mevcut doğal gaz altyapısına entegrasyonunu test etmek için tasarlanmıştır. Bu projelerde, hidrojen ve doğal gaz karışımının güvenli bir şekilde iletilmesi, dağıtılması ve kullanılması incelenmiştir. Testler, hidrojenin belirli oranlarda mevcut doğal gaz şebekesine karıştırılabileceğini ve bu karışımın hem evsel hem de sanayi tüketiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bu testler sayesinde, mevcut doğal gaz altyapısında hidrojenin neden olabileceği teknik zorluklar ve malzeme uyumluluğu gibi konular üzerinde de önemli veriler elde edilmiştir. Bu çalışmalar, gelecekteki hidrojen projeleri için rehber niteliğinde olup, Türkiye'nin enerji altyapısının dönüşümünde önemli bir adımı temsil etmektedir.¹⁵⁷

Ayrıca, Konya Karapınar ve Afyon Dinar bölgelerinde yürütülen hidrojen üretim projeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak yeşil hidrojen üretimini hedeflemektedir. Özellikle güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan bu bölgelerde, üretilen hidrojenin enerji depolama ve sanayi uygulamalarında kullanılması planlanmaktadır. Bu projeler, yerli teknolojilerin geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji ile entegre hidrojen üretimi için önemli pilot uygulamalar olarak dikkat çekmektedir.¹⁵⁸

Türkiye'nin hidrojen alanındaki pilot projeleri hem teknolojik bağımsızlığı sağlamak hem de karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmak açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu projeler, aynı zamanda hidrojen teknolojilerinin ticari ölçekte uygulanabilirliğini test etme ve ulusal hidrojen yol haritasının geliştirilmesine katkıda bulunma açısından kritik bir rol oynamaktadır.

4.6.7.9 Elektrolizör Üretimi ve Ar-Ge Çalışmaları

Türkiye, hidrojen enerjisinin yerli ve bağımsız üretimini teşvik etmek için elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesine özel önem vermektedir. Elektrolizör, suyu hidrojen ve oksijene ayırarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin yeşil hidrojen elde edilmesinde kullanılmasını sağlayan temel bir teknolojidir. Bu nedenle, elektrolizörlerin yerli üretimi, Türkiye'nin hidrojen ekonomisinde bağımsızlığını artırmak ve uluslararası rekabet gücünü yükseltmek için kritik bir stratejik önceliktir.

TENMAK, hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizör teknolojilerinin yerli olarak geliştirilmesi ve ticari ölçeğe ulaşması için araştırma ve geliştirme projelerine destek sağlamaktadır. Bu destekler arasında, prototip geliştirme, pilot tesis kurulumu ve sanayi-üniversite iş birliğine dayalı Ar-Ge projelerine finansman sağlanması bulunmaktadır. Ayrıca, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretiminde entegrasyonu ve bu süreçte kullanılacak yerli elektrolizörlerin kapasitesinin artırılmasını teşvik etmektedir. Bu kapsamda, yatırım teşvik programları, üretim tesisleri için düşük faizli krediler ve vergi muafiyetleri gibi mali destek mekanizmaları sunulmaktadır.

¹⁵⁶ Marmara Kalkınma Ajansı, "Güney Marmara Hidrojen Vadisi Fizibilite Raporu", 2023.

¹⁵⁷ GAZBİR-GAZMER, "Hidrojen ve Doğal Gaz Entegrasyonu Test Raporu", 2022.

¹⁵⁸ Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, "Sektörel Dönüşüm ve Hidrojen Kullanımı Raporu", 2023.

Türkiye’de elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetleri, hem yerli akademik kurumlar hem de özel sektör tarafından yürütülmektedir. TÜBİTAK, elektrolizörlerin daha verimli, düşük maliyetli ve uzun ömürlü olmasını hedefleyen projelere öncelik vermektedir. Özellikle, proton değişim membranı (PEM), alkalın ve katı oksit elektrolizör (SOE) gibi farklı elektrolizör türlerinin yerli imkanlarla üretilmesine yönelik çalışmalara yoğunlaşılmaktadır. Bu projeler, Türkiye’nin teknolojik bağımsızlığını sağlarken, üretim maliyetlerini düşürme ve uluslararası standartlara uygun ürünler geliştirme potansiyeli sunmaktadır.

Türkiye, yerli elektrolizör üretimi ile maliyet avantajı elde etmeyi ve dışa bağımlılığı azaltmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, organize sanayi bölgelerinde yenilikçi üretim tesislerinin kurulumu ve mevcut üretim altyapısının modernizasyonu teşvik edilmektedir. Ayrıca, uluslararası iş birlikleri yoluyla teknoloji transferine olanak tanınmakta ve Türkiye’de üretilen elektrolizörlerin hem iç piyasada hem de ihracatta rekabetçi hale getirilmesi hedeflenmektedir.¹⁵⁹

Avrupa Birliği’nin Clean Hydrogen Partnership ve Horizon Europe gibi programları, Türkiye’nin yerli elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik uluslararası finansman kaynaklarına erişimini artırmaktadır. Ayrıca, Avrupa pazarında artan yeşil hidrojen talebi, Türkiye’nin yerli ürettiği elektrolizörleri ihraç ederek ekonomiye katkı sağlaması için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Türkiye, bu teşvikler ve yerli üretim kapasitesinin artırılmasıyla, hidrojen teknolojilerinde bir üretim üssü haline gelmeyi ve bu alandaki rekabetçi konumunu güçlendirmeyi hedeflemektedir.

4.6.7.10 Ulusal ve Uluslararası Finansman Modelleri

Türkiye, yeşil hidrojen projelerini desteklemek amacıyla uluslararası hidrojen teşvik kredi ve hibelerine erişimi artırmaya yönelik adımlar atmaktadır. Özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde oluşturulan Hidrojen Bankası, düşük karbonlu ve yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretim projeleri için önemli bir finansman kaynağı sunmaktadır. Hidrojen Bankası’nın yanı sıra, Avrupa Yatırım Bankası (EIB), Dünya Bankası, Yeşil İklim Fonu (GCF) ve Küresel Çevre Fonu (GEF) gibi uluslararası finans kuruluşları, sürdürülebilir enerji projelerine yönelik hibeler ve düşük faizli kredi imkanları sağlamaktadır.¹⁶⁰

Bu mekanizmalar kapsamında, Türkiye’nin yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılmasına ve bu kapasitenin elektrolizör teknolojileri ile birleştirilerek yeşil hidrojen üretimine yönlendirilmesine yönelik projeler öncelik taşımaktadır. Ayrıca, Horizon Europe ve Clean Hydrogen Partnership gibi Avrupa Birliği programları, hidrojen üretimi, depolaması ve taşınması alanındaki Ar-Ge faaliyetlerini destekleyerek Türkiye’nin bu alandaki teknolojik altyapısını güçlendirme potansiyeli taşımaktadır.

Türkiye’nin jeopolitik konumu ve yenilenebilir enerji potansiyeli, bu uluslararası teşviklerden faydalanma açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Güneydoğu Avrupa ve Orta Doğu arasındaki enerji geçiş noktası olması, Türkiye’yi yeşil hidrojen ihracatı için stratejik bir merkez haline getirme fırsatı yaratmaktadır. Özellikle Avrupa ülkelerinin artan yeşil hidrojen talebi göz önüne alındığında, Türkiye’nin bu talebi karşılamak üzere geliştirilecek projeler için uluslararası finansman kuruluşlarından destek alma şansı yüksektir.

¹⁵⁹ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Enerji Stratejisi ve Hidrojen Raporu", 2022.

¹⁶⁰ Avrupa Komisyonu, Horizon Europe ve Clean Hydrogen Partnership Programları, 2023

Uluslararası teşvik mekanizmalarına erişim, sadece finansman sağlamanın ötesinde, Türkiye'nin hidrojen altyapısını geliştirme, yenilikçi teknolojilere yatırım yapma ve uluslararası standartlara uyum sağlama süreçlerini hızlandıracaktır. Bu doğrultuda, kamu-özel sektör iş birliği modelinin benimsenmesi hem yerli hem de yabancı yatırımcıları çekmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye, uluslararası teşvik ve fonlardan elde edilecek kaynaklarla hidrojen projelerini hayata geçirerek hem enerji arz güvenliğini artırmayı hem de küresel iklim hedeflerine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Türkiye'de yenilenebilir elektrik maliyetleri giderek düşmektedir. Örneğin, 2019 yılında kara rüzgarı için yapılan YEKA ihalelerinde kWh başına yaklaşık 4 ABD\$ sent fiyat elde edilmiştir. Karbon politikalarının uygulanması, yeşil hidrojen üretimini fosil yakıt tabanlı üretim yöntemlerine göre daha rekabetçi hale getirebilir. Özellikle Avrupa Birliği'nin planladığı sınır karbon düzenlemeleri, AB'ye ihracat yapan ülkelerde düşük karbonlu üretim yapılmasını teşvik edecektir. Türkiye'nin ihracatının yarısından fazlasını AB'ye yapması, imalat sanayisinin yeşil hidrojen gibi düşük karbonlu alternatiflerle karbon ayak izini azaltmasını zorunlu hale getirmektedir.¹⁶¹

Yeşil hidrojen kullanımı sektörel zorluklar da barındırmaktadır. Gaz şebekesine hidrojen karıştırmak, %10-15 seviyesine kadar teknik olarak mümkündür ancak daha yüksek seviyeler için ek yatırımlar ve Ar-Ge gerekli olacağı tahmin edilmektedir. Doğal gaz karışımındaki hidrojen oranı arttıkça, taşınması gereken gaz hacmi de artacaktır ve bu hacim de yeni altyapı yatırım ihtiyaçlarını beraberinde getirecektir. Gaz-hidrojen karışımları için güvenli ve etkili bir şebeke oluşturulması malzeme seçiminden nakil mesafesine kadar çeşitli özel önlemler de maliyet unsurunun bir diğer parçasını oluşturmaktadır.

Türkiye imalat sanayisinde hidrojen bazlı ürünlerin entegrasyonu, tedarik zincirini iyi anlamayı ve sektör yapısına uyum sağlama zorunluluğunu barındırmaktadır. Fosil yakıtların yeşil hidrojen bazlı sentetik yakıtlarla ikame edilmesi, mevcut endüstriyel süreçlerin büyük değişiklik gerektirmemesi nedeniyle nispeten daha kolay bir değişim görülmektedir. Ancak demir-çelik endüstrisi gibi sektörlerde yeşil hidrojen bazlı çelik üretimine geçiş, lojistik ve altyapıda önemli değişiklikler gerektirebilir. Türkiye'de yeşil hidrojen üretiminin gelişimi, ekonomik sistemin karbon ayak izini azaltacak ve AB ile ticari ilişkileri sürdürecektir adımlar arasında kritik bir yere sahiptir.

4.6.7.11 Hidrojen Üretimi

2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketimi 146 Mtep seviyesine ulaşmış, toplam birincil enerji arzı ise 175,4 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Bu tüketimde sanayi sektörü ilk sırada yer alırken, imalat sanayi tüketimin üçte birini oluşturmaktadır. Ayrıca, fosil yakıt hammaddelerinin doğrudan enerji üretimi yerine endüstriyel hammadde olarak kullanılması "enerji dışı tüketim" kategorisinde değerlendirilmektedir. Sanayi sektörüne bu enerji dışı tüketim oranının %6,5'i eklendiğinde, sanayi sektörü toplam nihai enerji talebinin yaklaşık %38'ine ulaşmaktadır. Sanayi sektörünü %27'lik enerji talebiyle binalar ve ardından petrol kaynaklı enerji kullanımında başı çeken ulaşım sektörü izlemektedir.

Türkiye'nin toplam nihai enerji arzına bakıldığında arzın %28'i ham petrol ve türevlerinden, %26'sı taş kömürü ve linyit, %30'u ise doğalgazdan sağlanmaktadır. Bu kaynakların büyük çoğunluğu (neredeyse tüm taş kömürü ve doğalgaz ile ham petrolün %90'ı) ithal edilmektedir; bu da Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarında dışa bağımlı bir ülke olduğunu göstermektedir. 2023 yılında Türkiye'de 331 TWh elektrik üretilmiş olup, bu üretimin %30'u doğalgaz, %31'i kömür, %20'si hidrolik ve %19'u yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Yenilenebilir kaynaklar arasında en büyük paya sahip olan rüzgar enerjisi %11 oranında katkı sağlamakta, ardından güneş enerjisi gelmektedir.¹⁶²

¹⁶¹ Dünya Bankası, Hydrogen Investment Framework, 2023.

¹⁶² Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye'nin Enerji İstatistikleri Raporu, 2023.

Türkiye’de artan nüfus, kentleşme oranının %93,5’e ulaşması (2023 itibarıyla) ve teknolojik gelişmeler ülkenin enerji bağımlılığını artırmaktadır. Türkiye, enerji ihtiyacının yaklaşık %80’ini ithal eden bir ülke olduğundan, fosil yakıt ithalatına harcanan yüksek maliyet bütçeye yük getirmekte ve cari açığın artmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağını oluşturduğundan, Türkiye’nin gelişmekte olan bir ülke olarak emisyonlara katkısı da büyümektedir. Enerji ihtiyacındaki artış, fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte tükenme riski ile birleşince, bilim insanları yeni ve yerli enerji kaynaklarına yönelmeye başlamıştır. Bu bağlamda, güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır.

Türkiye’nin enerji talebinin %31’i petrolden, %28’i doğalgazdan, %26’sı kömürden ve %15’i yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır. Türkiye, enerjisinin %70’ten fazlasını ithal eden bir ülke konumundadır. Öte yandan, Tüpraş gibi bazı tesisler doğalgaz ve kömür kullanarak fuel oil dönüşüm tesislerinde yerli hidrojen üretimi gerçekleştirmekte olup saatte 160 bin m³ kapasiteye sahiptir. Türkiye’de hidrojen ve ilgili teknolojiler konusunda dünyadaki gelişmeler takip edilmekte, bu alanda etkileyici çalışmalar yapılmaktadır. 1990’lı yılların başında hidrojen konusundaki çalışmalar yavaş yavaş artış göstermiş, 2000’li yılların başında ise büyük bir ivme kazanmıştır. Bu ilgi artışı, hidrojen üzerine yapılan araştırma sayılarının artmasıyla gözlemlenmekte olup, Türk Patent Enstitüsü verilerine göre hidrojenle ilgili toplam 131 patent alınmıştır.¹⁶³Türkiye’de hidrojen üzerine bugüne kadar toplamda 982 yüksek lisans ve doktora derecesi tamamlanmış olup, özellikle 2010’dan sonra doktora çalışmaları yoğunlaşmıştır. Akademik çıktıların sanayi projelerine dönüştürülmesi hem sayısal hem de niteliksel katkılar sağlayarak hidrojene olan ilgiyi artıracaktır.¹⁶⁴

Karbon çağının sona yaklaşması ve COVID-19 salgınının bu süreci hızlandırmasıyla hidrojen, hidrokarbon bazlı yakıtların yerini alma sürecine girmiştir. Geleneksel enerji kaynaklarının tükenmesiyle kendine yeten, sürdürülebilir enerji sistemlerine olan ilgi artmaktadır. Yüksek yenilenebilir enerji potansiyeline sahip Türkiye, hidrojen üretimini yeşil enerji kaynaklarından karşılayarak enerji taşıyıcısı olarak kullanabilme fırsatına sahiptir. Bu durum, Türkiye’nin küresel ölçekte büyük bir ekonomik güç haline gelmesini sağlayabilecektir. Uluslararası rekabet gücünü artırmak adına Türkiye’de hidrojen çiftliklerinin kurulması önem taşımaktadır. Dünya genelinde hidrojen üretiminde yenilenebilir kaynakların payı hızla artarken, Türkiye’de bu oranın artırılması amacıyla yerli kaynakların kullanımı teşvik edilmelidir. Ülke içerisinde üretilen yerli yeşil hidrojen, elektrik ihtiyacını karşılayabileceği gibi, enerji arz fazlasının ihracıyla da ekonomiye katkı sağlayabilecektir.

SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi’nin Türkiye’nin yeşil hidrojen arz potansiyeline dair öngörülerini içeren çalışmasına göre, Türkiye’de yeşil hidrojen arzı, çeşitli senaryolarla farklı kapasite ve üretim modelleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda üç ana senaryo, gelecekteki yeşil hidrojen üretim potansiyelini ortaya koymak için oluşturulmuştur:

1. Dağıtık Senaryo 1/A

Senaryo Tanımı: Dağıtık Senaryo 1/A, Türkiye’de il bazında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen arz fazlasının yeşil hidrojen üretiminde değerlendirilmesini amaçlar. Her ilin sahip olduğu güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji, o bölge içinde tüketilmezse, bu arz fazlası yeşil hidrojen üretimine tahsis edilecektir.

Öngörülen Kapasite ve Gereksinimler: Bu senaryoya göre, 2050 yılı itibarıyla yıllık 0,64 milyon ton yeşil hidrojen üretimi mümkün görülmektedir. Bunun gerçekleşmesi için, Türkiye genelinde toplam 6,6 GW elektrolizör

¹⁶³ TÜBİTAK, Türkiye’de Hidrojen ve İlgili Teknoloji Çalışmaları, 2023.

¹⁶⁴ Prof. Dr. İbrahim Dinçer, Prof. Dr. İnci Eroğlu, ve Merve Öztürk, Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, 2021.

kapasitesinin kurulması gerekecektir. Bu dağıtık üretim yapısı, yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar ve her ilde yerel düzeyde ekonomik katkı sağlayabilir.

2. Dağıtık Senaryo 1/B

Senaryo Tanımı: Dağıtık Senaryo 1/B, güneş ve rüzgar enerjisinin teknik potansiyellerinin il bazında daha geniş bir kapasite ile kullanılması üzerine kuruludur. Bu senaryoda, Dağıtık Senaryo 1/A'ya ek olarak daha yüksek düzeyde bir yenilenebilir enerji kapasitesi tahsis edilmekte ve bu da daha büyük bir yeşil hidrojen üretim potansiyeli oluşturmaktadır.

Öngörülen Kapasite ve Gereksinimler: 2050 yılı itibarıyla, bu senaryo ile yılda ek olarak 2,8 milyon ton yeşil hidrojen üretimi sağlanabilir. Dağıtık Senaryo 1/A ile birleştirildiğinde, toplamda yıllık 3,4 milyon ton yeşil hidrojen üretimi öngörülmektedir. Bu üretim kapasitesine ulaşmak için, Türkiye genelinde 28,7 GW seviyesinde ek bir elektrolizör kapasitesinin kurulması gerekmektedir. Bu genişletilmiş senaryo, il düzeyinde teknik potansiyelin daha etkin kullanımı sayesinde ihracat potansiyelini de artırmaktadır.

3. Merkezi Senaryo 2

Senaryo Tanımı: Merkezi Senaryo 2, Türkiye genelinde üretilen yenilenebilir enerji arz fazlasının altı ana merkeze aktararak buralarda büyük ölçekli hidrojen üretimi yapılmasını öngörür. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik bu ana merkezlere iletilir ve burada yeşil hidrojen üretimi merkezi bir yapıda gerçekleştirilir.

Öngörülen Kapasite ve Gereksinimler: Bu senaryo, 2050 yılına kadar 3,4 milyon ton yıllık yeşil hidrojen üretim kapasitesine ulaşmayı hedeflemektedir. Bu üretim kapasitesini desteklemek için ek elektrik iletim yatırımlarına ve altyapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu merkezi yapı, hidrojen ihracatını desteklemek için güçlü bir lojistik ve altyapı kurulmasına da olanak tanıyacak, bu da Türkiye'nin bölgesel bir hidrojen üretim ve ticaret merkezi olmasını kolaylaştıracaktır.¹⁶⁵

4.6.7.11.4 Off-Grid

Özellikle güneş veya rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen küçük ölçekli, dağıtık hidrojen üretimi, enerji kullanım noktasına yakın üretilen yeşil hidrojen sayesinde popülerlik kazanmaktadır. Bu model, taşıma masraflarını ve hidrojen nakliyesiyle ilgili zorlukları en aza indirerek taşımacılık ve lokal enerji ihtiyaçları gibi alanlarda büyük avantaj sunmaktadır. Dağıtık üretim modelleri, uzak veya şebeke dışı bölgelerde bile yerel talebe uygun üretim esnekliği sağlarken daha küçük, uygun maliyetli elektroliz ünitelerinin kullanılmasına olanak tanır.

Örneğin, İsveç'teki bir çalışmada, tarım sektörü için rüzgar enerjisine dayalı hidrojen üretimi incelenmiş ve bu sistemin hem yakıt maliyetlerini düşürmek hem de karbon salımını azaltmak için etkili olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, taşınabilir hidrojen üretim tesislerinin kullanılmasıyla enerji arzı güvenliğinin artacağı ve kırsal alanlarda sürdürülebilirliğe katkıda bulunacağı vurgulanmaktadır.

Dağıtık üretimi, taşımacılık maliyetlerini düşürüp enerji kullanım noktasında üretilmesi sayesinde esneklik ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Özellikle kırsal alanlarda yerel talebi karşılamak için küçük ve uygun maliyetli elektrolizörler kullanarak, enerji bağımlılığını azaltma ve yenilenebilir kaynaklardan yararlanma potansiyeli bulunmaktadır. Bu konudaki araştırmalar, uzak bölgelerdeki lokal enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için dağıtık hidrojen üretiminin önemli bir seçenek olabileceğini ortaya koymaktadır.

¹⁶⁵ SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi, Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Potansiyeli Çalışması, 2023.

Elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi için ortak payda şebeke adı verilen elektriğin iletildiği, farklı işlemlerin uygulandığı, dağıtıldığı sisteme ihtiyaç bulunmaktadır. Güncel hayatta elektrik şebekelerinin çeşitleri ile birlikte tüm dünyada var olması tüm elektrikle ilgili faaliyetlerin şebekeye bağlı olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede anlık olarak elektrik üretim ile tüketim faaliyetleri gerçekleştirilebilmektedir. Tüm gelişmelere rağmen şebekenin mevcut olmadığı veya şebeke yatırımlarının yetersiz kaldığı bölgeler de mevcuttur. Bu bölgelerde hane halkları elektrik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla farklı kaynaklara başvurmaktadırlar. Kaynaklardan temiz enerjiyi de destekler nitelikte olanı ise güneş veya rüzgâr kaynakları kullanarak şebekeden bağımsız elektrik üretimi bu elektriğin aküler aracılığıyla depolanması ve kullanılmasıdır. Off-grid olarak adlandırılan bir üretim sistemi günümüzde hanelerin ihtiyacını karşılamak, küçük çaplı sanayi ihtiyaçları, tarım amaçlı faaliyetlerde kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili kaynak olması, şebeke üzerinde baz yük olmamaları nedeniyle dengesizliğe neden olmaları, şebeke yatırımlarının yetersiz olmasıyla birlikte kapasitelerin yatırımları karşılayamaması gibi nedenler enerji yatırımlarının beklenen seviyelere ulaşmamasına neden olmaktadır. 2050 Net Sıfır Emisyon hedefine ulaşılmasında elektrifikasyonun dönüşümü göz önüne alındığında enerji piyasasında yatırım ve hedef dilemmasının ortadan kaldırılması için yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. Depolama üniteleri ile birleşik güneş ve rüzgara dayalı elektrik üretim tesislerinin kurulması, toplayıcılık lisansının görüşe açılması, şebekenin hızlı ve etkin yönetimine dair çalışmalar artış göstermektedir. Bununla birlikte şebekeden bağımsız üretimin yapılması ve üretilen elektriğin iletimi yerine yeşil hidrojen üretiminde elektrolizde ham madde olarak kullanılması enerji dönüşüm politikasına yenilikçi bir çözüm olarak gündeme gelmiştir.

Off-grid sistemde üretilecek elektriğin aynı yerde yeşil hidrojen elektrolizörü beslemek için kullanılması yenilenebilir enerji kaynaklarının kesinti sorununu ortadan kaldıracaktır. Zira yenilenebilir enerji kaynaklarından ikincil bir enerji kaynağı olan yeşil hidrojen meydana gelecektir. Karbondan arındırılmış bu ürün gerek yakıt pili ile tekrardan elektriğe dönüşebilecek gerekse dekarbonizasyon hedefi olan sanayi sektörlerinin kullanımına sunulabilecektir. Şebekede aktif bir elektrik veriş ve çekiş eyleminin bulunmadığı denklemde baz yük sorunu da ortadan kalkabilecektir. Şebekeye aktif bir elektrik akışının olmaması baz yük santrallerinin dengeleme ve güç piyasasındaki yük alma ve yük atma görevlerini azaltacaktır. Rüzgârda mevsimsel bazda güneşte de saatlik bazda elektrik üretiminin gerçekleşmemesinin arz-talep dengesini olumsuz olarak etkilemesini de şebekeden bağımsız kurulumlarda piyasaya elektriğin arz edilmemesi ile giderilme şansı bulunmaktadır. Herhangi bir şebeke yatırımına ve kapasiteye ihtiyacın olmaması da şebeke yatırımlarından kaynaklanan maliyetleri azaltacaktır.

4.6.7.12 HİDROJENE İLİŞKİN HUKUKİ DÜZENLEMELER

Hidrojen, küresel temiz enerji devrimine geçişi hızlandıracak bir aktör olarak dünya çapında kabul edilen bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen, ülkelerin net sıfır karbon emisyonu hedefleri, enerji arzının tamamen yenilenebilir enerjilerden karşılanması taleplerini, ulusal ve uluslararası pazarının oluşturularak ticarileştirme amaçlarını karşılayabilecek potansiyelde olduğu su götürmez bir gerçektir. Yukarıda bahsedildiği üzere; hidrojen toplumsal ve ekonomik gelişmelerin doğal bir sonucu, bir değişim olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu doğrultuda yasal otoritelerin öncelikli olarak belirlenmiş olan hidrojen stratejileri kapsamında hidrojenin kullanım alanlarının belirlenerek, sürecin hızlandırılması, güvenli bir şekilde yürütülmesi için yasama faaliyetlerine başlaması gerekecektir.

4.6.7.12.4 Avrupa Birliği

Avrupa Birliği'nde yasama faaliyetlerinin öncüsü; enerji arzı güvenliği, enerji pazarının oluşturulması, enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilir karbonsuz ekonomi, rekabetçi enerji sektörü gibi hedeflerin yerine getirilmesi için 30 Kasım 2016'da açıklanan "Tüm Avrupalılar İçin Temiz Enerji Paketi"dir. Açıklanan bu paket ile birlikte yukarıda anılan hedefler ve Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütlerin yerine getirilmesi için mevcut direktifler üzerinde gerekli yasal değişikliklerin 2019 yılına kadar tamamlanması planlanmıştır. Paket kapsamında 8 farklı yasal düzenleme getirilmesi amaçlanmıştır.

Kabul edilecek mevzuatlar, Avrupa Birliği'nin küresel ısınmayla mücadelede uzun vadeli stratejilere hukuki açıdan güvenilirlik sağlayacaktır. Paket kapsamındaki yasama süreçleri ise 22 Mayıs 2019 tarihinde tamamlanmıştır.

19.06.2018 tarihli Avrupa Birliği Resmi Gazetesi'nde yayınlanan AB 2018/844 sayılı Direktif ile birlikte binaların enerji performansına ilişkin direktif (2010/31/AB) ve enerji verimliliğine ilişkin direktiflerde (2012/27/AB) değişiklik yapılmıştır. Değişikliğin amacı 2050 yılına kadar sürdürülebilir, rekabetçi, güvenli ve karbondan arındırılmış bir enerji sistemine geçişin hızlandırılmasıdır. Bu doğrultuda Birlik 'teki karbon emisyonlarının yaklaşık %36'sından sorumlu olan binaların karbondan arındırılması için gerekli usul ve esaslar belirlenmiştir. Komisyon tarafından gerçekleştirilen değerlendirmeye göre binalarda yıllık ortalama %3 oranında yenileme gerekmektedir. Enerji tasarrufundaki her bir %1'lik artış gaz ithalatını %2,6 oranında azaltıldığı da göz önüne alındığında , mevcut binaların yenilenmesi büyük önem taşımaktadır.¹⁶⁶

21.12.2018 tarihli Avrupa Birliği Resmi Gazetesi'nde yayınlanan AB 2018/2001 sayılı Yenilenebilir Enerji Direktifi, 2023 yılında gerçekleştirilen revize ile birlikte AB 2023/2413 sayılı Direktif yürürlüğe konulmuştur. İlgili direktif ile birlikte REPowerEU planı da gözetilerek hazırlanmıştır. Direktif'te, AB Hidrojen Stratejisi ile birlikte yenilenebilir hidrojen üretim tesislerinin, net sıfır komisyon hedeflerinde büyük rolünden bahsedilmiştir. Üretilen hidrojenin, diğer enerji ağları da dahil olmak üzere gaz şebekesi ağları ile işbirliği, enerji taşıyıcıları ile entegrasyonunun sağlanması için geliştirme faaliyetleri için inovasyon fonu ayrıldığı ve Birlik üyesi ülkelerin projelerini geliştirdikleri de ifade edilmiştir. Yeşil hidrojenin, biyolojik olmayan yenilenebilir yakıtların endüstride, kimyasal süreçlerde, deniz ve hava taşımacılığında yakıt olarak kullanılabileceği ifadelerine yer verilmiştir. Hidrojen Stratejisi ile birlikte, hidrojenin ticarileştirilmesi için gerekli kriterlerin belirlendiği öncü bir yasanın da zorunlu olduğu ifade edilmiştir.

Temiz enerji paketi kapsamında, Birlik 'in ve iklim eylemlerinin yönetişimine ilişkin AB 2018/1999 sayılı Direktif ile birlikte Birlik üyelerinin 2030 hedeflerine ulaşabilmeleri için birlikte, müşterek bir şekilde faaliyet yürütmelerini sağlayan şeffaf bir yönetim sisteminin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda Birlik üyesi

¹⁶⁶ Tüzüğün 6. paragrafı: "The Union is committed to developing a sustainable, competitive, secure and decarbonised energy system by 2050. To meet that goal, Member States and investors need measures that aim to reach the long-term greenhouse gas emission goal and that decarbonise the building stock, which is responsible for approximately 36 % of all CO2 emissions in the Union, by 2050. Member States should seek a cost-efficient equilibrium between decarbonising energy supplies and reducing final energy consumption"

Tüzüğün 10. paragrafı: "According to the Commission's impact assessment, renovation would be needed at an average rate of 3 % annually to accomplish the Union's energy efficiency ambitions in a cost-effective manner. Considering that every 1 % increase in energy savings reduces gas imports by 2,6 %, clear ambitions for renovation of the existing building stock are of great importance."

devletlerle 2021-2030 yılları arasında, hedeflerine nasıl ulaşacaklarının ana hatlarıyla ortaya koyulması için Ulusal Enerji ve Strateji İklim Planı (NECP) hazırlamaya davet edilmiştir. 11 Aralık 2019 tarihinde Avrupa kıtasının net sıfır karbona ulaşabilmesi için AB'nin yeni enerji büyüme stratejisi olarak Avrupa Yeşil Mutabakatı açıklanmıştır. Ardından üye devletler Hidrojen Stratejisi, Yenileme Dalgası Stratejisi, Metan Stratejisi, Enerji Sistemlerinin Entegrasyonu Stratejisi gibi hedefler kabul edilmiştir.¹⁶⁷

Akabinde 07.09.2021 tarihli Avrupa Birliği Resmi Gazetesi'nde yayınlanan 2021/1119 sayılı Yönetmeliği ile birlikte Avrupa Birliği'nde belirlenmiş hedeflere ulaşılmasında bir dizi düzenlemenin önü açılmıştır. Ayrıca Yönetmelik'te iklim nötr hedefleri doğrultusunda, endüstriyel işbirliğini destekleyen Avrupa Temiz Hidrojen İttifakı gibi projelerin tamamlanacağı ifade edilmiştir. Akabinde Fit for 55 mevzuat önerileri paketi kabul edilmiştir. 55'e uyum paketi kapsamında yukarıda anılan direktiflerde, Enerji Vergilendirme, Gaz Direktifleri'nde revizyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Rus-Ukrayna savaşının, enerji güvenliğine, küresel enerji piyasalarına etkisiyle birlikte Avrupa Komisyonu tarafından REPowerEU planı yayınlanmıştır. Planda ayrıca yenilenebilir hidrojenin yaygınlaştırılması, rüzgar ve rüzgar enerjisi projelerinin piyasaya sürülmesi, hidrojene ilişkin modern yasal çerçevenin oluşturulması gibi tedbirler de yer almaktadır.

AB konseyi tarafından hidrojen ve doğal gaz için bir ortak iç pazar kurallarını belirleyen, halihazırda bulunan AB doğal gaz mevzuatını yeniden düzenleyen hidrojen ve karbondan arındırılmış gaz paketi kapsamında; 15.07.2024 tarihli Avrupa Birliği Resmi Gazetesi'nde yayınlanan 2024/1788 sayılı Direktif ile 2024/1789 sayılı Tüzük kabul edilmiştir. Yasal çerçeveler ile birlikte doğal gaz piyasasının organizasyon kurallarını revize edilirken, gelecekte kurulacak hidrojen pazarı için uyum kuralları getirilmiştir. Tüzük, yayımlandıktan 6 ay sonra yürürlüğe girecektir, üye devletlere ise ulusal mevzuatlarını, getirilen düzenlemeler çerçevesinde revize etmeleri için 2 yıllık süre tanınmıştır.

Tüzüğe göre Gaz ve hidrojen ağı operatörleri, 10 yıllık bir AB ağ geliştirme planı hazırlayacaktır. Ayrıca hidrojen pazarı için beş yıllık bir süreyle gönüllü bir mekanizma kurulması öngörülmektedir. Düzenlemeler ile birlikte doğal gaz ve hidrojene yönelik iç pazarların işleyişine yönelik usul ve esasların belirlenmesi, doğal gaz ve hidrojen ağlarına katılım gösterecek piyasa katılımcılar için eşitlikçi kuralların belirlenmesi gerekecektir. Tüzüğe göre özellikle hidrojen üretimi, dağıtım, iletimi, ticareti gibi konularda, idari izin süreçleri bakımından kapsayıcı kurallar getirilmesi gerekecektir. Yine üretilecek olan hidrojenin taşınması gerektiği kriterler, saflık parametreleri, kalite sınırlarının belirlenmesi gerekecektir.

4.6.7.12.5 Amerika Birleşik Devletleri

Amerika'da enerji politikasına göre önem teşkil eden temelde 2 yasa mevcuttur. Bunlardan ilki Kasım 2021'de yasalaştırılan, Infrastructure and Jobs Act (H.R. 3684)'tir. Bu yasa ile birlikte; ulaştırma, altyapı, şebeke güvenilirliği, elektrikli sarj üniteleri, temiz enerji gibi konularda ayrılacak fonlar için yetkilendirmeler gerçekleştirilmiştir. Anılan yasanın "Division D-Energy" bölümünde mevcut enerji altyapısının, iletim ve dağıtım hatalarının, yenilenebilir enerji kaynaklarına göre inşasını kolaylaştırmak, eyaletlere göre enerji güvenliği planlama ve stratejilerin oluşturulması, elektrikli araç bataryaları projeleri, enerji sektöründe siber güvenlik uygulama ve teknolojilerini geliştirmek amacıyla teşvikler sağlanacağı düzenlenmiştir.

Bölümün ikinci başlığında ise; kritik mineraller, batarya malzemeleri, temiz enerji teknolojilerinin geliştirilmesi, tedarik zincirlerinin sağlanması amacıyla teşvikler sağlanacağı ifade edilmiştir. Bölümün üçüncü

¹⁶⁷ <https://www.ab.gov.tr/p.php?e=80> Fasıl 15: Enerji.

başlığında da CCS teknolojileri için gerekli altyapı ve teknolojilerin destekleneceği belirtilmiştir. Buna göre temiz enerji kaynaklarından olan hidrojen üretiminin araştırılması, geliştirilmesi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi ve depolanması için ihtiyaç duyulan fonlar sağlanacaktır. Yine, eyaletlerde bulunan terk edilmiş petrol ve gaz kuyularının kapatılarak, iyileştirilmesi, mümkün olması halinde yeniden depolama alanında kullanılması için gerekli teşviklerin 2022 yılına kadar uzatılacağı düzenlenmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri tarafından, hidrojen alanında yapılacak yatırımlara politika desteği H.R. 3684 yasa ve özellikle 2022 yılında yayınlanan "Inflation Reduction Act" ile birlikte büyük ivme kazanmıştır. IRA ile birlikte hidrojen de dahil olmak üzere çeşitli temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını hızlandırmak için çeşitli teşvikler içermektedir. Hidrojen üretiminde öne çıkan teşvik, Ocak 2033'ten önce hizmete giren ve yeşil hidrojen üreten projeler için 10 yıllık süreyle vergi kredisidir. Vergi kredisinin miktarı ise üretilen hidrojenin kilogram başına 0,12-0,6 dolar arasında değişmektedir. Buna ek olarak, hidrojen üretiminin karbon yoğunluğunun değerlendirilmesine yönelik metodolojinin somut detayları (konusunda da belirsizlik bulunmaktadır. Bu konuların da önümüzdeki aylarda ABD Enerji Bakanlığı tarafından açıklığa kavuşturulması beklenmektedir. Sübvansiyonların uygulanması ve karbon yoğunluğu hesaplama metodolojisine ilişkin netlik, geliştiricilerin kesin yatırım kararları almak için ihtiyaç duyulan öngörülebilirliği sağlayacaktır. Yasa, çelik, demir ve üretilmiş projeler için yerli içerik gereksinimlerini karşılayan tesisler için bonus kredi tutarlarına izin verir.¹⁶⁸

4.6.7.12.6 Diğer Yasama Faaliyetleri ve Türkiye

Belçika, hidrojen taşıma ağına ilişkin olarak dünyada türünün ilk örneği olan ve Ağustos 2023'te yürürlüğe giren öncü bir yasayı kabul etmiştir. Bu yasa ile birlikte hidrojen iletim ağlarının düzenlenmesi, hidrojen iletim işletmecisi için gerekli kriterlerin belirlenmesi, işletmeciye stratejik planlama, hidrojen kalitesine yönelik çalışmaları başlatması, sisteme bağlantı stratejilerinin belirlenmesi gibi yetkiler tanınmıştır. Danimarka Mayıs 2023'te, ülke içerisinde kurulması planlanan hidrojen iletim ağlarının sahibi ve işletmecisi olarak Energinet ve Erida'yı seçmiştir.

Mayıs 2023'te Almanya Federal Hükümeti, 2032 yılına kadar faaliyete geçmesi planlanan hidrojen iletim sistemi için yasal çerçeveyi oluşturmak üzere yasa tasarısı kabul edilmiştir.

Uluslararası alanda hidrojene yönelik mevzuat çalışmaları temelde iki farklı politika ile oluşturulmuştur. Bunların arasında ABD, Çin Halk Cumhuriyeti gibi ülkeler, hidrojen üretimi, iletimi, dağıtımı gibi konularda yapılacak yatırımlarda, kamu desteği için fon ayırmaya yönelik kurallar tesis ettiği görülmektedir.¹⁶⁹

Bunun yanı sıra Avrupa Birliği'nde gerçekleştirilen mevzuat çalışmalarında; hidrojenin üretimi için standartların oluşturulması, hidrojenin taşınmasına yönelik piyasa katılımcılarının rollerinin belirlenmesi, hidrojenin taşınmasında altyapının oluşturulması, hidrojenin iletimi ve dağıtımını düzenleyecek düzenleyici kurumların oluşturulması yönünde kodifikasyon çalışmaları mevcuttur.

Ülkelerin hidrojen politikalarına göre, gerçekleştirdiği mevzuat çalışmaları da değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla ülkelere; mevcut ekonomik, teknolojik yeterlilik, mevcut projelerin durumu gibi hususlar değerlendirilerek bir hidrojen politikasının belirlenmesi ve belirlenmiş olan bu politikaya yönelik hukuki altyapının oluşturulması gerekmektedir.

¹⁶⁸ ABD Enerji Bakanlığı (DOE), "Inflation Reduction Act: Clean Hydrogen Production Tax Credit," 2022

¹⁶⁹ IEA, 2023, Global Hydrogen Review

Her halde gerçekleşmiş olan değişikliklere yönelik ayrı bir mevzuatın oluşturulması gerekmemektedir. Kanunlaştırma faaliyetinde bulunacak olan kişilerin, ilk olarak mevcut hukuki düzenlemelerin değerlendirilerek, hidrojen sektörünün entegre edilebileceği kanunlar, yönetmeliklerde değişiklikler de yapılabilecektir.

Türkiye’de hidrojenin üretimine, iletimine, dağıtımına, tedarikine yönelik bir yasal düzenleme mevcut değildir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası’nda; mevzuat çalışmalarına yönelik olarak, Türkiye’de yürürlükte bulunan mevzuatın, hidrojen açısından uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi gerektiğine değinilmiştir. Dolayısıyla, enerji taşıyıcısı olarak kabul edilen hidrojenin, mevcut enerji piyasası mevzuatı ile doğal ilişkisi gündeme gelebilmektedir.¹⁷⁰

Türkiye Hidrojen Stratejisine göre; mevcut mevzuatın gözden geçirilmesi, hidrojenin üretim, taşıma, depolama ve kullanım için uygun hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Dolayısıyla plana göre, ayrıca bir hidrojen piyasası mevzuatının aksine mevcut olan enerji piyasası mevzuatına eklemelerin gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Yine hidrojenin üretildiği yerden, iletim ve dağıtım ağları ile birlikte nihai kullanıcıya ulaştırılması, dolum istasyonlarının kurulması gibi yönünde hedefler mevcuttur.

Türkiye Hidrojen Stratejisi’nde yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre bir yeşil hidrojen üretimi birincil hedeftir. Bunun yanında; mevcut kaynakların değerlendirilerek doğalgazdan mavi hidrojen üretimi de ihtimaller dahilinde tutulmuştur. Net sıfır karbon emisyon hedeflerine ulaşmada temiz hidrojenin rolü büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla uluslararası standartlara uygun, emtia temelli bir yeşil hidrojen piyasasının oluşturulabilmesi için gerekli standartların belirlenmesi ve bu standartlar uyarınca hidrojen üretiminde bulunulması önem arz etmektedir. Özellikle elektrik ve doğal gaz pazarları için geliştirilen uygulamalar ve ticari teamüllerin, hidrojen pazarı için de dikkate alınması gerekmektedir. ISO tarafından 2024 yılı için standart belirleme çalışmaları devam etmektedir. Standartlar, hidrojen üretimi, sıvılaştırılması, taşınması, sera gazı emisyonları belirleme, tedarik zincirlerini içermektedir. ISO/CD 19870-1.2. taslağı ise Komite tarafından gözden geçirilmektedir. Açılacak olan standartların, ulusal standart belirleme çalışmaları bakımından yol gösterici olacağı ifade edilebilecektir. Türkiye Hidrojen Stratejisi’ne göre;

Demir-çelik, rafine, endüstri, biyokimya gibi alanlar, karbondan arındırılması için ülkelerce ilk planda tutulan faaliyet alanlarıdır. İfade edilen alanların, karbondan arındırılması, yeşil hidrojen üretimi ile mümkün olabilecektir. Halihazırda bulunan Endüstri Bölgeleri Kanunu, Organize Sanayi Bölgeleri Kanunu’nda gerçekleştirilecek değişikliklerle birlikte, ağır sanayi alanları için yeşil hidrojene geçişte teşvik mekanizmalarının getirilebilecektir. Yine yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre bir elektroliz yönteminin benimsenmesi ve teşvik edilebilmesi için mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretime ilişkin mevzuatlara eklemeler gerçekleştirilebilecektir.

Üretilen hidrojenin, hedeflenen konumlara ulaştırılabilmesi için iletim ve dağıtım hatlarıyla taşınması gündeme gelmektedir. Mevcut hidrojen yatırımları, altyapı maliyeti gibi durumlar göz önünde bulundurulduğunda, hidrojenin, mevcut doğal gaz ağları ile taşınması önemli bir strateji olabilecektir. Türkiye’nin hidrojenin taşınmasına yönelik hedefleri de bu doğrultudadır. Hidrojenin taşınmasına yönelik düzenleyici işlemlerin, Türkiye’de mevcut bulunan EPDK tarafından oluşturulacak bir birim ile yapılabileceği, hidrojen politikası için hızlı bir geçiş sağlayacaktır. Düzenleyici makamların, hidrojen talebi, taşınması gibi konularda kararlar alabilmesi, yönetmelikler çıkarabilmesi, hidrojen piyasasının ve pazarının oluşturulmasında öncü bir nitelikte olacaktır.

4.6.8 HİDROJEN’İN ENERJİ PİYASASINDAKİ KONUMU

¹⁷⁰ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası", 2022.

Türkiye'nin enerji piyasaları, küresel eğilimlere uyum sağlamak ve yerel ihtiyaçlara yanıt vermek amacıyla köklü değişimlerden geçmiştir. 2001 yılında çıkarılan 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, piyasa reformlarının başlangıç noktası olmuş, üretim, iletim ve dağıtım faaliyetleri birbirinden ayrılarak serbest piyasa koşulları oluşturulmuştur. Bu kanunla birlikte, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) ve enerji ticaretini düzenleyen diğer aktörler enerji sektöründe etkin rol üstlenmiştir.

18 Mart 2015 tarihinde kurulan Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ), enerji piyasalarının etkin, şeffaf ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi hedefiyle faaliyetlerine başlamıştır. EPIAŞ, Türkiye'nin enerji ticaretinde merkez ülke olma hedefi doğrultusunda, Gün Öncesi ve Gün İçi Elektrik Piyasaları, Spot ve Vadeli Doğal Gaz Piyasaları gibi çeşitli piyasa mekanizmalarını işletmektedir. Şirket, piyasa katılımcılarının alım-satım taleplerini düzenleyerek enerji ticaretinin güvenilir bir ortamda gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

EPIAŞ'ın Kilometre Taşları:

1 Temmuz 2015: Gün İçi Piyasası açıldı.

14 Mart 2016: Şeffaflık Platformu hizmete girdi.

1 Eylül 2018: Organize Doğal Gaz Toptan Satış Piyasası devreye alındı.

1 Haziran 2021: Vadeli Elektrik Piyasası açıldı.

1 Ekim 2021: Vadeli Doğal Gaz Piyasası faaliyete geçti.

Bu süreçlerde EPIAŞ, uluslararası piyasalarda tanınırlığını artırarak EUROPEX ve APEX gibi prestijli enerji borsası birliklerine üye olmuştur.

4.6.9 Gün Öncesi ve Gün İçi Elektrik Piyasaları

4.6.9.1 Gün Öncesi Piyasası (GÖP)

EPIAŞ tarafından işletilen Gün Öncesi Piyasası, bir sonraki gün için enerji ticaretinin planlandığı bir platformdur. Bu piyasada piyasa katılımcıları saatlik, blok veya esnek teklifler sunarak enerji alım-satım işlemleri yapar. Teklifler, fiyat ve miktar bilgileri içermekte olup yalnızca Türk Lirası (TL/MWh) üzerinden belirlenir. Teklifler, yüzde birlik fiyat hassasiyeti ile belirlenirken, işlem birimi olarak "lot" kullanılır ve bir lot, 0.1 MWh'e karşılık gelir.

Bu piyasa, arz ve talep dengesinin sağlanmasına olanak tanır. Katılımcıların sunduğu tüm tekliflerin optimize edilmesiyle oluşan piyasa takas fiyatı (PTF), Türkiye elektrik piyasasında referans fiyat olarak kabul edilir. Tekliflerin işleme alınma süreci, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenen mevzuat çerçevesinde gerçekleştirilir.

4.6.9.2 Gün İçi Piyasası (GİP)

Gün İçi Piyasası, mevcut gün içinde arz ve talep değişimlerine hızlı yanıt verebilmek amacıyla işletilir. Bu piyasa, enerji dengesizliklerini minimize etmeyi ve piyasa esnekliğini artırmayı hedefler. Katılımcılar, enerji üretim ve tüketim tahminlerindeki değişikliklere bağlı olarak gün içerisinde teklifler sunabilir veya mevcut tekliflerini güncelleyebilir. Böylece, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretim yapısına uyum sağlanır.

GİP'teki işlemler, sürekli ticaret yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, katılımcıların fiyat ve miktar bilgilerini belirterek anlık alım-satım yapabilmesine olanak tanır. EPIAŞ tarafından geliştirilen bu platform, enerji güvenliğini artırmanın yanı sıra arz-talep dalgalanmalarına uyum sağlamayı kolaylaştırır.

4.6.9.3 Mevzuat ve Yönetim

Her iki piyasa da 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ve ilgili yönetmelikler çerçevesinde düzenlenir. Tekliflerin sunumu ve eşleştirilmesinden piyasa takas fiyatının belirlenmesine kadar tüm süreçler, EPDK'nın denetim ve gözetimi altında gerçekleştirilir. Piyasalardaki tüm işlemler EPIAŞ'ın "Şeffaflık Platformu" üzerinden takip edilebilir, böylece katılımcılar ve kamuoyu için şeffaf bir işlem ortamı sağlanmaktadır.¹⁷¹¹⁷²

4.6.9.4 Spot Doğal Gaz Piyasası

Spot Doğal Gaz Piyasası (SDGP), doğal gazın gün içi veya ertesi gün teslim edilmek üzere alınıp satılabildiği bir ticaret platformudur. Bu piyasa, 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu kapsamında düzenlenmiş olup EPIAŞ tarafından işletilmektedir. Spot piyasa, katılımcıların arz ve talep değişikliklerine hızlı yanıt vermelerini sağlayarak enerji arz güvenliği ve esnekliği artırmayı amaçlar.

Piyasa işleyişinde, katılımcılar talep ve tekliflerini belirli bir zaman aralığı içinde sisteme sunar. EPIAŞ, piyasa işlemleri sonucunda Piyasa Takas Fiyatı (PTF) belirler ve bu fiyat, doğal gaz ticaretinde referans niteliği taşır. Piyasa, özellikle ani talep artışları veya arz eksikliklerinde çözüm sunarak, dengeleme mekanizmalarının etkinliğini artırır.

4.6.9.5 Vadeli Doğal Gaz Piyasası

Vadeli Doğal Gaz Piyasası (VDGP), 1 Ekim 2021 tarihinde EPIAŞ tarafından faaliyete geçirilmiştir. Bu piyasa, gelecekte teslim edilmek üzere doğal gaz alım-satım anlaşmalarının yapılabildiği organize bir ticaret ortamıdır. 4646 sayılı Kanun'un ilgili düzenlemeleri kapsamında işletilen VDGP, katılımcılara fiyat oynaklıklarına karşı korunma ve uzun vadeli planlama imkânı sunar. Böylece enerji maliyetlerinin öngörülebilirliği artar ve piyasa katılımcılarının risk yönetimi güçlenir.

Vadeli piyasada, işlem kontratları belirli standartlara göre düzenlenir. Katılımcılar, EPIAŞ'ın platformu üzerinden kontrat alım-satımı yapabilir ve teminat gerekliliklerini karşılayarak işlemlerini güvence altına alır. Bu mekanizma, piyasa likiditesini artırırken fiyat istikrarına katkıda bulunur.

4.6.9.6 Mevzuat ve Yönetim

¹⁷¹ Enerji Piyasaları İşletim Anonim Şirketi Resmi Belgeleri ve Şeffaflık Platformu, <https://www.epias.com.tr>, erişim tarihi 17.11.2024

¹⁷² 6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu.

Doğal gaz piyasaları, 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu ve ilgili yönetmeliklere dayanılarak işletilmektedir. Bu kapsamda:

- ❖ Lisans Şartları: Piyasada faaliyet göstermek isteyen tüzel kişilerin EPDK'dan lisans alması zorunludur. Lisans başvuruları 60 gün içinde değerlendirilir ve sonuçlandırılır.
- ❖ Organize Piyasa Tanımı: Kanunun 43. maddesi, organize toptan doğal gaz satış piyasalarını, dengeleme ve ileri tarihli fiziksel teslimat gerektiren işlemlerle ilişkilendirmiştir. Bu çerçevede, EPİAŞ'ın işlettiği piyasalar, düzenlenmiş piyasa ortamı sunarak ticaretin güvenli ve öngörülebilir olmasını sağlar.¹⁷³

4.6.9.7 EPİAŞ ve Türkiye'nin Enerji Hedefleri

EPİAŞ hem elektrik hem de doğal gaz piyasalarında şeffaflığı ve etkinliği artırarak Türkiye'nin enerji ticaretinde merkez ülke olma hedefini desteklemektedir. 2016'da devreye alınan Şeffaflık Platformu ile piyasa katılımcıları ve kamuoyu için gerçek zamanlı veri paylaşımı sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra, karbon nötr şirket sertifikasıyla sürdürülebilir çevre politikalarını benimseyen EPİAŞ, enerji piyasalarının küresel standartlarda işletilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu başarılar, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırma ve enerji arz güvenliğini sağlama hedeflerini desteklemektedir. EPİAŞ'ın geliştirdiği piyasa mekanizmaları ve sektörel iş birlikleri, enerji ticaretinde güvenilir ve sürdürülebilir bir geleceğin kapılarını aralamaktadır.

4.6.9.8 Enerji Piyasasında Hidrojenin Konumu

Türkiye'de hidrojen borsası henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, bu alanda önemli adımlar atılmaktadır. **Türkiye'nin Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası**, hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve ticareti için yasal ve altyapısal düzenlemelerin geliştirilmesini hedeflemektedir. Avrupa'daki gelişmelerden yola çıkarak, Türkiye'de de hidrojenin ticareti için bir borsa kurulması planları değerlendirilmektedir. Avrupa Enerji Borsası'nın (EEX) HYDRIX endeksi gibi bir fiyatlandırma mekanizması geliştirilmesi, ¹⁷⁴Türkiye'nin hidrojen ticaretine yönelik altyapısını güçlendirebilir. Bu, yatırımcılar için güvenilir fiyat sinyalleri sağlayarak hidrojen piyasasının büyümesini destekleyecektir. Türkiye'nin bu alanda daha aktif bir rol üstlenmesi, karbon nötr hedeflerine ulaşılmasında önemli bir kilometre taşı olacaktır. ¹⁷⁵

Türkiye'de hidrojenin emtia olarak Borsa İstanbul bünyesinde mi EPİAŞ tarafından yürütülen borsalarda mı yer alacağı ikilemi karbon borsası ile birlikte tartışılmaktadır. EPİAŞ yine bir emtia olarak kabul edilen doğalgaz piyasasının yürütücülüğünü üstlenmiştir. Elektrik borsasına benzer şekilde doğalgaz vadeli ve spot olarak ikiye ayıran şirketin ihtiyaç duymuş olduğu regülasyonları da EPDK Doğalgaz Dairesi aracılığı ile tamamlamaktadır. Yol haritasında hedeflenen elektrolizörler hedeflerinin gerçekleşmesi halinde hidrojen ticaretinin artış göstereceği bilinmektedir. Hidrojen ticaretinde ise hidrojenin renginin piyasadaki fiyat oluşumunu belirleyeceği tahmin edilmektedir. Zira emisyonlu hidrojenlerin karbon kredisi etkisiyle fiyatlarının belirleneceği yeşil hidrojen ise maliyetlerden kaynaklı fiyat oluşumunu etkileyeceği tahmin edilmektedir.

¹⁷³ 4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu.

¹⁷⁴ <https://www.enerjigunlugu.net/ilk-yesil-hidrojen-fiyat-endeksi-enerji-borsasinda-54293h.html>

¹⁷⁵ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası", 2022.

Hidrojende mevzuat oluşum sürecinin başlaması, yeşil hidrojen başta olmak üzere hidrojen üreticilerinin çoğalması, yeşil hidrojenin alternatif enerji kaynağı olarak başta sanayi sektörü olmak üzere dönüşümün mümkün olduğu sektörlere benimsetilmesi, yeşil hidrojen için teşvik ve hibe programlarının başlatılması, yeşil hidrojen için YEKDEM benzeri bir teşvik mekanizmasının kurulması, hidrojen düzenleme kurumunun kurulması veya Nükleer Düzenleme Kurumu bünyesinde yer alması gibi piyasa oluşturucu faaliyetler hidrojenin enerji piyasasında aktif olarak yer almasını sağlayacak etkenler olarak belirlenmektedir.¹⁷⁶

EPİAŞ kapsamında ise hidrojenin yönetsel mekanizmasının oluşturulması önem taşıması beklenmektedir. EPİAŞ'ın doğalgaz piyasasına az zaman olsa hakim olması, hidrojenin ticarileşmesi ve başta lisans olmak üzere regülasyon sürecinin doğalgaz piyasası ile kıyasen konumlanması, PTF kurgusunun elektrik ve doğalgazda olduğu gibi hidrojende de uygulanabilme imkanı, EPİAŞ tarafından enerji piyasasının aktif olarak kurgusunun sağlanması ve vadeli, spot ayırımının sürekli olarak uygulanabilmesi hidrojen borsasının da EPİAŞ tarafından yürütülmesinin mümkün olacağı şeklinde artı noktada değerlendirilebilmektedir.

EPİAŞ tarafından hidrojen borsasının yürütülmesi artıları bulunsa da piyasa kurgusunun yönetiminde olumsuz yönde etkileme ihtimali bulunan etmenler yer almaktadır. EPİAŞ tarafından güncel olarak doğalgaz, elektrik ve YEK-G(planlanmaktadır) borsaları yönetilmektedir. EPİAŞ tarafından elektrik borsasının yönetimi gün öncesi ve gün içi kapsamında oldukça hacimli bir kapsamdadır.¹⁷⁷ Özellikle elektrikte arz ve talep dengesinin günün her saatinde korunma ihtiyacı, elektriğin nitelik itibarıyla ani edimlerden meydana gelmesi, piyasa katılımcılarının fazla olması EPİAŞ için yönetim yükünü artırmaktadır. Diğer bir etmen ise karbon piyasasının da EPİAŞ özelinde kurgulanacağı ve karbon borsasının da EPİAŞ tarafından oluşturulma ve karbon takas fiyatlarını belirleme yükümlülüğüdür. Karbon piyasasından kaynaklı borsanın 1.1.2025 tarihinde ağır şartlar olmaksızın belirlenen emisyon azaltımı hedeflerine hızla ulaşmak için, işletmelere düşük maliyetli bir pazar çevresi sağlayan bir sistemi sektöre sunulması hedeflenmektedir.¹⁷⁸ Hidrojenle olduğu gibi Karbon piyasası henüz gelişmekte olduğundan ve şu anki fiyatlar karbon gerçek değerini yansıtmadığından karbon satın alındığında alıcılar fiyat konusunda belirsizlikle karşı karşıya olunan piyasanın da gelmesi hidrojen borsasının verimli ve etkin olarak yürütülmesine engel teşkil edebilecektir.

4.6.10 Sonuç Ve Öneriler

4.6.10.1 Araştırma, İnovasyon ve Teknoloji Geliştirme

- ❖ Hidrojenle ilgili araştırma başta olmak üzere destek programları ivedilikle hayata geçirilmelidir. Destek programları enerji dönüşümü başta olmak üzere hidrojenin üretimi için önem arz eden projelere desteklerle sağlanmalıdır.
- ❖ İlk etapta yenilenebilir enerjinin bir parçası olarak daha sonrasında ayrıca olmak üzere teknik üniversitelerde, meslek liseleri ve meslek yüksekokullarında hidrojen teknolojilerine yönelik eğitim programları başlatılmalıdır. Hidrojen yol haritasına uygun olarak ders programı düzenlenmelidir.

¹⁷⁶ <https://www.milliyet.com.tr/ekonomi/milliyet-enerji/turkiye-hidrojen-trenini-kacirmamali-6955495>

¹⁷⁷ <https://www.epias.com.tr/epias-kurumsal/hakimizda/>

¹⁷⁸ Ticaret Bakanlığı, Emisyon Ticaret Sistemi ve SKDM İlişkisi, 2024.

- ❖ Yöntemi yeşil hidrojen olmak üzere yerli hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımına yönelik AR-GE çalışmaları desteklenmelidir. AR-GE çalışmalarının ticarileştirilmesi için bölgelerde (teknopark) imkanlar sağlanmalıdır.
- ❖ TÜBİTAK tarafında hidrojen üretim birimi olarak değerlendirilmelidir. TÜBİTAK tarafından öncülük edilecek bir elektrolizör geliştirilmesi sağlanmalıdır.

4.6.10.2 Stratejik Planlama ve Uygulama

- ❖ Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı liderliğinde bakanlıklar arası iş birliği ile Türkiye Hidrojen Enerjisi Stratejik Eylem Planı oluşturulmalıdır. Eylem planında üretim, depolama, taşıma, tüketim ve ihracat yöntemleri elektrolizör kapasiteleri, hidrojen üretimi yapılacak stratejik bölgeler, hidrojen mevzuatı, hidrojen regülasyonu, hidrojen borsası ve hidrojenin yönetim mekanizması profesyonel şekilde irdelenmelidir.
- ❖ Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen endüstri bölgeleri programı acilen başlatılmalı; kapasite, depolama yöntemleri ve dağıtım süreçleri tanımlanmalıdır. Endüstri bölgelerinde üretim, elektrolizör üretimi, Ar-Ge ve Ür-Ge merkezleri, teknik lise ve meslek edindirme kursları ile köşe taşlarının olduğu bölgesel kalkınmanın ve istihdamın ön plana çıkarıldığı alanlar ilan edilmelidir. Alanlar ilan edilirken Çevre Şehircilik İklim Değişikliği Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın bir araya geldiği stratejik gelişim programı oluşturulmalıdır.
- ❖ Yerli enerji ve hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanan girişimcilik destek programları oluşturulmalıdır.

4.6.10.3 Yasal ve Standart Çerçeve

- ❖ Hidrojen Enerjisine yönelik Doğalgaz Piyasası Kanunu'na benzer şekilde mevzuat ve ikincil mevzuatlar oluşturulmalıdır. Hidrojen mevzuatı esnek yapıda, verimli ve yatırımı teşvik edilecek nitelikte kurallar kitabı şeklinde olmalıdır.
- ❖ Hidrojen mevzuatına ek olarak hidrojen dönüşümüne dair Enerji Verimliliği Kanunu hükümleri detaylandırılmalıdır.
- ❖ Türk Standartları Enstitüsü bünyesinde hidrojenle ilgili standart ve yönetmelikler hazırlanmalıdır.
- ❖ İş Sağlığı ve Güvenliği Yasası'na, hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve kullanımıyla ilgili maddeler eklenmelidir.
- ❖ Akreditasyon ve sertifikasyon merkezleri kurulmalı, hidrojen teknolojileri için yönetmelikler oluşturulmalıdır.

4.6.10.4 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ve Teknoloji

- ❖ Yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretimi ile entegrasyonu için planlama yapılmalı, başta güneş ve rüzgar enerjisi olmak üzere tüm kaynaklar optimize edilmelidir.
- ❖ Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım yönleri çeşitlendirilmeli ve hidrojen üretimine kanalize edilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar, güneş ve hidroelektrik santrallerin üretim fazlasının yeşil hidrojenle kullanılması için projeler kurgulanmalıdır.
- ❖ Yüksek çaplı elektrolizörleri beslemek amacıyla yenilenebilir enerji üretim tesisleri kurulmalıdır. Üretim tesislerinin şebekeye entegrasi için altyapı yatırımları hızlandırılmalı kapasite tahsisleri artırılmalıdır.
- ❖ Off-Grid gibi alternatif elektrik enerjisi üretim yöntemleri desteklenmeli, mevzuatı oluşturulmalı ve yatırımcılara fırsat olarak sunulmalıdır.

- ❖ Elektrik Piyasası Kanunu başta olmak üzere ikincil mevzuatlar hidrojene entegre olacak şekilde regüle edilmelidir. Yeşil hidrojen üretimi için gerekli elektrik üretim sistemi YEKDEM ve Toplayıcılık mevzuatlarında detaylandırılmalıdır.
- ❖ YEKDEM mekanizmasına hidrojen üretimine satış alternatifi getirilmelidir.
- ❖ Deniz üstü RES projeleri hızlandırılmalı, bu projelerin hidrojen vadileri ile entegre çalışması sağlanmalıdır.

4.6.10.5 Finansman ve Ekonomik Modeller

- ❖ Hidrojen projeleri için ulusal ve uluslararası finansman mekanizmaları oluşturulmalı, düşük maliyetli üretim için yatırımlar teşvik edilmelidir.
- ❖ Elektrolizör maliyetlerini azaltacak teknolojik gelişmelere yatırım yapılmalıdır.
- ❖ Türkiye'nin avantajlı olduğu bor madeni gibi yerli kaynaklar hidrojen depolama ve üretiminde kullanılmalıdır.
- ❖ Yeşil hidrojen üretimi doğrultusunda yeşil finansmanın yönlendirilmesi sağlanmalıdır.
- ❖ YEKDEM benzeri teşvik mekanizması oluşturulmalıdır. Yatırımcıların ürettikleri hidrojene alım garantisi sunulmalıdır.
- ❖ Hidrojen üretim tesisi kurulum maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla üretim maliyetleri devlet tarafından sübvansede edilmelidir.
- ❖ Vergi harç ve ruhsat gibi bedellerden hidrojen üreticileri muaf tutulmalıdır.

4.6.10.6 İhracat ve Bölgesel İşbirlikleri

- ❖ Türkiye, enerji geçiş noktası olarak Avrupa'ya hidrojen ihracatı yapacak altyapıyı geliştirmeli, bu çerçevede uluslararası standartlarla uyumlu üretim gerçekleştirmelidir.
- ❖ Karadeniz'deki hidrojen sülfür kaynakları da kullanılarak düşük maliyetli hidrojen üretimi sağlanmalıdır.
- ❖ Almanya, ABD başta olmak üzere hidrojen arzının gerekli olduğu ülkelerle uzun süreli hidrojen ihracat anlaşmaları sağlanmalıdır.
- ❖ Hidrojen ve türevlerinin ihracatı için yöntemler geliştirilmelidir. Kara, hava, deniz ve boru hattı geliştirilmesi sağlanmalıdır.
- ❖ İhracatın kolaylıkla yapılabilmesi için gümrük muafiyetleri getirilmelidir.

4.6.10.7 Sektörel Dönüşüm ve Kullanım Alanları

- ❖ Ulaşım sektöründe hidrojen yakıtlı araçların yaygınlaşması için teşvikler sağlanmalıdır. Hidrojen yakıtlı araçların ulaşabileceği yakıt istasyonları kurulmalıdır.
- ❖ Hidrojen yakıtlı araç projeleri desteklenmeli, Ar-Ge ve üretim kapasitesi artırılmalıdır.
- ❖ Yoğun enerji tüketen sektörler ve sektördeki aktörler belirlenmeli hidrojene dönüşümleri için destek ve zorunluluk içeren paketler sunulmalıdır.
- ❖ Doğal gaz altyapısında hidrojen kullanımına yönelik dönüşüm projeleri başlatılmalıdır.

4.6.10.8 Toplum ve Bilgilendirme

- ❖ Sosyal ve basılı medya kanalları aracılığıyla hidrojen ekonomisinin avantajları hakkında bilgilendirme kampanyaları düzenlenmelidir.

- ❖ Hidrojen sistemlerinin faydaları, iklim değişikliğiyle mücadeleye katkıları ve iş olanakları geniş kitlelere anlatılmalıdır.



4.6.10.9 Hedefler ve İzleme

- ❖ Türkiye'nin 2023, 2053 ve 2071 hedefleri doğrultusunda hidrojen enerjisine yönelik yol haritaları ve izleme mekanizmaları geliştirilmelidir.
- ❖ Ulusal Hidrojen Stratejisi kapsamında sektörel fayda-maliyet analizleri yapılmalı, hidrojenin potansiyel katkıları düzenli olarak ölçülmelidir.

4.6.10.10 Uluslararası Gelişmeler ve Risk Yönetimi

- ❖ Avrupa Birliği'nin hidrojen politikaları takip edilmeli, Türkiye bu pazarda aktif bir oyuncu olmalıdır.
- ❖ Platin gibi stratejik hammaddelerin kısıtlılığı göz önünde bulundurularak alternatif malzemeler ve teknolojiler geliştirilmelidir.
- ❖ Küresel enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı Türkiye'nin enerji güvenliği için hidrojen enerjisi stratejisi önceliklendirilmelidir.

4.6.11 Yerel ve Bölgesel Projeler

- ❖ Güney Marmara Hidrojen Vadisi gibi projelerin kapsamı genişletilmeli ve ülke genelinde yeni hidrojen vadileri oluşturulmalıdır.
- ❖ Bölgeler arası iş birliğinin artırılacağı projeler yerel yönetimler bölgesel aktörlerle birlikte kurgulanmalıdır.

4.6.12 SONUÇ

Yenilenebilir enerji ve hidrojen teknolojileri, gelecekteki enerji dönüşümünün temel taşları olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen enerjisi, temiz enerji hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu güçlendirmekte ve dekarbonizasyon sürecine kritik bir katkı sunmaktadır. Türkiye'nin enerji stratejisinde hidrojen üretim ve ihracat kapasitesini artırması, uluslararası enerji pazarlarında rekabet avantajı sağlayabilecektir.

Bu raporda sunulan analizler, yenilikçi teknolojilere yapılan yatırımların artırılması ve altyapı projelerinin hızlandırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Küresel iş birliği fırsatlarının değerlendirilmesi, yerel kaynakların verimli kullanımı ve Ar-Ge faaliyetlerinin teşviki, hem ekonomik büyüme hem de enerji güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Hidrojen enerjisinin, ulaşım, sanayi ve enerji sektörlerinde kullanım alanlarının yaygınlaşması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı kolaylaştıracak ve Türkiye'nin enerji dönüşümünde lider ülkeler arasında yer almasını sağlayacaktır.

KURUMSAL İLETİŞİM'E NOT: Görseller ayrıca gönderilecektir.

Görsel Eklenmesi Önerilen Alanlar
Sayfa 3 (Yenilenebilir Enerji Kaynakları)

Güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal, hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını temsil eden bir infografik veya dünya genelinde yenilenebilir enerji potansiyelini gösteren bir harita.
Sayfa 4 (Güneş Enerjisi)

Türkiye'nin güneşlenme sürelerini ve bölgesel potansiyelini gösteren bir grafik veya GEPA verilerine dayalı bir Türkiye haritası.
Sayfa 5 (Rüzgar Enerjisi)

Rüzgar santrallerinin Türkiye'deki dağılımını ve potansiyel bölgeleri gösteren bir harita.
Modern rüzgar türbinlerinin fotoğrafı veya gelişimini anlatan bir zaman çizelgesi.
Sayfa 7 (Biyokütle Enerjisi)

Biyokütle kaynaklarının çeşitliliğini gösteren bir infografik.
Türkiye'nin biyokütle potansiyelini vurgulayan bir pasta grafiği.
Sayfa 9 (Jeotermal Enerji)

Türkiye'deki aktif jeotermal enerji sahalarını gösteren bir harita.
Jeotermal enerji kullanım alanlarını anlatan görselleştirilmiş bir şema.
Sayfa 14-15 (Hidrojen Üretim Yöntemleri)

Hidrojen üretim süreçlerini açıklayan bir şema.
Hidrojenin fosil yakıtlar ve yenilenebilir kaynaklardan üretim oranlarını kıyaslayan bir pasta grafiği.
Sayfa 19-21 (Elektrolizör Teknolojileri)

Alkali, PEM ve SOEC elektrolizör teknolojilerinin çalışma prensiplerini gösteren teknik şemalar.
Küresel elektroliz kapasitesinin bölgesel dağılımını gösteren bir harita veya sütun grafiği.
Sayfa 37-39 (Hidrojenin Taşınması ve Depolama Yöntemleri)

Kara, deniz ve demir yolu taşımacılığı için kullanılan hidrojen taşıma yöntemlerini gösteren bir şema.
Dünya örneklerinden görseller veya altyapı projelerini temsil eden fotoğraflar.
Sayfa 48-56 (Küresel Hidrojen Politikaları ve Türkiye'nin Rolü)

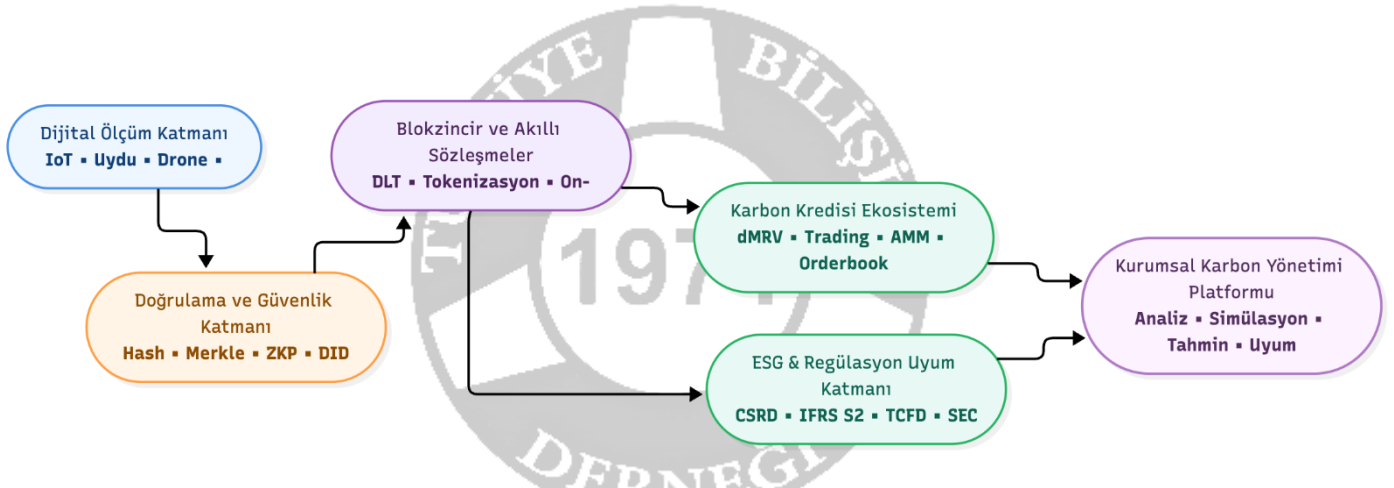
Avrupa Birliği, ABD, Çin gibi ülkelerin hidrojen stratejilerini özetleyen karşılaştırmalı bir tablo veya grafik.
Türkiye'nin hidrojen projeksiyonunu ve ihracat hedeflerini gösteren bir görsel.
Son Bölüm (Genel Stratejiler ve Gelecek Planları)

Hidrojenin sektörlerdeki kullanım alanlarını gösteren bir şema (çelik, çimento, ulaşım, doğalgaz vb.).
Türkiye'nin yenilenebilir enerji entegrasyon planını gösteren bir görsel (örneğin, rüzgar ve güneş enerjisi ile hidrojen üretimi)

5. Dijital Karbon Yönetimi, Blokzincir Tabanlı Doğrulama, E-Verimlilik ve Dağıtık Sistemler Ekosistemi

Dijital dönüşüm, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği politikalarının teknik boyutunu belirleyen temel bir çerçeveye dönüşmüş; özellikle karbon yönetimi bağlamında hem regülasyonlar hem de piyasa dinamikleri tarafından zorunlu kılınan yapısal bir dönüşümü ortaya çıkarmıştır. Paris Anlaşması'nın uygulanması, Avrupa Birliği'nin CBAM düzenlemesi (European Commission, 2023), ISSB IFRS S2 standardı (ISSB, 2023), SEC İklim Bildirimi Taslağı (SEC, 2024) ve CSRD/ESRS çerçevesi (EFRAG, 2023) gibi düzenlemeler, kurumsal karbon verisinin yalnızca raporlanabilir değil, aynı zamanda doğrulanabilir, karşılaştırılabilir ve bütünlüğü garanti altına alınmış dijital formatlarda sunulmasını zorunlu hale getirmiştir [IPCC, 2023; European Commission, 2023; EFRAG, 2023]. Bu gereklilikler, küresel karbon piyasalarının 2030–2050 döneminde öngörülen büyümesine uygun bir dijital altyapı ihtiyacını daha görünür kılmaktadır [World Bank, 2023; ICAP, 2023; OECD, 2022].

Bu bölüm, dijital karbon doğrulamasının (dMRV), blokzincir tabanlı veri bütünlüğü sistemlerinin, akıllı sözleşme tabanlı piyasa mekanizmalarının ve e-verimlilik odaklı işletme sistemlerinin kurumsal karbon yönetimi ekosistemi içindeki yerini bütüncül bir bakışla incelemekte; böylece hem uyum piyasalarının hem gönüllü karbon piyasalarının yapısal dönüşümünde gerekli olan teknik zeminin kapsamlı bir çerçevesini sunmaktadır.



Şekil 0.8 Dijital Karbon Yönetimi Ekosistemi: Ölçüm–Doğrulama–Blokzincir–ESG–Pazar İşlemleri Bütünleşik Mimarisi

5.1 Blokzincir Tabanlı Dijital Altyapının Temelleri: Kriptografi, Dağıtık Defterler ve Veri Güvenliği

Dijital karbon yönetimi ekosisteminin genel çerçevesi yalnızca düzenleyici baskılarla veya piyasa beklentileriyle değil, aynı zamanda bu dönüşümü mümkün kılan teknik altyapıların olgunlaşmasıyla şekillenmektedir. Bu kapsamda blokzincir tabanlı dijital altyapılar; sistem bütünlüğünü, güvenilirliğini ve uluslararası karşılaştırılabilirliği sağlayan temel yapı taşlarından biri olarak öne çıkmaktadır. dMRV'den tokenizasyona, akıllı sözleşmelere ve dijital ESG doğrulamasına kadar pek çok sürecin üzerinde yükseldiği bu altyapı, karbon piyasalarının ihtiyaç duyduğu güven katmanının oluşturulmasında kritik bir rol üstlenmektedir.

5.1.1 Blokzincir ve Dağıtık Defter Kavramı

Blokzincir, çok sayıda düğümün (node) eşzamanlı olarak paylaştığı ve senkronize biçimde güncellediği dağıtık bir defter (distributed ledger) altyapısıdır. Deftere eklenen her kayıt bloklar hâlinde gruplanır; bu bloklar kriptografik yöntemlerle birbirine bağlanır, zaman damgası alır ve ağın uzlaşma (consensus) mekanizması tarafından doğrulanır. Ortaya çıkan bütünleşik yapı, geçmiş kayıtların geriye dönük olarak değiştirilmesini fiilen imkânsız hâle getirir, tek bir merkezi otoriteye duyulan güven ihtiyacını azaltır ve farklı paydaşlar arasında bağımsız biçimde doğrulanabilen bir "ortak gerçeklik katmanı" oluşturur [MIT DCI, 2022].

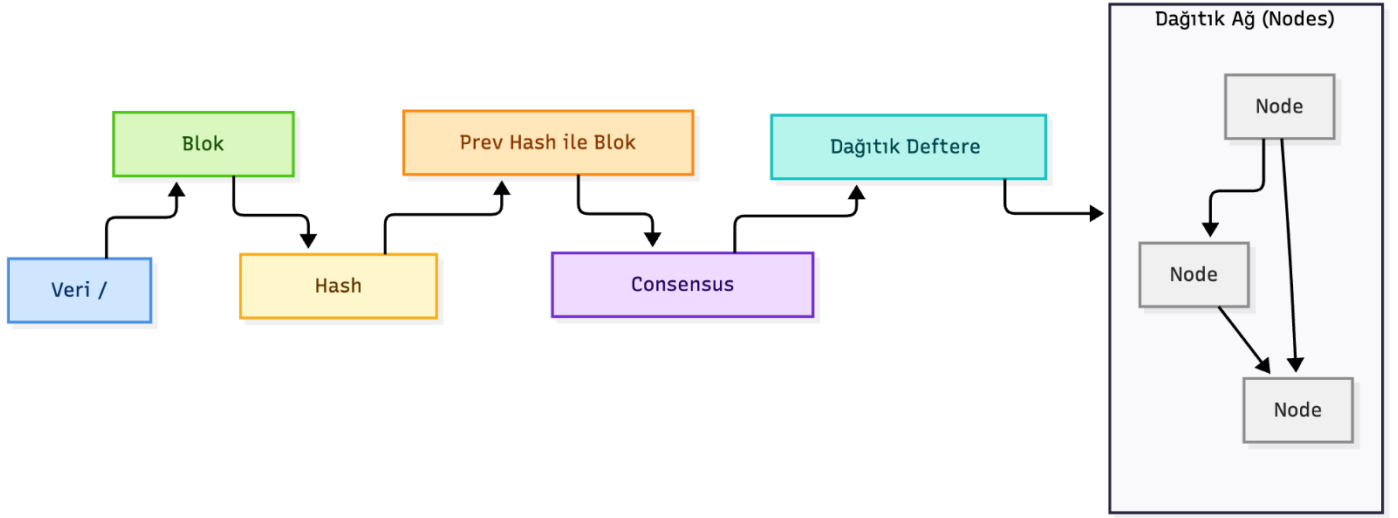
Karbon piyasaları, dMRV ve ESG raporlama bağlamında blokzincir, aşağıdaki çekirdek işlevleri yerine getiren altyapısal bir defter sistemi olarak konumlanmaktadır [World Bank, 2023; Hedera Guardian, 2023]:

- karbon kredisi sicili,
- dijital sertifika sicili,
- MRV süreçlerine ilişkin değiştirilemez doğrulama izi (audit trail),
- tokenleştirilmiş varlıkların mülkiyet ve işlem kaydı.

Bu bölümde ele alınan dMRV, akıllı sözleşme tabanlı süreçler, algoritmik karbon piyasaları ve blokzincir destekli ESG doğrulama mimarileri; kriptografi, dağıtık defter teknolojileri (DLT) ve merkezi olmayan veri yönetimi gibi ortak bir teknik zemine dayanmaktadır. Dolayısıyla bu alt bölüm, ilerleyen kısımlarda detaylandırılacak tokenizasyon, dijital sertifikasyon, karbon kredisi yaşam döngüsü ve kurumsal karbon yönetimi platformlarının anlaşılabilirliği için temel kavramsal ve teknik çerçeveyi sunmaktadır [MIT DCI, 2022; World Bank, 2023; Hedera Guardian, 2023].

Bu çerçeve içinde blokzincir, yalnızca bir kripto varlık altyapısı olarak değil; karbon verisinin değiştirilemezliğini, çift sayımın önlenmesini, uluslararası kayıt sistemleri arasındaki uyumu, denetlenebilirliği ve paydaşlar arasında güvenli veri paylaşımını mümkün kılan temel bir dijital güven katmanı olarak ele alınmaktadır [World Bank, 2023; TSVCN, 2021].

Bu yapının küresel ölekte uyumlu bir sicil mantığıyla çalışabilmesi için Climate Action Data Trust (CADT), farklı ulusal ve gönüllü karbon kayıtlarını tek bir meta-registry altında toplayan bir standart geliştirmektedir. CADT'nin mimarisi, Verra, Gold Standard ve CDM gibi sistemlere ait kayıtların karşılıklı olarak doğrulanmasına imkân vererek çift sayım riskini teknik düzeyde azaltır (World Bank, 2023). Bu yaklaşım, ITMO transferlerinde blokzincir tabanlı uyum mekanizmalarının gerçek hayattaki ilk somut örneklerinden biridir.



Şekil 0.9Blokzincir Tabanlı Dijital Altyapının Temelleri: Kriptografi, Dağıtık Defterler ve Veri Güvenliği

5.1.2 Kriptografik Doğrulama Mekanizmaları: Hash, Merkle Ağaçları ve ZKP

Blokzincir altyapısının karbon piyasaları ve dijital sürdürülebilirlik uygulamaları açısından kritik hale gelmesinin temel nedeni, yalnızca dağıtık bir defter sunması değildir; aynı zamanda bu defterde tutulan verilerin güvenilirliğinin kriptografik yöntemlerle desteklenmesidir. 5.1.1’de aktarılan “ortak gerçeklik katmanı”, ancak bu doğrulama mekanizmalarının devreye girmesiyle teknik olarak işlevsel bir hâl kazanır. Bu çerçevede blokzincirin sunduğu güven modeli, hash fonksiyonları, Merkle ağaçları ve sıfır bilgi ispatları (ZKP) gibi bileşenlerden oluşan bir kriptografi yığını üzerine kuruludur.

Enerji verimliliği perspektifinden bakıldığında, modern blokzincir altyapılarının sürdürülebilirlik performansı büyük ölçüde konsensüs mekanizmalarına bağlıdır. Ethereum’un Proof-of-Work’ten Proof-of-Stake’e geçişi, ağın yıllık enerji tüketiminin %99,9 oranında düşmesini sağlayarak dMRV ve sürdürülebilirlik uygulamalarında blokzincirin kullanılabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır (Ethereum Foundation, 2022). Bu dönüşüm, karbon piyasalarında sıkça dile getirilen “blokzincir enerji yoğun” eleştirisini büyük ölçüde geçersiz kılarak kamu blokzincirlerinin kurumsal kullanımını teknik açıdan daha makul hâle getirmiştir.

Blokzincir tabanlı karbon sistemlerinin güvenilirliği doğrudan bu kriptografik doğrulama mekanizmalarına dayanır.

Hash Fonksiyonları (SHA-256, Keccak256) : Verinin tek yönlü bir “parmak izi” niteliğindeki özetini üretir. Bir MRV dosyası, IoT sensör çıktısı veya uydu görüntüsü için oluşturulan hash değeri:

- verinin değiştirilmediğini göstermeye,
- verinin tamamı açığa çıkarılmadan doğrulama yapılmasına imkân tanır.

Merkle Ağaçları : Geniş veri setlerinin bütünlüğünü tek bir Merkle kök hash değeriyle temsil eder. Bu sayede:

- dMRV sistemlerindeki milyonlarca satırlık ölçüm verisi,

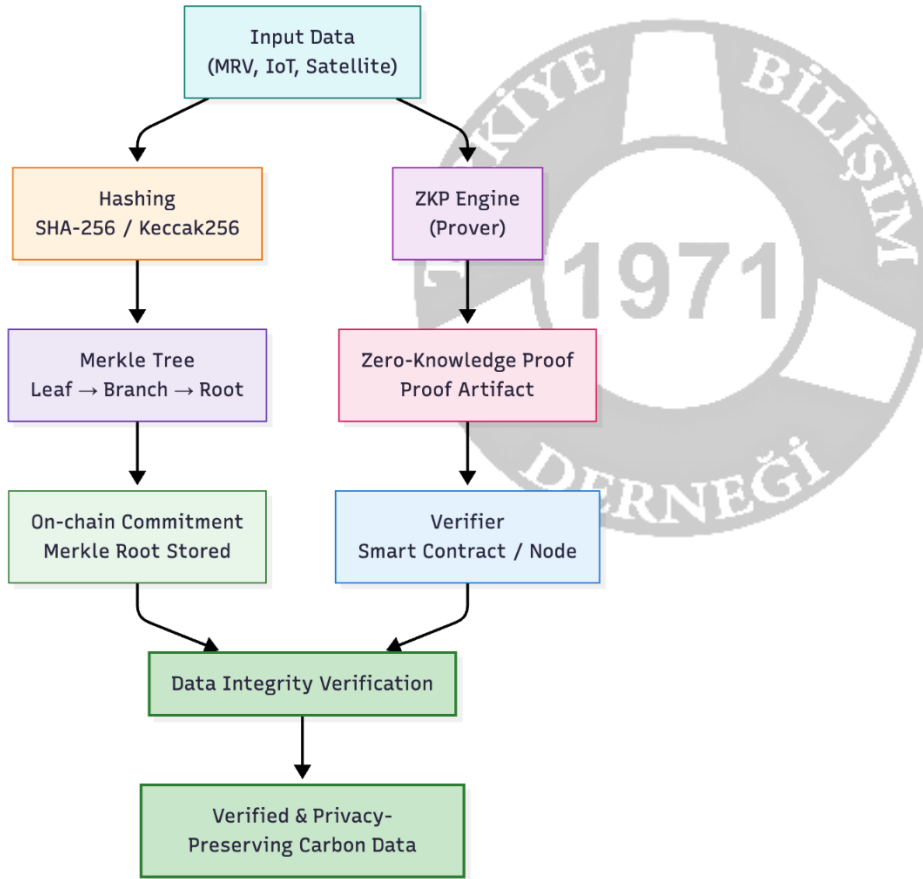
- karbon kredisi yaşam döngüsüne ilişkin işlem kayıtları

ölçeklenebilir ve yüksek hızlı bir yapı içinde doğrulanabilir [MIT DCI, 2022].

Sıfır Bilgi İspatları (Zero-Knowledge Proof – ZKP) : ZKP, bir ifadenin doğruluğunu, ilgili ham veriyi paylaşmadan ispatlamayı mümkün kılar. Karbon bağlamında bu yaklaşım,

- tesisin yakıt tüketimi, üretim reçetesi veya tedarikçi listesi gibi ticari açıdan hassas bilgilerin gizli kalmasını sağlarken,
- emisyon hesaplamalarının doğruluğunun kriptografik olarak doğrulanmasına

olarak tanır. Böylece karbon piyasalarında sıkça gündeme gelen gizlilik-şeffaflık gerilimi teknik düzeyde dengelenmiş olur [Ethereum Foundation, 2022; MIT DCI, 2022].



Şekil 0.10Blokzincir Tabanlı Karbon Sistemlerinde Kriptografik Doğrulama Yığını – Hash, Merkle Ağaçları ve Sıfır Bilgi İspatlarının Bütünleşik Rolü

5.1.3 Merkezi Olmayan Veri Depolama Sistemleri ve Hibrit Mimari

Kriptografik doğrulama verinin doğruluğunu güvence altına alırken, bu verinin nerede ve hangi yöntemlerle saklandığı da en az doğrulama katmanı kadar önemli bir tasarım boyutudur. Bu nedenle blokzincir tabanlı karbon ve sürdürülebilirlik uygulamalarında, doğrulama yapısının üzerine ayrı bir depolama mimarisi eklenmesi zorunlu hâle gelmektedir.

Blokzincirler, hem teknik hem de ekonomik sınırlamalar nedeniyle yüksek hacimli verilerin (örneğin uydu görüntüleri, yüksek frekanslı IoT log'ları veya kapsamlı MRV raporları) doğrudan zincir üzerinde tutulması için uygun değildir. Bu sebeple uygulamalarda hibrit bir mimari tercih edilmektedir:

Zincir Dışı Depolama (Off-chain)

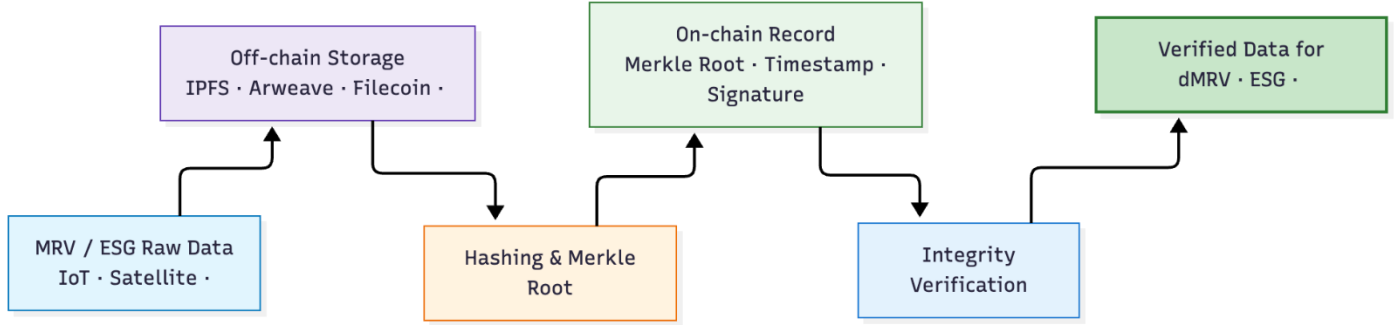
- IPFS, Arweave, Filecoin gibi dağıtık dosya sistemleri,
- S3 uyumlu kurumsal veri gölleri,
- ESG ve MRV veri ambarları.

Zincir Üstü Doğrulama (On-chain)

- Dosya veya veri setine ait hash değeri,
- Merkle kök hash'i,
- Zaman damgası ve imzalayan kurum bilgisi.

Bu modelde MRV ve ESG verileri kurumsal platformlarda veya dağıtık depolama altyapılarında saklanırken; verinin değiştirilemezlik ve bütünlük ispatı blokzincir üzerinde tutulur [Toucan Protocol, 2022; Hedera Guardian, 2023]. Böylece ilerleyen bölümlerde ele alınacak dijital MRV ve blokzincir tabanlı ESG audit trail mekanizmaları için gereken teknik temel oluşturulmuş olur.

Hibrit depolama yaklaşımının tercih edilmesinin bir diğer nedeni, zincir üstü kayıt maliyetlerinde sağlanan ciddi düşüştür. IPFS, Filecoin ve Arweave gibi dağıtık depolama altyapılarında tutulan veri, zincir üstüne yalnızca hash olarak yazıldığından, toplam depolama maliyetler %80–90 oranında azalabilmektedir (Hedera Guardian, 2023). Bu ekonomik avantaj, özellikle yüksek hacimli uydu ve IoT verilerinin işlendiği dMRV projelerinde belirleyici bir fark yaratır.



Şekil 0.11dMRV ve ESG Sistemlerinde Hibrit Depolama Modeli – Off-chain Veri Saklama ve On-chain Bütünlük Doğrulaması

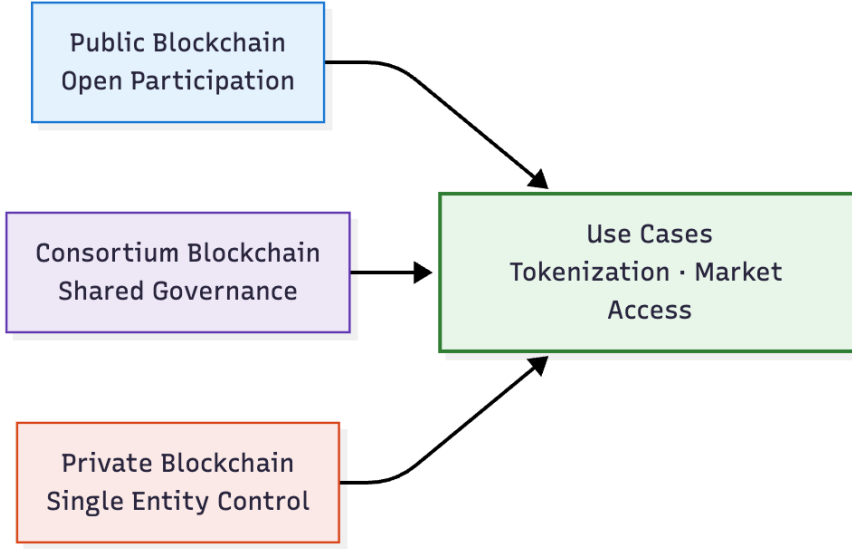
5.1.4 Blokzincir Ağ Türleri: Kamu, Konsorsiyum ve Özel Ağlar

Veri depolama mimarisinin nasıl kurgulandığı kadar, bu verinin üzerinde çalıştığı blokzincir ağının yapısı da sistemin güvenlik, şeffaflık ve ölçeklenebilirlik özelliklerini belirleyen temel bir unsurdur. Bu nedenle depolama katmanının ardından, kullanılabilecek ağ türlerinin yapısal farklarını değerlendirmek önemli bir aşamayı oluşturur.

Karbon piyasaları ile kurumsal sürdürülebilirlik uygulamalarında ağ tipi seçimi, hem teknik hem de yönetişimsel tasarım açısından kritik bir tasarım kararıdır [World Bank, 2023; ICAP, 2023].

- **Kamu (Public) Blokzincirler** : Herkesin katılımına açık, yüksek şeffaflık sağlayan yapılardır (örneğin Ethereum uyumlu ağlar).
 - Avantaj: Güçlü bir güven modeli ve sansüre dayanıklılık sunar.
 - Sınırlılık: Kurumsal gizlilik ve işlem maliyetleri açısından ek çözümler gerektirebilir.
- **Konsorsiyum (Permissioned / Consortium) Ağlar** : Regülatörler, doğrulayıcı kuruluşlar, standardizasyon kurumları veya piyasa operatörleri gibi paydaşların ortak yönettiği yarı-açık ağlardır.
 - Karbon sicilleri, ITMO kayıtları ve gönüllü piyasa tokenizasyonu gibi senaryolarda pratik bir denge sunar.
- **Özel (Private) Blokzincirler** : Tek bir kurum tarafından işletilen kapalı ağlardır.
 - İç operasyonlar ve pilot uygulamalar için uygun olmakla birlikte,
 - “uluslararası güven katmanı” gerektiren karbon piyasalarında sınırlı ölçeklenebilirlik sağlar.

Son yıllarda yaygın eğilim, dMRV ve ESG audit trail süreçleri için konsorsiyum ağlarını; geniş piyasa erişimi ve likidite gerektiren işlemler için ise kamu ağlarını bir arada kullanan hibrit mimariler yönündedir [TSVCM, 2021; MIT DCI, 2022].



Şekil 0.12 Kamu, Konsorsiyum ve Özel Blokzincir Ağlarının Karbon Piyasaları Bağlamında Konumlandırılması

5.1.5 Siber Güvenlik, Dijital Kimlik ve Değiştirilemez Audit Trail

Ağ türlerinin sunduğu güven modelleri ortaya konulduktan sonra, bu ağlar üzerinde çalışan karbon ve sürdürülebilirlik sistemlerinin hangi güvenlik katmanlarıyla desteklendiği kritik bir sonraki başlığı oluşturur. Bu nedenle ağ seçimi, doğal olarak kimlik doğrulama, anahtar yönetimi ve denetlenebilirlik gibi temel güvenlik bileşenlerinin de birlikte ele alınmasını gerektirir.

Blokzincir tabanlı karbon sistemleri yalnızca dağıtık bir defter yapısından ibaret değildir; aynı zamanda anahtar yönetimi, dijital kimlik altyapısı, erişim kontrol mekanizmaları ve audit logging gibi tamamlayıcı güvenlik unsurlarını da içerir [Hedera Guardian, 2023; IBM, 2023].

Başlıca güvenlik katmanları şu şekilde özetlenebilir:

Anahtar ve İmza Altyapısı

- ECDSA ve Ed25519 gibi modern imza algoritmalarının kullanımı,
- HSM (Hardware Security Module) veya MPC tabanlı anahtar yönetimi çözümleri.

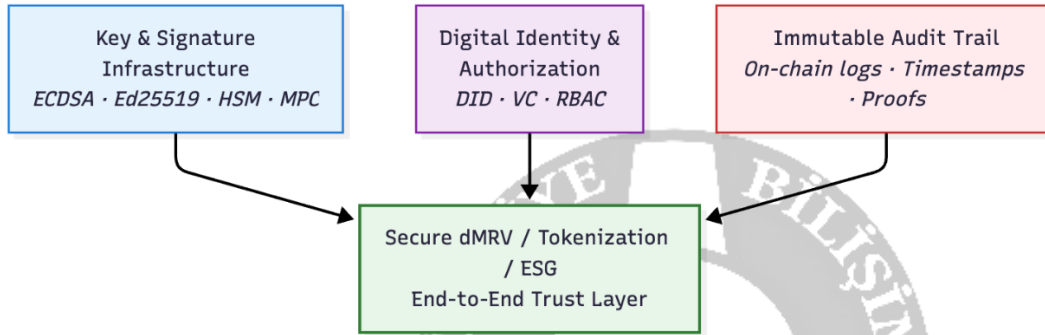
Dijital Kimlik ve Yetkilendirme

- DID (Decentralized Identifier) ve VC (Verifiable Credential) modellerinin uygulanması,
- Regülatörler, doğrulayıcı kurumlar, proje geliştiricileri ve alıcılar gibi paydaşlar için rol tabanlı erişim tanımları.

Değiştirilemez Audit Trail

- Ölçüm, doğrulama, tokenizasyon, transfer ve emeklilik işlemlerinin zincir üzerinde kayıt altına alınması,
- Denetim süreçleri için "geriye dönük izlenebilirlik" ve "kanıtlanabilir bütünlük" sağlayan kalıcı veri izi.

Bu güvenlik katmanlarına ek olarak, kurumsal kullanımda sıkça tercih edilen multisig yapıları ve HSM tabanlı anahtar saklama çözümleri, karbon kredilerinin yetkisiz transferini ve çift harcama riskini ortadan kaldıran tamamlayıcı güvenlik araçları olarak öne çıkar. Özellikle büyük ölçekli proje geliştiricileri ve doğrulayıcı kurumlar için bu tür donanımsal güven önlemlerinin zincir üstü işlemlerde kurumsal seviyede bütünlük sağlaması kritik önem taşır (IBM, 2023). Bu mimari, ilerleyen bölümlerde detaylandırılacak olan dijital sertifikasyon, akıllı sözleşme tabanlı karbon kredisi yaşam döngüsü ve ESG audit trail yapılarının üzerinde yükseldiği teknik temeli oluşturarak sistemin bütüncül güvenliğini destekler.



Şekil 0.13Dijital Karbon Ekosistemlerinde Anahtar Yönetimi, Dijital Kimlik ve Değiştirilemez Audit Trail Katmanları

5.1.6 Karbon Ekonomisi için Blokzincir Tabanlı Değer Önerisinin Özeti

Blokzincir tabanlı altyapılar, karbon piyasalarında uzun süredir tartışılan yapısal sorunlara doğrudan teknik çözümler sunmaktadır [World Bank, 2023; TSVCM, 2021; OECD, 2022]:

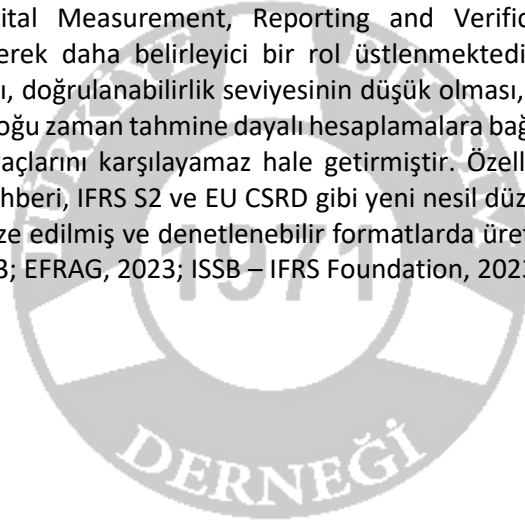
Sorun Alanı	Geleneksel Sistemler	Blokzincir Tabanlı Yaklaşım
Çift sayım ve sahte krediler	Merkezi, kapalı kayıtlar	Değiştirilemez, herkese açık veya paylaşılan sicil
Veri bütünlüğü	Excel/PDF tabanlı, manipülasyona açık	Hash + Merkle + ZKP ile kriptografik ispat
Uluslararası uyum	Uyumlu olmayan ulusal kayıt sistemleri	Ortak defter + meta-registry entegrasyonu
MRV gecikmesi	6–12 ay raporlama döngüsü	dMRV + zincir üstü doğrulama ile dakikalara inen süreçler
Tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik	Parçalı veri, düşük şeffaflık	Ürün/varlık bazlı zincir üstü izleme (PCF, Scope 3)
Paydaş güveni	"Beyan esaslı" raporlama	Kriptografik olarak doğrulanabilir kayıt setleri

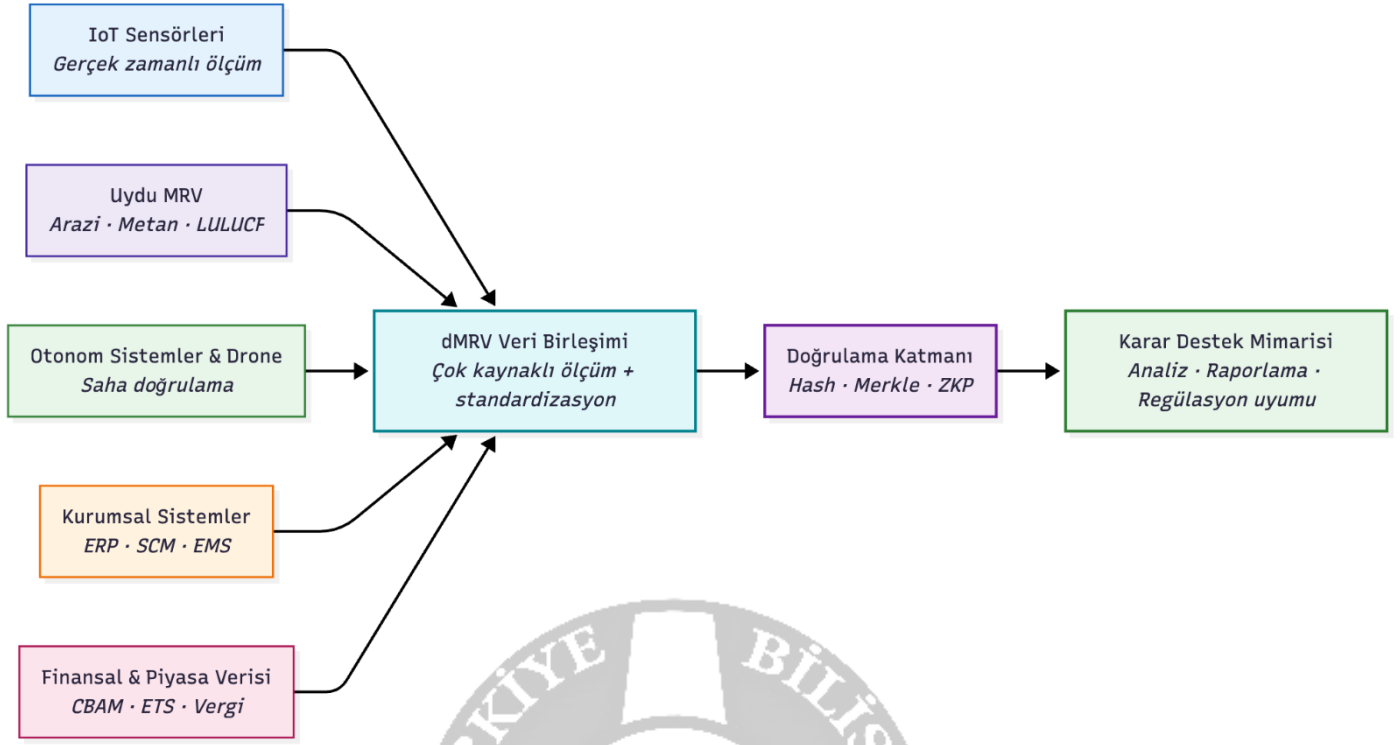
Bu çerçevede blokzincir, tez boyunca ele alınan dijital karbon yönetimi, algoritmik karbon piyasaları ve dijital ESG raporlaması bileşenlerinin tümünde, güven ve veri bütünlüğünü sağlayan temel altyapı katmanı olarak değerlendirilmiştir [World Bank, 2023; MIT DCI, 2022; Brookings Institution, 2022].

5.2 Dijital Karbon Doğrulaması: Kavramsal Temel, Regülasyonlar ve Yeni Nesil MRV Gereksinimleri

Blokzincirin karbon ekonomisine sağladığı değer önerisi ortaya konduktan sonra, bu altyapının üzerinde çalışacağı temel veri akışının—yani karbon ölçüm, raporlama ve doğrulama süreçlerinin—nasıl yeniden şekillendiğini ele almak doğal bir sonraki adım hâline gelmektedir. Bu nedenle blokzincir tabanlı güven katmanının teknik önemini doğru okumak, modern dMRV sistemlerinin neden zorunlu bir bileşene dönüştüğünü anlamak açısından uygun bir başlangıç noktası sunar.

Dijital karbon doğrulaması (Digital Measurement, Reporting and Verification – dMRV), sürdürülebilirlik politikalarının dönüşümünde giderek daha belirleyici bir rol üstlenmektedir. Geleneksel MRV yöntemlerinin manüel veri toplamaya dayanması, doğrulanabilirlik seviyesinin düşük olması, operasyonel gecikmeler yaratması ve sahadaki emisyon ölçümünün çoğu zaman tahmine dayalı hesaplamalara bağlı olması, bu yöntemleri dijitalleşen küresel karbon piyasalarının ihtiyaçlarını karşılayamaz hale getirmiştir. Özellikle Paris Anlaşması Madde 6, AB CBAM, ETS2, SEC İklim Bildirim Rehberi, IFRS S2 ve EU CSRD gibi yeni nesil düzenlemeler; karbon verisinin gerçek zamanlı, doğrulanabilir, standardize edilmiş ve denetlenebilir formatlarda üretilmesini zorunlu kılmaktadır [IPCC, 2023; European Commission, 2023; EFRAG, 2023; ISSB – IFRS Foundation, 2023; SEC, 2024; TCFD, 2021].





Şekil 0.14 Dijital Karbon Doğrulaması (dMRV) Ekosistemi – Çok Kaynaklı Veri Toplama, Kriptografik Doğrulama ve Karar Destek Akışı

Bu gereksinimler, karbon yönetiminin yalnızca raporlama odaklı bir faaliyet olmaktan çıkarak; ölçüm → veri bütünlüğü → doğrulama → karar destek döngüsüne dayanan dijital bir yönetim yapısına doğru evrilmesini sağlamıştır. Dijital karbon doğrulaması, IoT sensörlerinden uydu görüntülerine, otonom saha cihazlarından enerji yönetim sistemlerine kadar uzanan çok çeşitli veri kaynaklarını tek bir doğrulanabilir çatı altında toplamayı hedefler. Böyle bir mimari, yalnızca emisyonların ölçülmesini değil; tedarik zinciri boyunca değer akışlarının izlenmesini, karbon yoğunluklarının dinamik olarak hesaplanmasını ve sürdürülebilirlik risklerinin erken aşamada tespit edilmesini de olanaklı kılar [IEA, 2022; IEA, 2023; OECD, 2021; World Economic Forum, 2022]. Dünya Bankası ve TSVCN raporları, bu dönüşüm sağlamadığı sürece hem uluslararası karbon ticaretinde hem de gönüllü karbon piyasalarında güven sorununun devam edeceğini açık biçimde vurgulamaktadır [World Bank, 2023; TSVCN, 2021; Brookings Institution, 2022].

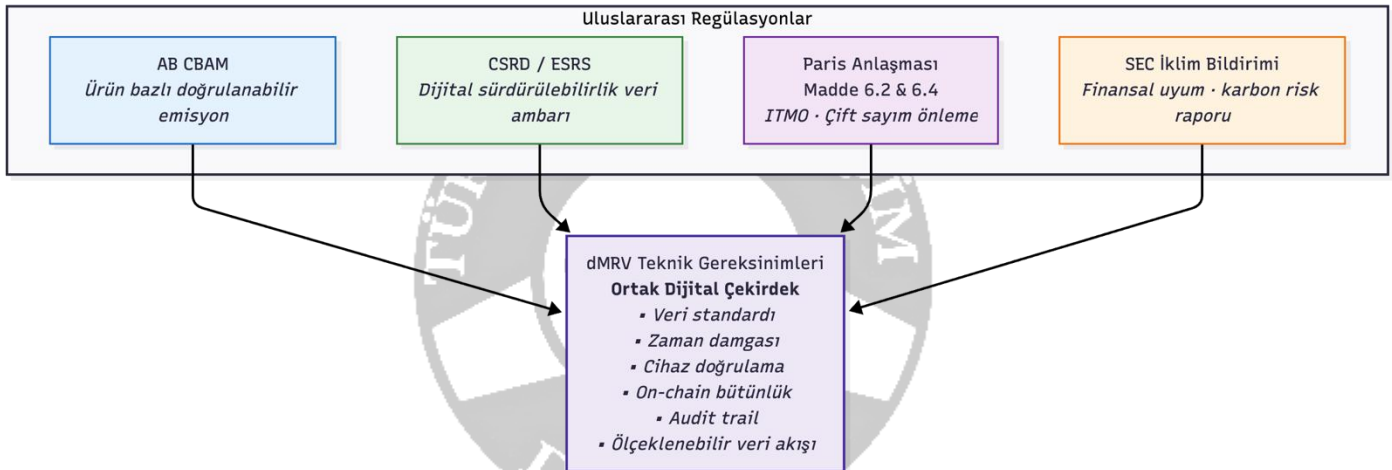
Bu çerçevede dijital karbon doğrulamasını bütüncül biçimde değerlendirebilmek için, öncelikle dMRV'nin hangi regülasyonlara yanıt verdiğini ve bu düzenlemelerin teknik beklentilerini (5.2.1) ele almak gerekir. Ardından mevcut MRV sistemlerinde ortaya çıkan yapısal ve teknik sorunlar (5.2.2) incelenmekte; devamında yeni nesil veri kaynaklarının (IoT, uydu, drone, ERP, finansal ve operasyonel iş akışları) bu yapıya nasıl entegre edildiği (5.2.3) ve çok katmanlı veri akışının hangi mimari kurguyla işlendiği (5.2.4) ortaya konmaktadır. Bu akışı, veri bütünlüğünü güvence altına alan kriptografik doğrulama katmanlarının (hash, Merkle ağaçları, ZKP) açıklanması (5.2.5) ve dMRV'nin işletmeler üzerindeki somut etkilerinin analiz edilmesi (5.2.6) izlemekte; son olarak 5.2.7'de tüm bu bileşenlerin 2030–2050 karbon ekonomisi açısından neden vazgeçilmez olduğu bütünlüklü bir çerçevede değerlendirilerek tamamlanmaktadır.

5.2.1 Dijital Karbon Doğrularının Regülasyon Bazlı Gereklilikleri

dMRV'nin teknik temelini oluşturan bu dönüşüm, aynı zamanda küresel iklim mevzuatının hızla sıkılaşmasıyla doğrudan bağlantılıdır. Başka bir ifadeyle, dMRV yalnızca teknolojik bir yenilik değil; uluslararası düzenleyici çerçeveler tarafından zorunlu kılınan bir gereksinim haline gelmiştir. Bu nedenle, dMRV'nin neden vazgeçilmez olduğunu tam olarak anlayabilmek için önce güncel regülasyonların teknik beklentilerini ele almak gerekir.

Son beş yılda küresel düzeyde çıkarılan iklim mevzuatı, karbon verisinin teknik özelliklerini açıkça tanımlamaya başlamıştır.

Bu düzenleyici çerçevelerin belirlediği teknik gerekliliklerin güvenilir bir biçimde uygulanabilmesi ise, kullanılan karbon metodolojileriyle doğrudan ilişkilidir. Verra, Gold Standard, ISO 14064 ve IPCC rehberleri; projelerin veri üretim sürecinde hangi hesaplama adımlarının izleneceğini tanımlanmasını ve doğrulama süreçlerinin nasıl yürütüleceğini belirler. Bu metodolojik uyum, dMRV sisteminin hem regülasyon gerekliliklerine hem de uluslararası piyasa beklentilerine tutarlı biçimde yanıt verebilmesini sağlar.



Şekil 0.15: Küresel İklim Regülasyonlarının dMRV Teknik Gereksinimlerine Yakınsaması – Ortak Dijital Uyum Çekirdeği

- **Avrupa Birliği CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism)** : AB'ye ihracat yapan kuruluşlar, ürün bazlı karbon yoğunluklarını tescilli, doğrulanabilir ve dijital MRV'ye uygun formatta sunmak zorundadır. Bu gereksinim, yalnızca emisyon miktarını değil, verinin hangi kaynaklardan, hangi yöntemle toplandığını da denetlenebilir kılar [European Commission, 2023; World Bank, 2023].
- **CSRD / ESRS düzenlemeleri** : 2024 itibarıyla 50.000'den fazla işletme, dijital sürdürülebilirlik veri ambarı kurmak, emisyonlarını kapsam 1–2–3 ayrımında raporlamak ve bu raporları bağımsız doğrulama kuruluşlarına sunmakla yükümlüdür. Bu düzenleme, dMRV sistemlerini işletmeler için fiili bir zorunluluk haline getirmiştir [EFRAG, 2023; GRI, 2021; ISSB – IFRS Foundation, 2023].
- **Paris Anlaşması Madde 6.2 & 6.4 mekanizmaları** : Karbon kredilerinin uluslararası transferi için kullanılan ITMO (Internationally Transferred Mitigation Outcomes) birimlerinde, çift sayımın önlenmesi için doğrulanabilir veri akışları ve "ölçümün şeffaf kaydı" gerekmektedir [World Bank, 2023; ICAP, 2023; TSVCM, 2021]. Bu çerçevede, meta-kayıt (meta-registry) ve zincirler arası veri uyumu kritik hale gelmektedir.

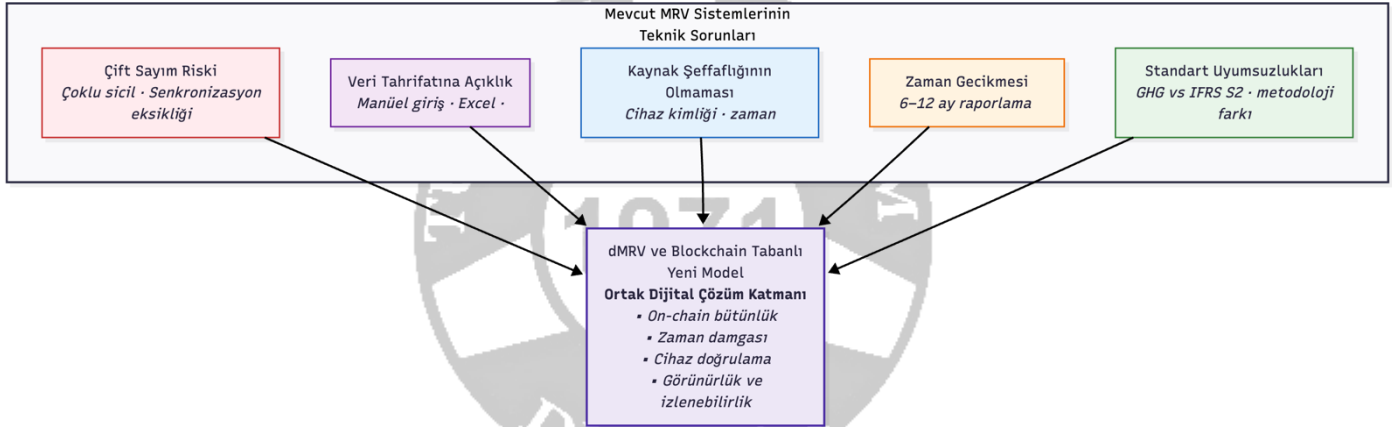
- **ABD SEC İklim Bildirim Taslağı (2024)** : Borsa kotundaki tüm şirketler için karbon risk raporlamasını zorunlu kılar ve karbon verilerinin ölçüm standartlarını belirler [SEC, 2024; ISSB – IFRS Foundation, 2023].

Bu kapsamda dijital MRV:

standardize edilmiş veri formatları, zamansal doğruluk, cihaz güvenilirliği, zincir üstü doğrulama, dijital imzalı audit trail, açık standart veri şemaları gibi teknik gereksinimleri karşılamalıdır [ISO 14064-1, 2018; ISO 14067, 2018; ISO 14083, 2023; TCFD, 2021].

5.2.2 Mevcut MRV Sistemlerinin Teknik Sorunları

Bugün hâlâ birçok kuruluş MRV süreçlerini manuel dosyalar, e-posta ile gönderilen ölçümler, çeşitli yazılımlar arasında taşınan CSV dosyaları ve sınırlı güvenlik önlemleriyle yürütmektedir. Bu yapı aşağıdaki sorunlara yol açmaktadır [OECD, 2022; PwC, 2022; Deloitte, 2023]:



Şekil 0.16 Geleneksel MRV Yaklaşımlarının Zayıf Yönleri ve Dijital MRV'nin Teknik Karşılığı

- **Çift Sayım (Double Counting) Riski** : Aynı emisyon birden fazla raporlama sisteminde yer alabilir. Özellikle farklı ulusal kayıt sistemleri ve gönüllü karbon standartları arasında senkronizasyon eksikliği, hem uyum hem gönüllü piyasalarda güven sorununa yol açmaktadır [World Bank, 2023; TSVCM, 2021].
- **Veri Tahrifatına Açıklık** : Manüel giriş ve Excel tabanlı hesaplamalar sahtecilik ihtimalini artırır; karbon kredilerinin birden fazla kez satılması veya emisyon azaltımının olduğundan fazla gösterilmesi riski ortaya çıkar [PwC, 2022].
- **Kaynak Şeffaflığının Olmaması** : Veriyi hangi cihazın, hangi tarihte ürettiği çoğu zaman geri izlenebilir değildir. Bu durum, özellikle kapsam 3 emisyonlarında tedarik zinciri boyunca veri izlenebilirliğini zorlaştırır [OECD, 2022; ICAP, 2023].
- **Zaman Gecikmesi** : MRV süreçlerinin sonuçları genellikle 6 ay – 1 yıl gecikmeli oluşur. Dijital MRV, uydu ve IoT entegrasyonu ile bu süreyi dakikalara indirebilir [IEA, 2023; ESA, 2023; NASA, 2023].
- **Standart Uyumsuzlukları** : GHG Protocol (GHG Protocol Corporate Standard, Kapsam 1–2–3 ölçüm çerçevesinin küresel referans noktasıdır) ile IFRS S2'nin veri şemalarının uyumsuz olması kurumlar arası

karşılaştırmayı engeller; farklı coğrafyalarda kullanılan MRV metodolojileri arasında teknik harmonizasyon ihtiyacı doğar [GRI, 2021; ISSB – IFRS Foundation, 2023].

Bu nedenle küresel eğilim, manuel MRV'den dağıtık, güvenli, doğrulanabilir dMRV sistemlerine geçiş yönündedir [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023; World Bank, 2023].

5.2.3 Yeni Nesil Veri Kaynakları: IoT, Uydu, Drone, ERP ve İş Süreçleri

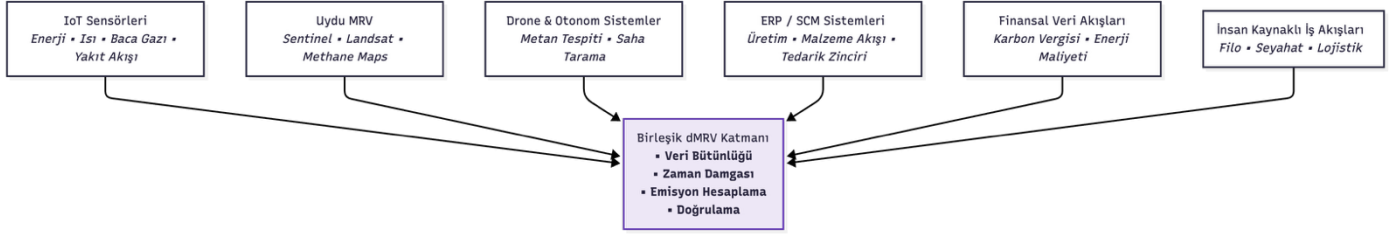
Geleneksel MRV sistemlerinin yukarıda özetlenen yapısal sorunları, yalnızca doğrulama mekanizmalarının dijitalleşmesini değil, aynı zamanda veri kaynağının kendisinin de köklü biçimde dönüşmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle modern dMRV yaklaşımı, tekil ve manuel ölçümlere dayanmak yerine, çok katmanlı ve gerçek zamanlı veri akışlarını bütünlük bir yapıda bir araya getirir.

Dijital karbon doğrulaması, yalnızca bir "veri toplama" faaliyeti değil; çok kaynaklı veri birleşimini temel alan bir teknolojik altyapıdır.

- **IoT Sensörleri** : Gerçek zamanlı enerji tüketimi, proses ısısı, baca gazı & yakıt akış ölçümleri [IEA, 2022; IEA, 2023].
- **Uydu MRV** : Sentinel-2, Landsat 8/9, Planet Labs gibi sistemlerle arazi değişimi, orman karbon stoku, tarımsal emisyonlar ölçülür [ESA, 2023; NASA, 2023; Planet Labs, 2023; GHGSat, 2022].
- **Drone ve Otonom Sistemler** : Saha taraması, metan sızıntısı tespiti, yüksek çözünürlük ölçümleri [GHGSat, 2022].
- **ERP / SCM Yazılımları** : Üretim süreçleri, malzeme akışı, tedarik zinciri durumu, karbon yoğunluk hesaplamaları [OECD, 2021].
- **Finansal Veri Akışları** : Karbon vergisi yükümlülükleri, enerji maliyetleri, karbon fiyatlaması [World Bank, 2023; ICAP, 2023].
- **İnsan Kaynaklı İş Akışları** : Seyahat verisi, filo operasyonları, işletme içi lojistik.

Bu kaynaklar birleştirildiğinde karbon ayak izi hesaplaması yalnızca daha doğru değil, aynı zamanda çok boyutlu ve içgörü odaklı hale gelir [IBM, 2023; Google Research, 2022].

Bu çok katmanlı veri modelinin pratikte nasıl uygulandığına ilişkin örnekler de giderek çoğalmaktadır. ClimateTrade, CO2NEX ve Farmonaut gibi platformlar; uydu görüntüleri, IoT verileri ve tedarik zinciri akışlarını gerçek zamanlı olarak birleştirerek sahadaki emisyonların sürekli izlenmesini sağlayan dMRV çözümleri geliştirmektedir (OECD, 2022). Bu tür uygulamalar, dMRV'nin yalnızca teorik bir mimari değil, aktif olarak kullanılan kurumsal bir altyapı olduğunu göstermektedir.

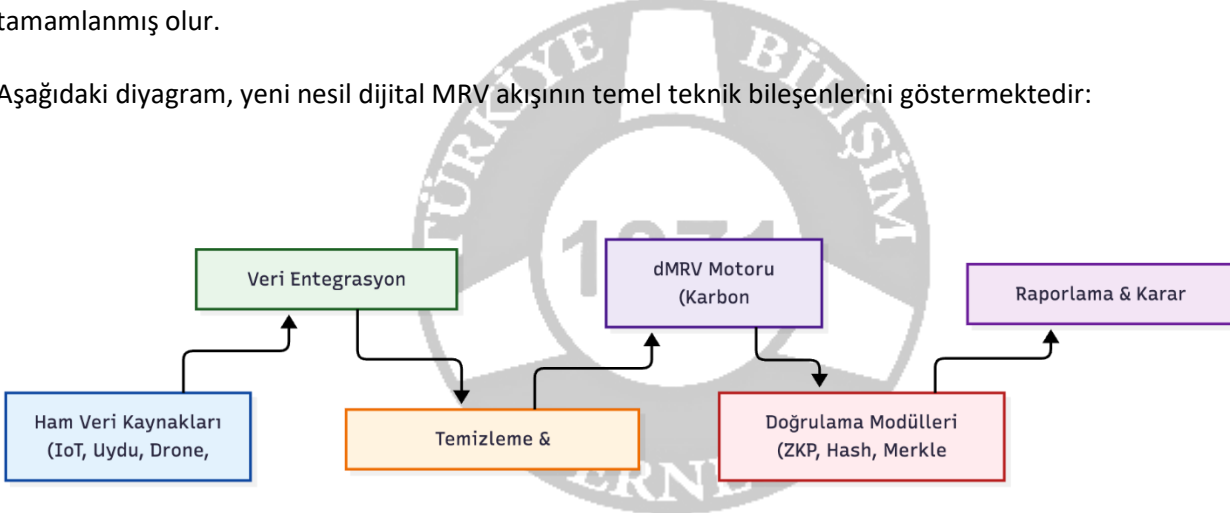


Şekil 0.17Dijital MRV İçin Çok Kaynaklı Veri Ekosistemi ve Birleşik dMRV Akışı

5.2.4 dMRV Sistemlerinin Mimarisi: Veri Akışından Doğrulamaya

Bir önceki bölümde dijital MRV'nin çok kaynaklı veri yapısını oluşturan bileşenler ele alınırken, bu bölüm bu verilerin nasıl bütünlük bir mimari içinde işlendiğini, doğrulandığını ve nihai olarak raporlama süreçlerine aktarıldığını ortaya koymaktadır. Böylece veri kaynağından doğrulamaya uzanan dMRV zinciri teknik olarak tamamlanmış olur.

Aşağıdaki diyagram, yeni nesil dijital MRV akışının temel teknik bileşenlerini göstermektedir:



Şekil 0.18Dijital MRV Veri Akışı – Çok Kaynaklı Ölçümden Doğrulamaya

Bu model bir dMRV sisteminin:

kaynağı bilinen, bütünlüğü kanıtlanabilir, otomatik hesaplama yapan, denetlenebilir, standart uyumlu olmasını sağlar [ISO 14064-1, 2018; MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023].

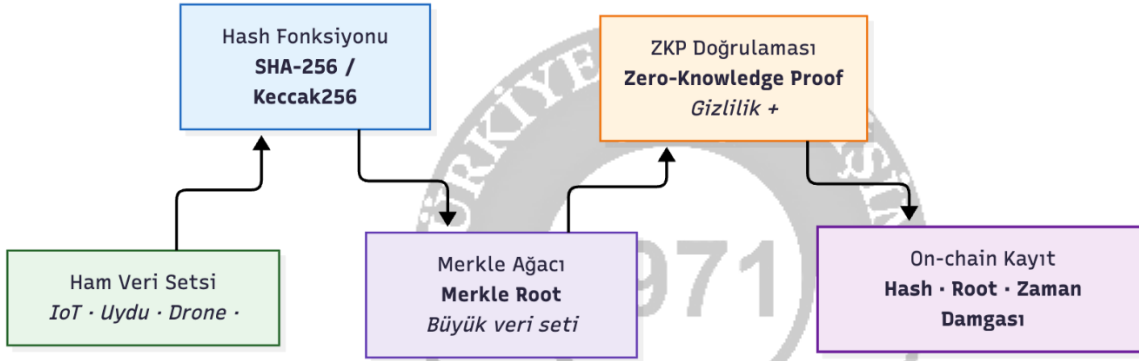
5.2.5 Kriptografik Doğrulama (ZKP, Hash, Merkle) ve Veri Bütünlüğü

dMRV mimarisinin veri akışını nasıl yönettiği ortaya konulduktan sonra, bu akışın güvenilirliğini sağlayan kriptografik yapıların nasıl çalıştığı kritik bir tamamlayıcı adım haline gelmektedir. Çünkü çok kaynaklı veri ne kadar kapsamlı olursa olsun, zincir üzerindeki doğrulama katmanı olmadan dMRV'nin şeffaflık ve bütünlük vaatleri eksik kalır.

Karbon piyasalarında güven sorunu, son yirmi yıl boyunca en büyük yapı taşı olmuştur [World Bank, 2023; TSVCM, 2021]. Bu güven sorununu aşmanın bir diğer yönü, dijital MRV sistemlerinde veri kalitesinin bütünsel şekilde yönetilmesidir. Doğruluk, tutarlılık, eksiksizlik ve zamansallık gibi kalite göstergeleri, ölçümlerin uluslararası standartlarla uyumlu olmasını sağlar. Bu göstergelerin dijital altyapı üzerinden sürekli izlenmesi, hem denetim süreçlerinde belirsizliği azaltır hem de yatırımcı güvenini önemli ölçüde artırır. Bu nedenle modern dMRV sistemlerinde kriptografik doğrulama kritik bir yere sahiptir [MIT DCI, 2022].

- **Hash Fonksiyonları** : Ham verinin tek yönlü parmak izi oluşturulur. Değiştirilemezlik garantisi sağlar.
- **Merkle Ağaçları** : Büyük veri setlerinin bütünlüğü sağlanır ve hızlı doğrulama yapılır.
- **Sıfır Bilgi İspatları (ZKP)** : Kuruluşlar karbon verisini tüm ayrıntıları ifşa etmeden doğrulanabilir kılar. Örneğin, bir fabrikanın yakıt tüketimi verisi gizli kalır, ancak emisyon hesaplamasının doğru olduğu kriptografik olarak ispatlanabilir.

Bu teknikler sayesinde hem şeffaflık hem de ticari gizlilik korunur [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023; Ethereum Foundation, 2022].



Şekil 0.19dMRV Sistemlerinde Kriptografik Doğrulama ve Veri Bütünlüğü Katmanları

5.2.6 Dijital Karbon Doğrulamasının Kurumsal Etkileri

Kriptografik doğrulamanın sağladığı bu güvenlik temeli, dMRV sistemlerinin yalnızca teknik olarak değil, kurumsal düzeyde de nasıl bir dönüşüm yarattığını anlamayı mümkün kılar. Böylece, veri bütünlüğünün garanti altına alınmasıyla birlikte dMRV'nin işletmeler üzerinde oluşturduğu finansal, operasyonel ve yönetimsel etkiler daha somut şekilde ortaya çıkar.

Dijital MRV, bir işletmenin:

- regülasyon uyum maliyetini %30–60 azaltır,
- MRV süresini 6 aydan 30 dakikaya düşürebilir,
- kurumsal karbon bütçesi yönetimini kolaylaştırır,
- kapsam 3 emisyonlarını görünür hale getirir,
- tedarikçi performans skorlamasını mümkün kılar,
- karbon nötr stratejilerinin doğruluğunu artırır,

- yatırımcı güvenini artırır (ESG puanı, derecelendirme etkisi).

Ayrıca karşılaştırılabilir veri üretildiği için sektör içi rekabet daha rasyonel hale gelir [Deloitte, 2023; PwC, 2022; IEA, 2023; GRI, 2021].

5.2.7 Sonuç: dMRV, 2030–2050 Karbon Ekonomisinin Temel Altyapısıdır

dMRV'nin işletmelere sağladığı bu somut kurumsal etkiler, sistemin yalnızca operasyonel bir iyileştirme aracı olmadığını; aynı zamanda küresel karbon piyasalarının geleceğini belirleyen altyapısal bir zorunluluk haline geldiğini açıkça göstermektedir. Bu nedenle dijital MRV'nin stratejik önemini anlamak, 2030–2050 döneminde karbon ekonomisinin hangi temeller üzerinde yükseleceğini doğru okumayı gerektirir.

Dijital MRV sistemleri olmadan:

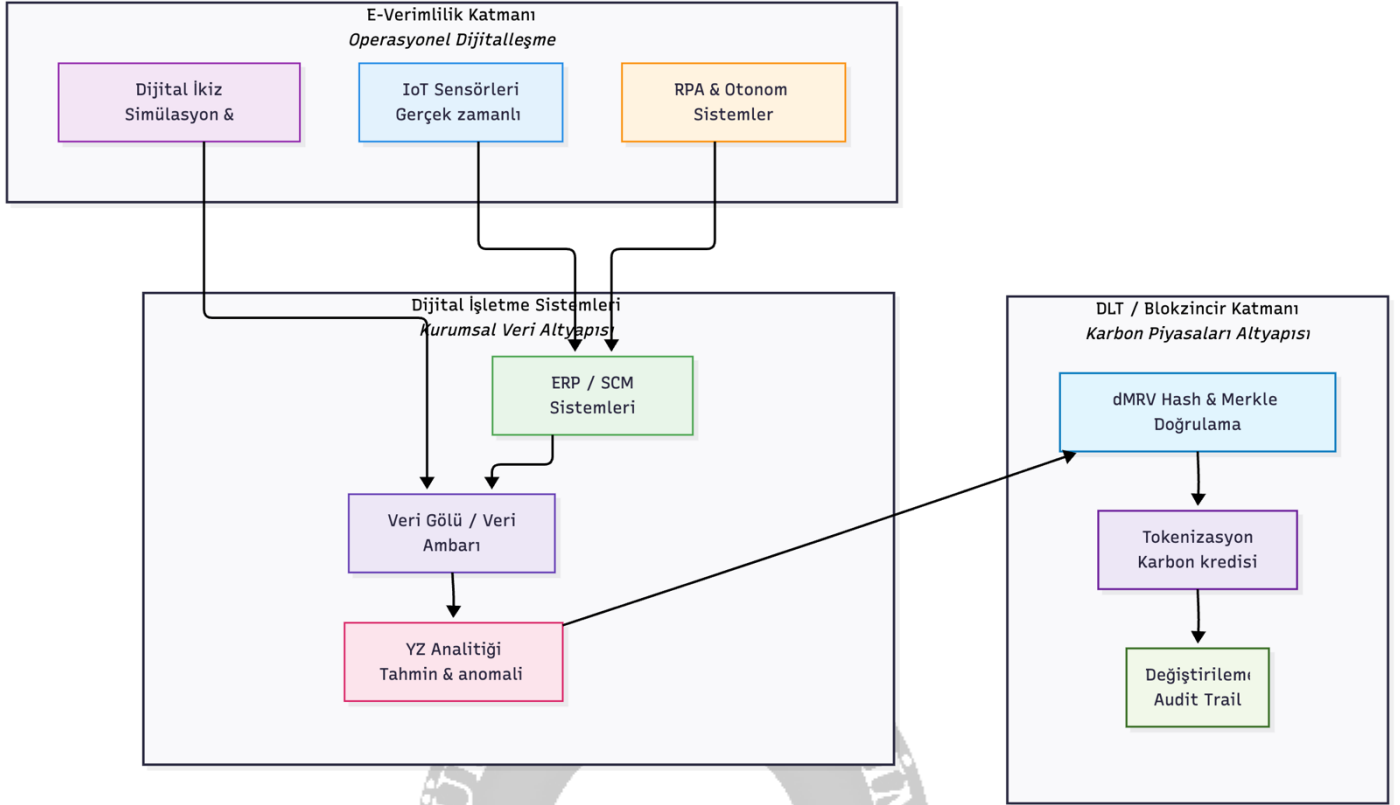
- Karbon nötr iddialarının doğrulanması mümkün değildir.
- CBAM ve SEC düzenlemelerine uyum sağlanamaz.
- Karbon kredisi piyasaları güven sorunlarını aşamaz.
- Tedarik zinciri karbon görünürlüğü sağlanamaz.

Bu çerçevede dijital MRV, yalnızca teknik bir altyapı olmanın ötesinde, iklim yönetişiminin temel omurgası olarak değerlendirilmektedir [European Commission, 2023; ICAP, 2023]. Dünya Bankası ve OECD analizleri, karbon piyasalarının 2050'ye kadar yüz milyarlarca dolara ulaşan bir büyüklüğe erişeceğini; bu büyümenin ise ancak güvenilir MRV mekanizmaları ve sağlam dijital altyapılarla sürdürülebilir hâle gelebileceğini ortaya koymaktadır [World Bank, 2023; OECD, 2022; Brookings Institution, 2022].

5.3 E-Verimlilik ve Dijital İşletme Sistemleri: Blokzincir Tabanlı Karbon Piyasaları için Altyapı

E-verimlilik, yalnızca enerji tasarrufunu değil; işletme kaynaklarının, zamanın, iş gücünün, veri akışlarının ve süreçlerin dijital teknolojiler aracılığıyla optimize edilmesini ifade eden çok boyutlu bir dönüşüm modelidir. Bu yaklaşım; bilgi sistemleri, siber-fiziksel altyapılar, süreç mühendisliği, yapay zekâ ve kurumsal kültür değişimini aynı çatı altında birleştirir. Geleneksel verimlilik anlayışı "daha az kaynak kullanımı" odağında iken, modern e-verimlilik sistemleri "daha akıllı kaynak yönetimi" prensibi üzerine kuruludur.

Son yıllarda özellikle Avrupa Birliği Dijitalleşme Programı, OECD Dijital Dönüşüm Çerçevesi, IEA Dijital Enerji Stratejisi ve Türkiye Ulusal Verimlilik Stratejisi gibi politika setleri; dijital verimliliği yalnızca teknolojik bir yenilik değil, ekonomik rekabet gücünün temel belirleyicisi olarak tanımlamaktadır [OECD, 2021; IEA, 2022; IEA, 2023]. Kurumlar açısından dijital verimlilik, sürdürülebilir operasyonlar için karbon azaltımı ile maliyet avantajının kesiştiği stratejik bir alandır [OECD, 2021; Deloitte, 2023]. Aynı zamanda, karbon kredilerinin yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliğini ve çift sayımın önlenmesini sağlayan dağıtık defter teknolojileri (DLT), bu dijital verimlilik mimarisinin karbon piyasalarına uygulanmış özel bir örneğini temsil etmektedir [World Bank, 2023; MIT DCI, 2022].



Şekil 0.20 E-verimlilik, dijital işletme sistemleri ve blokzincir tabanlı karbon piyasası altyapısı arasındaki yapısal ilişki

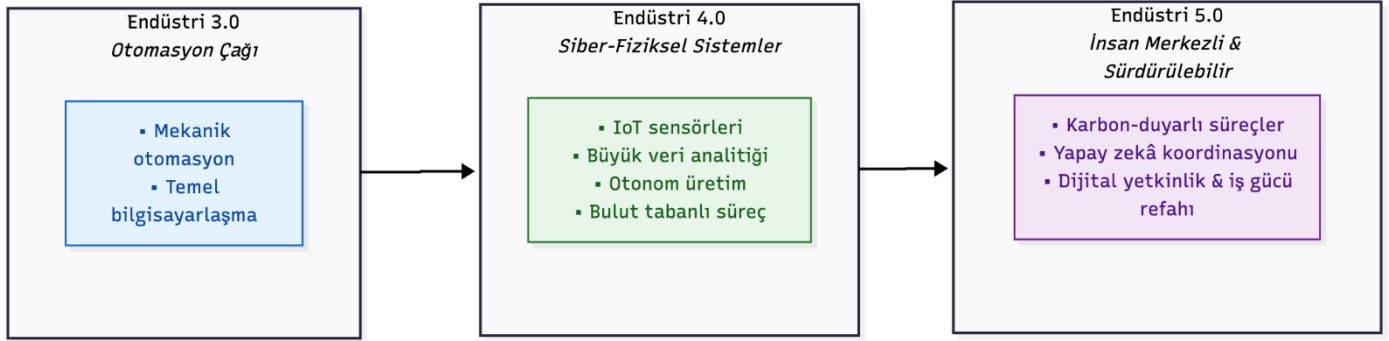
Bu çerçevede 5.3 bölümü, dijital verimliliği yalnızca teknolojik bir modernizasyon olarak değil, karbon yönetimiyle doğrudan ilişkili kurumsal bir dönüşüm alanı olarak konumlandırmaktadır. E-verimlilik; süreçlerin dijitalleşmesini, kaynak kullanımının optimize edilmesini ve karbon yoğunluğunun düşürülmesini sağlayan bütüncül bir altyapı sunarken, bunu mümkün kılan yapısal bileşenlerin nasıl evrildiği bir sonraki alt başlıkta detaylandırılmaktadır. Bu nedenle 5.3.1 bölümü, e-verimlilik kavramının tarihsel gelişimini ele alarak günümüzün karbon-duyarlı dijital işletme modellerine nasıl zemin hazırladığını açıklamaktadır.

5.3.1 E-Verimlilik Kavramının Evrimi: Endüstri 3.0'dan Karbon-Duyarlı Endüstri 5.0'a

Endüstri 3.0 – Otomasyon Çağı : Makineleşme ve bilişim teknolojilerinin üretime entegrasyonu ile temel enerji verimliliği uygulamaları arttı. Ancak veri akışları kapalıydı ve sistemler birbiriyle konuşmuyordu.

Endüstri 4.0 – Siber-Fiziksel Sistemler : IoT, büyük veri analitiği, otonom üretim hücreleri, robotik süreçler ve bulut tabanlı süreç yönetimi sayesinde ölçüm ve görünürlük arttı [World Economic Forum, 2022; McKinsey, 2021].

Endüstri 5.0 – İnsan Merkezli, Esnek ve Sürdürülebilir Sistemler : Bugün verimliliğin amacı yalnızca maliyet azaltımı değil; *iş gücü refahı, dijital yetkinlik, sürdürülebilirlik, çevresel etki yönetimi, otonom iş akışları, yapay zekâ koordinasyonu* gibi çok katmanlı hedefleri içerir. Dolayısıyla e-verimlilik artık "operasyonel optimizasyon" değil, kurumsal dayanıklılık stratejisinin merkezidir [OECD, 2021; IEA, 2023].



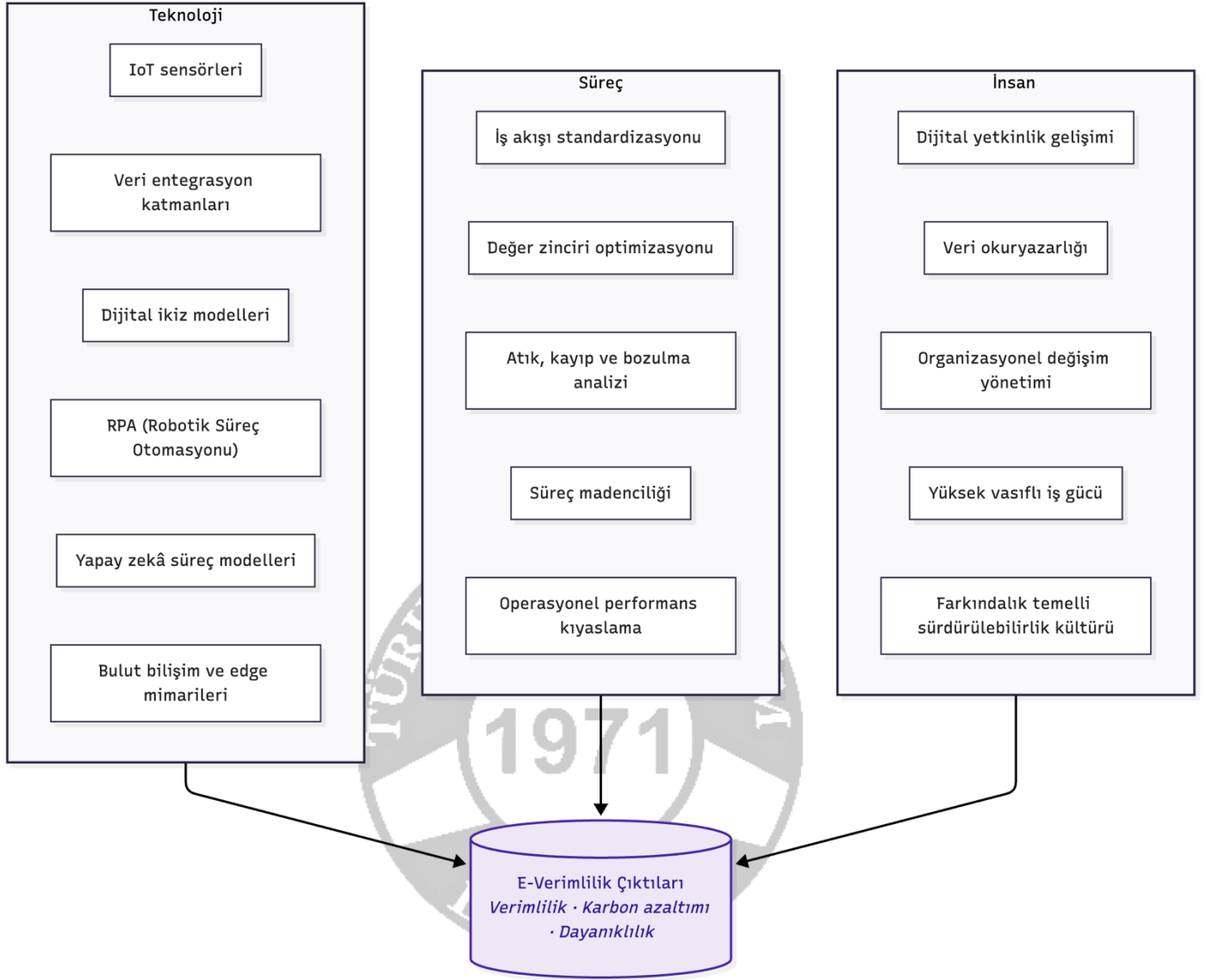
Şekil 0.21 Endüstri 3.0'dan Karbon-Duyarlı Endüstri 5.0'a Dijital E-Verimlilik Evrimi

5.3.2 Teknoloji–Süreç–İnsan Üçgeni: E-Verimliliğin Temel Mimarisi

E-verimlilik, yalnızca yeni teknolojilerin uygulanmasıyla değil; teknoloji, süreç ve insan boyutlarının eş zamanlı ve bütünleşik olarak yönetilmesiyle kurumsal ölçekte sürdürülebilir hale gelen çok katmanlı bir mimariyi ifade eder. Bu üç eksen, sistemin teknik kapasitesini, operasyonel olgunluğunu ve organizasyonel adaptasyon kabiliyetini belirleyen temel yapı taşlarıdır.

- **Teknoloji Boyutu** : Modern e-verimlilik altyapısının teknik omurgasını; IoT sensörleri, veri entegrasyon katmanları, dijital ikiz (digital twin) modelleri, robotik süreç otomasyonu (RPA), yapay zekâ destekli süreç modelleri, bulut bilişim ve edge analitiği oluşturmaktadır. Bu bileşenler, işletmelerde gerçek zamanlı ölçüm yapabilen, kendini güncelleyebilen ve karar destek süreçlerini otomatikleştiren bir teknik ortam sağlar [IEA, 2022; World Economic Forum, 2022; IBM, 2023].
- **Süreç Boyutu** : Teknolojik altyapıyı tamamlayan ikinci eksen süreç yönetimidir. İş akışlarının standardizasyonu, değer zinciri optimizasyonu, kayıp-kaçak ve bozulma noktalarının analizi, süreç madenciliği ve operasyonel performans kıyaslama faaliyetleri; kurumun verimlilik kazanımlarını sistematik, ölçülebilir ve tekrarlanabilir hale getirir [McKinsey, 2021; OECD, 2021].
- **İnsan Boyutu** : E-verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği, organizasyonun insan sermayesi ile doğrudan bağlantılıdır. Dijital yetkinliklerin geliştirilmesi, veri okuryazarlığının artırılması, değişim yönetimi süreçlerinin yürütülmesi, yüksek vasıflı iş gücü ihtiyacı ve sürdürülebilirlik odaklı kurumsal kültür; teknolojik dönüşümün kurum genelinde benimsenmesi için kritik öneme sahiptir [OECD, 2021; Deloitte, 2023].

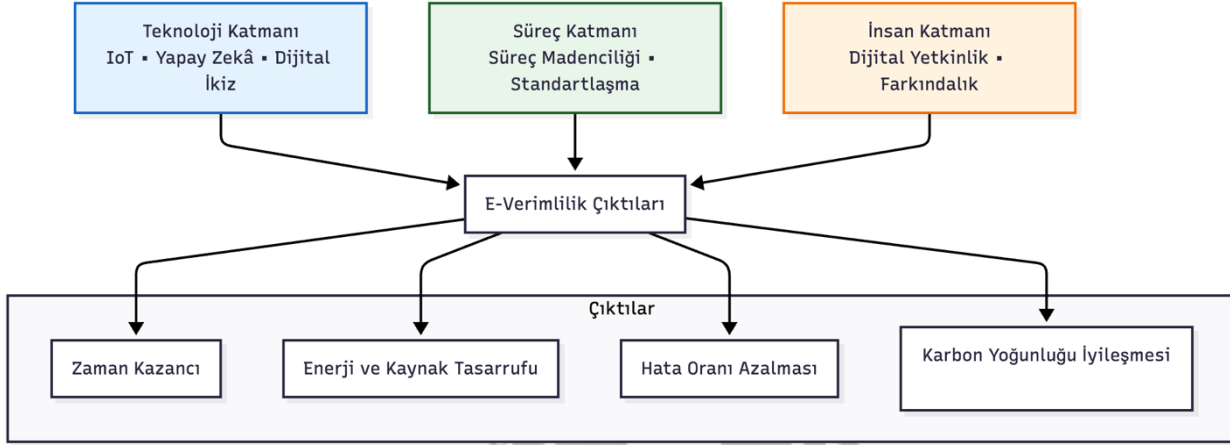
Bu üç eksen arasında bütünleşme sağlanamadığında, e-verimlilik girişimleri ya sınırlı ölçüde değer üretir ya da uzun vadede sürdürülebilirliğini kaybeder. Bu nedenle teknoloji–süreç–insan uyumu, dijital verimlilik mimarisinin temel başarı kriteri olarak değerlendirilmektedir [OECD, 2021].



Şekil 0.22E-verimlilik ekosisteminde Teknoloji–Süreç–İnsan üçgeni

5.3.3 E-Verimlilik Ekosisteminin Kavramsal Modeli

Aşağıdaki model, kurum içi dijital verimlilik olgunluğunu tanımlar:



Şekil 0.23 Teknoloji–Süreç–İnsan Üçgeni ile E-Verimlilik Çıktıları

5.3.4 Dijital İkiz, RPA ve Otonom Sistemlerin Karbon ve E-Verimlilikteki Rolü

Dijital ikizler, robotik süreç otomasyonu (RPA) ve otonom sistemler, modern e-verimlilik mimarisinin teknik açıdan en kritik bileşenleri arasında yer almakta; enerji yönetiminden karbon optimizasyonuna, süreç otomasyonundan operasyonel tutarlılığa kadar geniş bir yelpazede dönüşüm sağlamaktadır. Bu teknolojiler, işletmelerin hem karbon yoğunluğunu azaltan hem de süreç performansını artıran veri odaklı, özerk ve ölçeklenebilir altyapılar kurmasına imkân tanır.

- **Dijital İkiz (Digital Twin) :** Dijital ikiz, bir tesisin, makinenin veya operasyonel sürecin dinamik, gerçek zamanlı güncellenen dijital kopyasıdır. Bu model, e-verimlilik bağlamında aşağıdaki fonksiyonları yerine getirir:
 - enerji tüketim senaryolarının simülasyonu,
 - karbon emisyonu hesaplamalarının gerçek zamanlı stres testleri,
 - kestirimci bakım (predictive maintenance) ile arıza ve duruş sürelerinin minimize edilmesi,
 - üretim kayıpları ve fire oranlarının öngörülmesi,
 - tedarik zinciri darboğazlarının erken tespiti.

IEA ve McKinsey çalışmalarına göre dijital ikiz uygulamaları ağır sanayide enerji tüketimini %10–18 oranında azaltma potansiyeline sahiptir [IEA, 2023; McKinsey, 2021].

- **Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) :** RPA sistemleri, e-verimliliğin operasyonel otomasyon boyutunu oluşturur. Bu teknolojiler:

- Excel ve benzeri manuel raporlama süreçlerini otomatikleştirir,
- insan kaynaklı veri giriş hatalarını ortadan kaldırır,
- arka ofis iş yükünü %30–40 oranında azaltır,
- süreçlerin veri tutarlılığını ve izlenebilirliğini artırır.

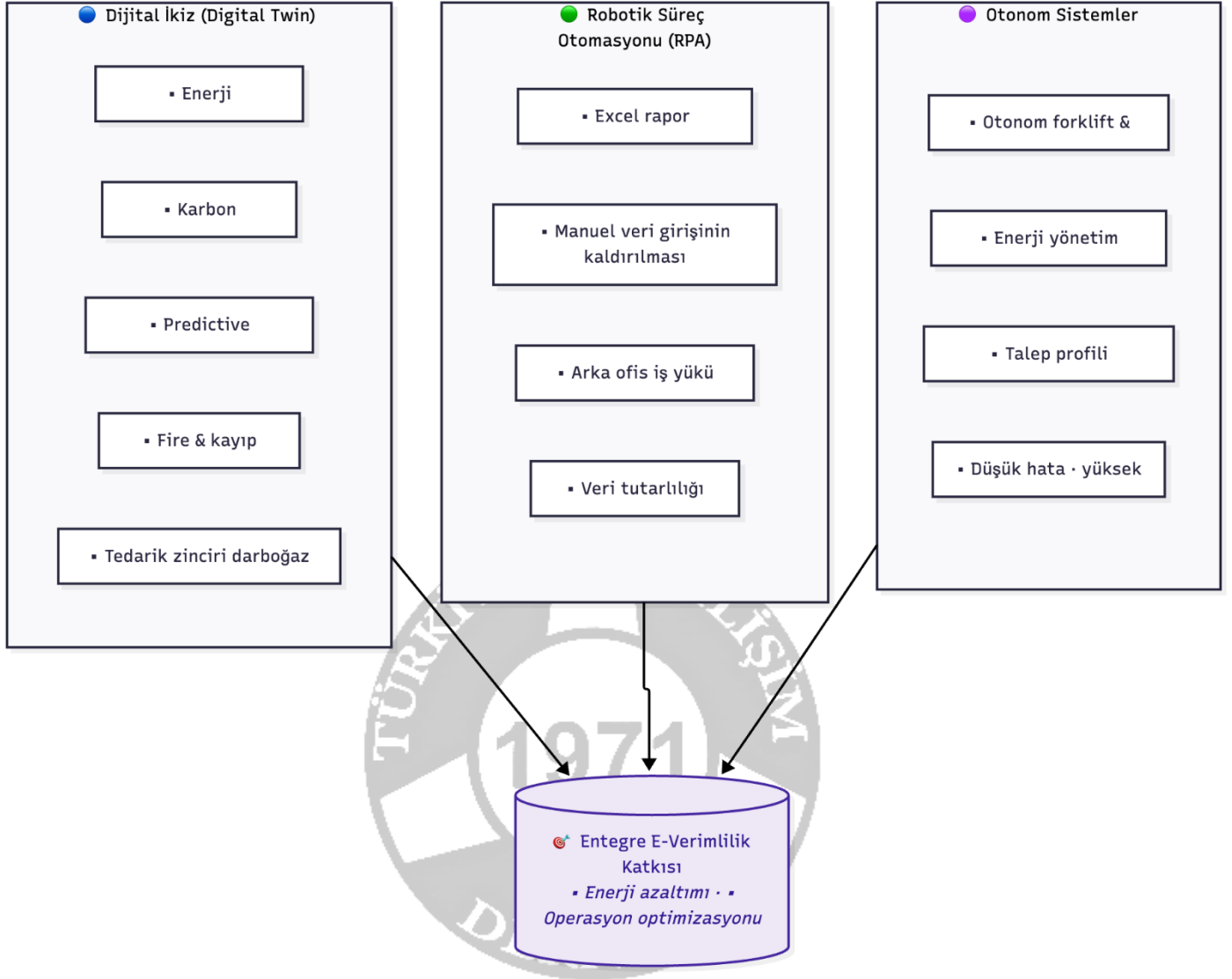
RPA, özellikle karbon raporlama, tedarik zinciri veri akışı ve uyum süreçlerinde tekrarlayan görevleri ortadan kaldırarak dijitalleşmenin hızlanmasına katkı sağlar [Deloitte, 2023].

- **Otonom Sistemler** : Otonom forkliftler, mobil robotlar, akıllı enerji yönetim sistemleri ve sahaya entegre yapay zekâ temelli otonom çözümler; talep yönetimi, enerji optimizasyonu ve operasyonel hız gibi alanlarda önemli kazanımlar sağlar. Bu sistemler sayesinde:

- süreçler daha hızlı ve kesintisiz işler,
- hata oranları düşer,
- enerji yoğunluğu azalır,
- yüksek doğrulukta ve tutarlı veri üretilir.

Bu teknolojilerin entegrasyonu, hem operasyonel verimlilik hem de karbon azaltım stratejileri açısından önemli bir sinerji yaratır [World Economic Forum, 2022; IEA, 2022].





Şekil 0.24Dijital İkiz, RPA ve Otonom Sistemlerin Karbon ve E-Verimlilikteki Rolü

5.3.5 Veri Odaklı Kaynak Yönetimi: Kaynakların Sayısal Digitalizasyonu

Dijital verimlilik yalnızca verinin toplanmasına değil, verinin **kaynağa en yakın noktada işlenmesine** (edge analytics) dayanan bir mimari üzerine kuruludur [IBM, 2023]. Bu yaklaşım; proses ısı değerleri, motor yük profilleri, su-gaz-enerji tüketimi, bakım geçmişi, üretim verimleri, kalite kontrol çıktıları ve taşıma/lojistik rotaları gibi operasyonel değişkenleri **tekil, bütüncül ve yüksek çözünürlüklü** bir veri seti altında toplar.

Bu birleşik veri yapısı sayesinde kaynak yönetimi:

- ölçülebilir,
- modellenebilir,
- geriye dönük ve ileriye dönük izlenebilir,
- optimizasyon algoritmalarına doğrudan uygulanabilir

bir forma dönüşür. Böyle bir mimari, özellikle **kapsam 2 ve kapsam 3 emisyonlarının** doğru hesaplanması ve yönetilmesi açısından kritik önem taşır; zira bu emisyon kategorileri büyük ölçüde süreç verimliliği, tedarik zinciri etkileşimleri ve operasyonel kararların bütüncül olarak değerlendirilmesini gerektirir [ISO 14064-1, 2018; ISO 14083, 2023].

5.3.6 Döngülerinde Sürdürülebilir Maliyet Analizi

E-verimlilik uygulamaları, yalnızca karbon azaltım hedeflerine katkı sunmakla kalmaz; aynı zamanda işletmelerin **finansal sürdürülebilirliğini** doğrudan etkileyen çok boyutlu bir maliyet-fayda yapısı üretir. Bu çerçevede değerlendirme, CAPEX ve OPEX etkileri, yatırım geri dönüş oranı (ROI), iç kârlılık oranı (IRR), net bugünkü değer (NPV), karbon fiyatlamasının operasyonel maliyetlere yansımaları, enerji verimliliği teşvik mekanizmaları ve dijital dönüşüm yatırımlarının getirisi gibi göstergeler üzerinden yapılır.

Literatür, dijital verimlilik projelerinin tipik olarak **1–3 yıl** arasında değişen geri dönüş sürelerine, **%15–40 enerji tasarrufuna**, **%25–60 süreç verimliliği artışına** ve **%10–20 bakım maliyeti azalmasına** imkân tanıdığını ortaya koymaktadır [OECD, 2022; ICAP, 2023; World Bank, 2023]. Bu performans çıktıları, dijital dönüşümün hem çevresel hem de ekonomik ölçekte çift yönlü bir kaldıraç etkisi yarattığını göstermektedir.

5.3.7 Rebound Etkisi ve Dijital Verimlilik Yanılgıları: Karbon Yoğunluğu Perspektifi

Her verimlilik artışı, çevresel iyileşme yaratmaz. Bu durum literatürde "rebound effect" olarak bilinir [Brookings Institution, 2022].

Bu nedenle dijital verimlilik uygulamalarının karbon azaltımı üzerindeki etkisini değerlendirirken rebound etkisi özellikle dikkate alınmalıdır. Daha verimli sistemlerin sağladığı maliyet avantajı, kimi durumlarda üretim hacminin artmasına ve toplam emisyonların yükselmesine yol açabilmektedir (Brookings Institution, 2022). Dijital karbon yönetimi modelleri, bu riskleri analiz etmek için üretim ve tüketim dinamiklerini birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım gerektirir.

Örnekler:

- Daha verimli makineler → daha fazla üretim,
- Daha verimli filo → daha fazla seyahat,
- Daha hızlı bilgi işlem → daha fazla işlem yükü.

Bu nedenle e-verimlilik projeleri yalnızca verimlilik üzerinden değil, karbon yoğunluğu üzerinden ölçülmelidir [ISO 14067, 2018; IPCC, 2023].

5.4 Akıllı Sözleşmeler, Blokzincir Tabanlı Algoritmik Piyasalar ve Karbon Kredisi Yaşam Döngüsü

Dijital karbon yönetimi altyapısının önceki bölümlerde ortaya konan kriptografi, veri bütünlüğü, hibrit depolama ve dMRV temelleri üzerine inşa edilen bir diğer kritik bileşeni, karbon kredilerinin uçtan uca dijital yaşam döngüsünü yöneten akıllı sözleşmelerdir. Akıllı sözleşmeler; ölçümden doğrulamaya, tokenizasyondan ticarete, emeklilikten denetim izine kadar tüm süreçlerin otomatik, şeffaf ve uluslararası uyumlu bir biçimde yürütülmesini sağlayan teknik omurgayı oluşturur. Bu nedenle 5.4 bölümü, karbon kredilerinin analog sistemlerden blokzincir tabanlı ekosistemlere geçişini, bu dönüşümü mümkün kılan otomasyon mekanizmalarını ve algoritmik piyasa yapılarının yapı taşlarını detaylandırarak, dijital karbon ekonomisinin bütünsel işleyişini açıklamaktadır.

5.4.1 Karbon Kredilerinin Dijital Yaşam Döngüsü: Analog Piyasalardan Blokzincir Tabanlı Ekosisteme

Karbon kredisi yaşam döngüsü temelde beş aşamadan oluşur; ancak geleneksel piyasalarda bu aşamalar birbirinden kopuk kurumlar ve heterojen bilgi sistemleri tarafından yönetildiği için süreç çoğu zaman yavaş, doğrulanamaz ve hataya açık bir yapıya dönüşür [World Bank, 2023; ICAP, 2023; OECD, 2022].

Geleneksel Yaşam Döngüsü (Analog MRV + Merkezi Sicil) aşağıdaki adımları içerir:

- Proje tasarımı ve MRV planının oluşturulması
- Sahada manüel veri toplama
- Doğrulama sürecinin PDF temelli statik raporlarla yürütülmesi
- Sicile kayıt
- Ticaret işlemleri
- Emeklilik (retirement)

Bu model;

- çifte sayım riski,
- manipülasyona açık veri ortamları,
- 6–12 aya varan doğrulama gecikmeleri,
- sınırlı şeffaflık,
- üçüncü taraf doğrulayıcılara mutlak bağımlılık

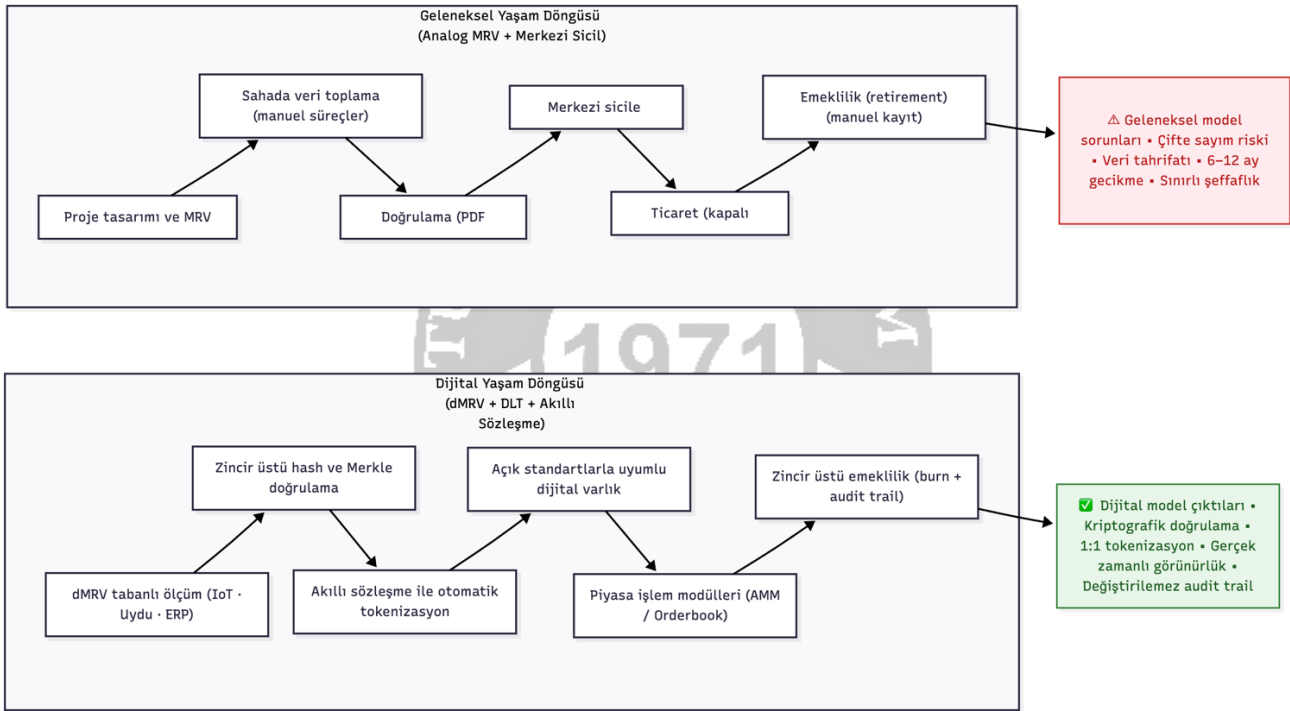
gibi yapısal sorunlar üretmektedir [World Bank, 2023; TSVCM, 2021].

Buna karşılık Yeni Dijital Yaşam Döngüsü (dMRV + DLT + Akıllı Sözleşmeler) birbirine entegre, kriptografik olarak doğrulanabilir ve otomasyon odaklı bir mimari sunar:

- dMRV temelli gerçek zamanlı ölçüm

- Zincir üstü hash ve Merkle doğrulama ile veri bütünlüğü kanıtı
- Akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatik tokenizasyon (minting)
- Uluslararası standartlarla uyumlu dijital varlık üretimi
- AMM veya orderbook tabanlı piyasa modüllerinde işlem
- Zincir üstü emeklilik (burn) mekanizması
- Tüm yaşam döngüsünün otomatik, değiştirilemez audit trail ile kaydı

Bu yeni modelde yaşam döngüsünün her adımı kriptografik olarak ispatlanabilir, süreçler dakikalar içinde tamamlanabilir ve veri bütünlüğü zincir üstü ispatlarla güvence altına alınır [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023; Toucan Protocol, 2022]. Ayrıca gönüllü karbon piyasalarında kullanılan tokenizasyon modelleri, geleneksel karbon kredilerinin blokzincir üzerinde 1:1 karşılık (one-to-one backing) ilkesine göre temsil edilmesini sağlayarak çevrim içi (on-chain) ve çevrim dışı (off-chain) kayıt sistemleri arasında tutarlı ve denetlenebilir bir köprü kurmaktadır [World Bank, 2023; Brookings Institution, 2022].



Şekil 0.25 Karbon kredisi yaşam döngüsünde geleneksel (analog MRV + merkezi sicil) model ile blokzincir tabanlı dijital (dMRV + DLT + akıllı sözleşme) modelin karşılaştırmalı yapısı

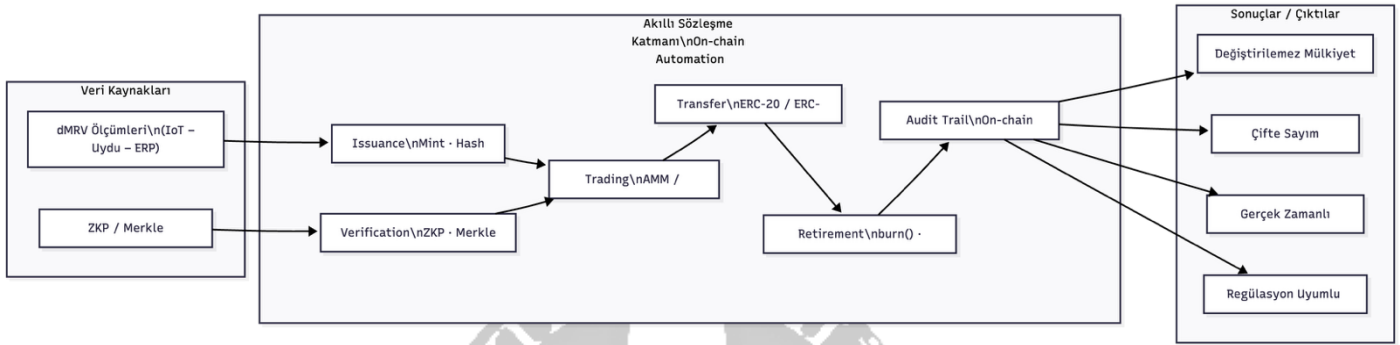
5.4.2 Akıllı Sözleşmelerin Karbon Ekonomisindeki Rolü

Akıllı sözleşmeler (smart contracts), karbon kredilerinin üretilmesi, doğrulanması, transfer edilmesi, koşula bağlı olarak kullanılması ve emekliye ayrılması gibi süreçleri kendi içinde tutarlı bir otomasyon çerçevesine oturtur; aynı zamanda mülkiyet geçmişinin zincir üzerinde otomatik biçimde kaydedilmesini sağlayarak veri bütünlüğünü güçlendirir [Ethereum Foundation, 2022; Toucan Protocol, 2022].

Bu otomasyonun giderek öne çıkan alanlarından biri, regülasyon uyumunun sözleşme düzeyinde kendiliğinden doğrulanabilmesidir. CSRD, IFRS S2 ve SEC iklim bildirim standartlarının gerektirdiği raporlama parametreleri, akıllı sözleşmelere gömülen kontrol mekanizmaları aracılığıyla otomatik olarak denetlenebilir; böylece uyum süreçleri hem daha hızlı işler hem de insan hatasına duyulan bağımlılık azalır (ISSB, 2023).

Tüm bu işleyiş, piyasa katılımcılarının operasyonel risklerini düşürürken karbon piyasalarında güvenilirlik ve şeffaflık düzeyini de belirgin biçimde artırmaktadır [World Bank, 2023; Brookings Institution, 2022].

Akıllı sözleşmeler hangi süreçleri otomatikleştirir?



Şekil 0.26Karbon kredisi yaşam döngüsünde akıllı sözleşmelerin otomatikleştirdiği süreçler ve ilgili teknik modüller

Süreç	Açıklama	Örnek Teknik Modül
Issuance	Kredinin oluşturulması	dMRV → Hash → Mint
Verification	Ölçüm verisinin doğrulanması	ZKP / Merkle Proof
Trading	Al-sat işlemleri	AMM / Orderbook
Transfer	Cüzdanlar arası aktarım	ERC-20 / ERC-1155
Retirement	Kredinin kullanılması	burn() fonksiyonu
Audit	Sicil geçmişi tutma	On-chain logging

Neden gereklidir?

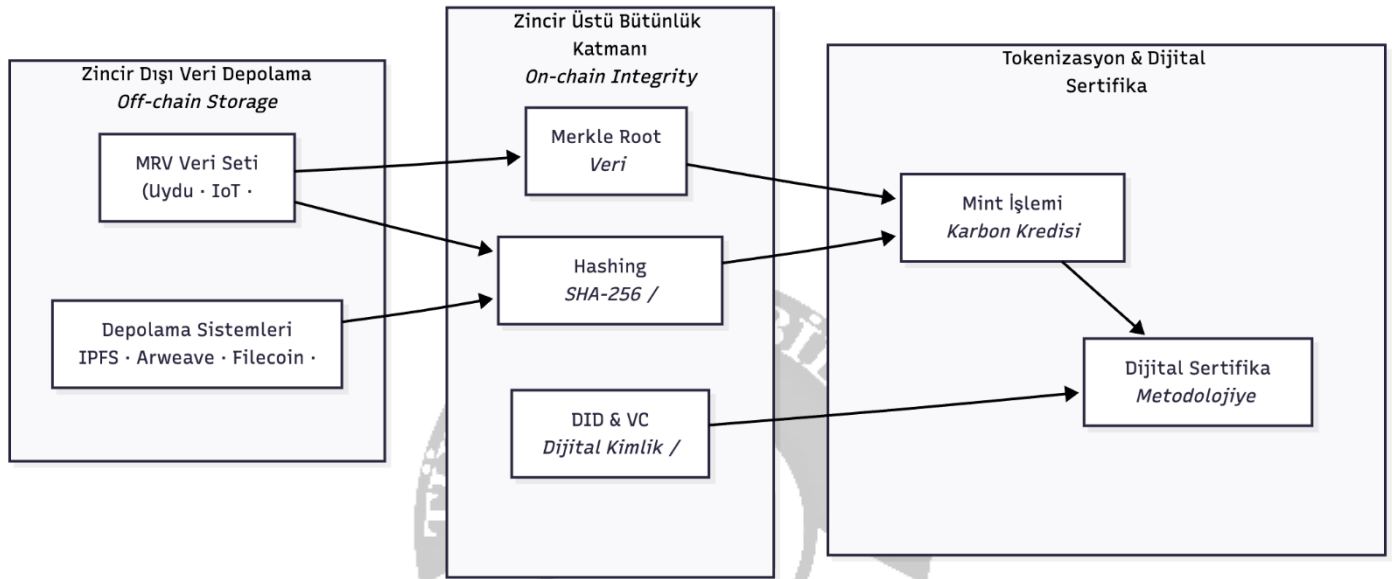
Çünkü geleneksel karbon piyasaları:

- manuel süreçlere dayanır
 - merkezileşmiş veri tabanı kullanır
 - şeffaf değildir
 - küresel uyumluluk sorunu taşır
- [World Bank, 2023; TSVCM, 2021].

Akıllı sözleşmeler ise: güvenli, denetlenebilir, modüler, otomatik, uluslararası uyumlu, zaman damgalı kayıt üreten, değiştirilemez bir altyapı sunar [Ethereum Foundation, 2022; MIT DCI, 2022].

5.4.3 Dijital Sertifikasyon: Dağıtık Defter Teknolojileri ile Karbon Piyasalarında Güven ve Bütünlük

DLT tabanlı karbon yönetimi, dört temel bileşeni içerir [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023]:



Şekil 0.27Dijital sertifikasyon sürecinde zincir üstü bütünlük, zincir dışı veri depolama ve kimlik/sertifika üretiminin ilişkisi

- **Zincir Üstü Veri Bütünlüğü (On-chain Hashing)** : MRV verisi doğrudan zincire yazılmaz. Bunun yerine,
 - SHA-256 (veya Keccak256) hash'i,
 - Merkle ağacı kök değeri (Merkle Root)

kayıt altına alınır. Bu, verinin değiştirildiğinde hemen tespit edilmesini sağlar [MIT DCI, 2022].

- **Zincir Dışı Veri Depolama (Off-chain Storage)** : Karbon belgelerinin tamamı zincirde saklanamaz. Genellikle şu çözümler tercih edilir:
 - IPFS,
 - Arweave,
 - Filecoin,
 - S3 benzeri depolama,
 - kurumsal veri gölleri (enterprise datalake).

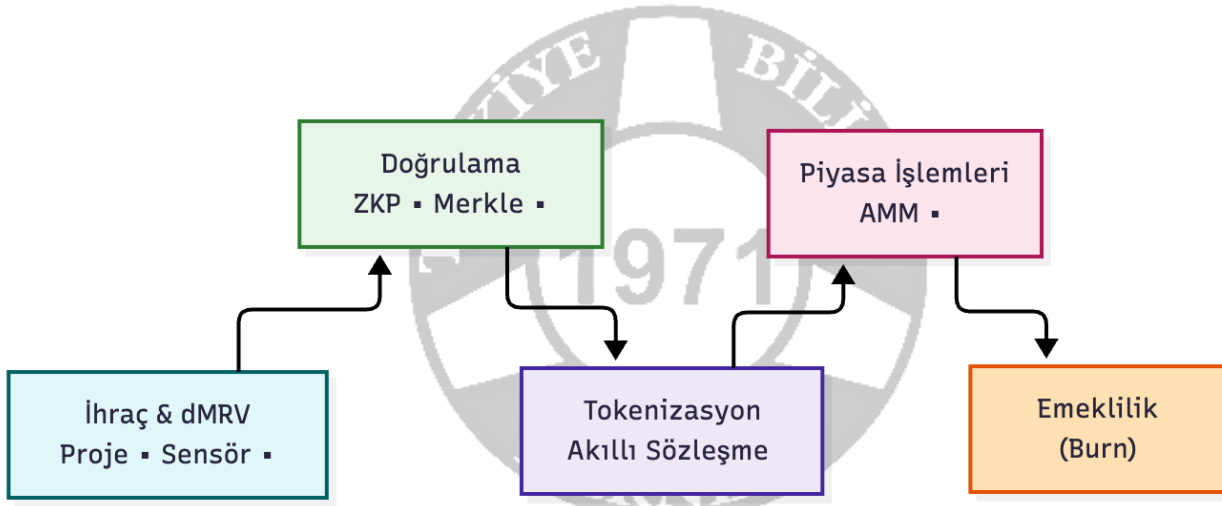
Bu yapı, hem maliyet hem de ölçeklenebilirlik açısından hibrit bir mimari sunar [Toucan Protocol, 2022].

- **Dijital Sertifika Üretimi** : Doğrulan MRV verisinden token üretimi (mint işlemi) yapılır. Bu tokenlar, ilgili metodolojiye uygun karbon kredisi olarak dijital sicile kaydedilir [Verra, 2022; Gold Standard, 2023].
- **Dijital Kimlik ve İmza** : Her işlem,
 - DID (Decentralized Identifier),
 - VC (Verifiable Credential),
 - ECDSA / Ed25519 imzaları

ile imzalanır. Bu yapı, karbon kredilerinin orijin, sahiplik, kullanım ve transfer geçmişini tek bir zincirsel defterde saklar [Hedera Guardian, 2023; MIT DCI, 2022].

5.4.4 Karbon Kredisi Yaşam Döngüsü – Teknik Diyagram

Aşağıdaki model, dijital karbon kredisi yaşam döngüsünü teknik olarak göstermektedir:



Şekil 0.28Dijital Karbon Kredisi Yaşam Döngüsü – dMRV’den Tokenizasyona [World Bank, 2023; MIT DCI, 2022; Toucan Protocol, 2022]

5.4.5 Algoritmik Karbon Piyasaları: AMM, Orderbook ve DeFi Likidite Yapıları

Dijital karbon piyasaları yalnızca al-sat işlemlerinden oluşmaz; artık algoritmik piyasa yapıları kullanılmaktadır [World Bank, 2023; Brookings Institution, 2022].

- **Orderbook Modeli (Coinbase, Kraken tarzı)** : Emir defterine dayanır. Kurumsal yatırımcılar için uygundur [ICAP, 2023].
- **AMM (Automated Market Maker) Modeli** : Likidite havuzları kullanılır. Karbon kredileri USDC, EURC, ETH gibi varlıklarla takas edilebilir. Toucan, KlimaDAO, C3 gibi projeler bu modelin öncüleridir [Toucan Protocol, 2022;]

TSVCM, 2021]. AMM tabanlı fiyat keşfine ilişkin en bilinen örneklerden biri, karbon kredilerinin tokenleştirilmiş biçimlerini likidite havuzlarında işleyen KlimaDAO ekosistemidir. Bu modelde karbon varlıkları, USDC ve benzeri sabit kripto varlıklarla otomatik olarak eşleştirilerek şeffaf ve izlenebilir bir fiyat oluşumu sağlanır (Toucan Protocol, 2022). Bu yaklaşım, karbon piyasalarında uzun süredir eleştirilen fiyat şeffaflığı sorununa teknik bir çözüm sunmaktadır.

- **Hibrid Model** : Hem AMM hem orderbook mantığı içerir. Kurumlara daha istikrarlı fiyat ve likidite sağlar [Brookings Institution, 2022].
- **ZKP Destekli Gizli İşlemler** : Karbon piyasalarında ticari gizlilik önemlidir. ZKP ile, fiyat, miktar, taraf bilgisi gizli kalabilir, ancak işlemin doğruluğu ispatlanabilir [MIT DCI, 2022].

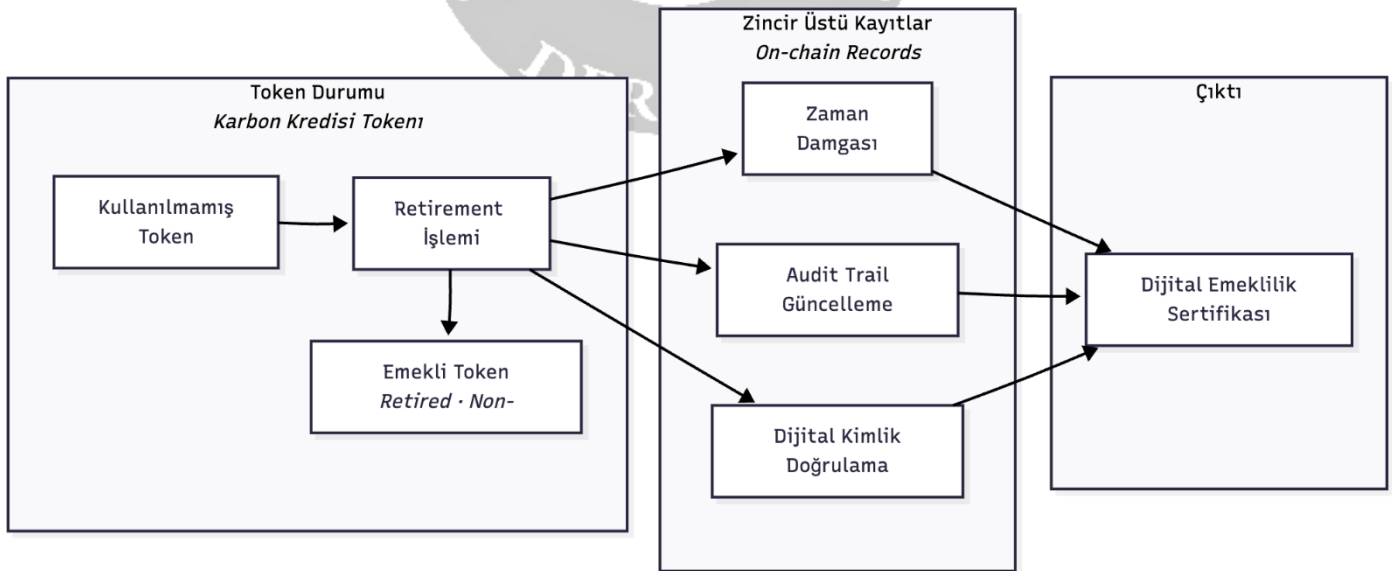
5.4.6 Emeklilik (Retirement) Sürecinin Dijitalleşmesi

Bir karbon kredisi kullanıldığında emekliye ayrılır. Bu süreç geleneksel piyasalarda PDF üzerinden yapıldı [Verra, 2022; Gold Standard, 2023].

Dijital modelde:

- burn() metodu ile token yok edilir,
- işlem kimliklenir,
- kullanıcıya dijital sertifika üretilir,
- zincire zaman damgası düşülür,
- audit trail güncellenir.

Bu yapının en büyük avantajı: Aynı kredi ikinci kez kullanılamaz (double-claim engellenir) [World Bank, 2023; ICAP, 2023].



Şekil 0.29Zincir Üstü Emeklilik (Retirement) Süreci – Token Yakımı, Zaman Damgası ve Audit Trail Güncellemesi

5.4.7 Dijital Karbon Ekosisteminin Yönetişim ve Regülasyon Uyum Boyutu

DLT tabanlı karbon piyasalarının yönetişi:

- DAO modelleri,
- oylama mekanizmaları,
- teşvik altyapıları,
- risk kontrol modülleri,
- düzenleyici uyumluluk API'leri,
- uluslararası veri köprüleri (interoperability bridges)

gibi yeni araçlara sahiptir [MIT DCI, 2022; Ethereum Foundation, 2022].

Örneğin, ITMO kayıtları ile özel karbon piyasalarının birbirine bağlanması artık teknik olarak mümkündür [World Bank, 2023; ICAP, 2023; TSVCM, 2021].

5.5 Dijital Sürdürülebilirlik Raporlaması: ESG, Blokzincir Tabanlı Audit Trail ve Regülasyon Uyum Mimarileri

Sürdürülebilirlik raporlaması, işletmelerin çevresel, sosyal ve yönetim (Environmental, Social, Governance – ESG) performanslarını şeffaf biçimde sunmalarını sağlayan kurumsal bir gerekliliktir. Ancak 2024 sonrası dönemde sürdürülebilirlik raporlaması yalnızca bir iletişim aracı değil, dijital doğrulama altyapısına sahip teknik bir veri yönetimi süreci haline gelmiştir. Bu dönüşümün temel nedeni; hem düzenleyici kurumların hem de yatırımcıların talep ettiği "doğrulanabilir, standartlaştırılmış, audit edilebilir ve karşılaştırılabilir" veri ihtiyacıdır [TCFD, 2021; GRI, 2021; IPCC, 2023].

Özellikle AB CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), ESRS (European Sustainability Reporting Standards), SEC İklim Düzenlemeleri, TCFD, ISSB IFRS S1–S2, SASB ve GRI gibi uluslararası çerçeveler; sürdürülebilirlik raporlamasını finansal raporlamaya benzer düzeyde denetlenebilir bir süreç haline getirmiştir. Bu çerçeveler, karbon yoğunluklarından su kullanımına, tedarikçi risk analizinden sosyal etki göstergelerine kadar geniş bir veri kümesinin teknik olarak doğrulanabilir formatlarda tutulmasını zorunlu kılmaktadır [EFRAG, 2023; ISSB – IFRS Foundation, 2023; SEC, 2024; GRI, 2021].

Bu gereklilikler sürdürülebilirlik raporlamasını kâğıt veya PDF formatındaki dosyalardan çıkarıp, dijital veri ambarları, blockchain tabanlı audit trail sistemleri, yapay zekâ destekli raporlama motorları ve kurumsal veri entegrasyon katmanları üzerine oturtmaktadır [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023; Deloitte, 2023; PwC, 2022].

5.5.1 ESG Veri Modeli ve Kurumsal Veri Ekosisteminin Yeniden Tasarımı

Bir ESG raporunun güvenilir olabilmesi için kullanılan veri kümelerinin: *kaynağı belli, standardize edilmiş, doğrulanabilir, zaman damgalı, değiştirilemez kayıtlarla korunmuş, referanslanabilir* olması gerekir [ISO 14064-1,

2018; GRI, 2021]. Bu gerekliliklerin sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilmesi için, uluslararası veri standartlarının benimsenmesi zorunlu hâle gelmiştir. WBCSD PACT çerçevesi, GHG Protocol veri şeması ve OpenFootprint girişi; kurumlar arası veri paylaşımında ortak bir dil oluşturarak sistemler arasındaki bağlantısını güçlendirir. Bu standartlar, hem raporlamanın tutarlılığını artırır hem de dijital audit trail süreçlerinin birlikte çalışabilirliğini destekler.

ESG veri modelinin bileşenleri:

- **Çevresel (E) Veriler**

- Kapsam 1–2–3 emisyonları
- Enerji tüketim profilleri
- Su kullanımı
- Atık yönetimi
- Hammadde yoğunlukları
- Arazi kullanımı, biyolojik çeşitlilik etkisi

- **Sosyal (S) Veriler**

- İş sağlığı ve güvenliği
- Çalışan çeşitliliği
- Tedarikçi sosyal uygunluk sonuçları
- Toplumsal etki metrikleri

- **Yönetişim (G) Verileri**

- Etik ve uyum denetimleri
- Yolsuzluk risk göstergeleri
- Yönetim kurulunda çeşitlilik
- Veri gizliliği ve siber güvenlik politikaları



Bu veri alanlarının bir arada yönetilmesi için kurumlarda ESG Data Lake, Veri Ambarı (Data Warehouse) veya Dijital Sürdürülebilirlik Platformu kurulması gereklidir [PwC, 2022; Deloitte, 2023; IBM, 2023].

5.5.2 Değiştirilemez Kayıt (Immutable Audit Trail): Blokzincir Tabanlı Dijital Güvenin Temeli

Sürdürülebilirlik raporlamanın en büyük zorluklarından biri verinin manipüle edilebilir olmasıdır. Örneğin:

- bir fabrikanın enerji tüketimi gerçekte olduğundan düşük gösterilebilir,
- bir tedarikçinin karbon yoğunluğu yanlış raporlanabilir,
- bir sosyal etki göstergesi gerçeği yansıtmayabilir [PwC, 2022].

Bu nedenle kurumsal sürdürülebilirlik sistemlerinde audit trail (denetim izi) mekanizması olmak zorundadır [TCFD, 2021; GRI, 2021].

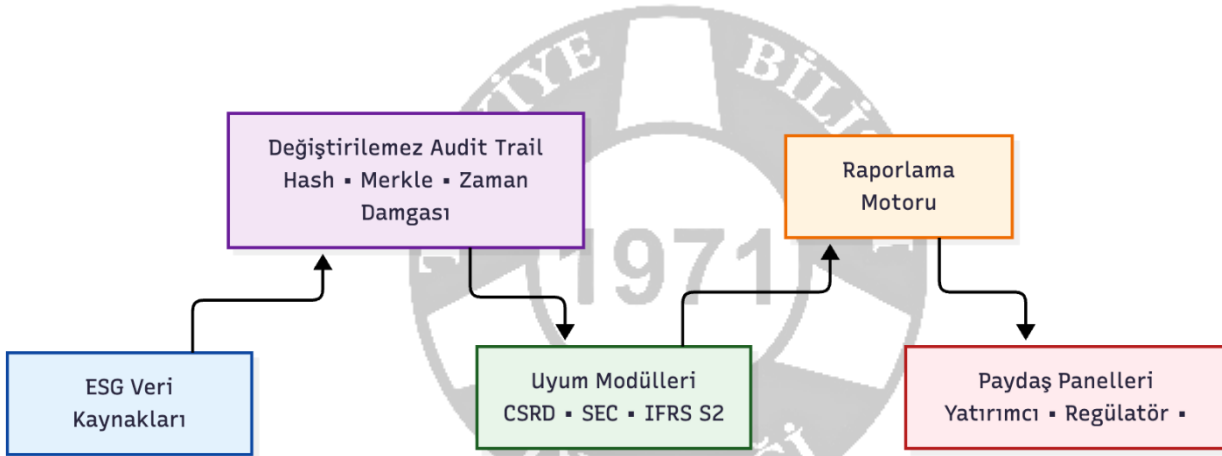
Blockchain tabanlı audit trail neden gereklidir?

- Verinin sonradan değiştirilemeyeceğini garanti eder,
- her girişin zaman damgası ve imzası vardır,
- kaynak verinin kim tarafından üretildiği bellidir,
- tüm geçmiş kayıt zincir üzerinde doğrulanabilir,
- denetim sürecini hızlandırır,
- kurum–yatırımcı–regülatör arasında güven tesis eder.

Audit trail olmadan üretilen ESG raporları, yalnızca "kurumsal beyan" niteliği taşır; bilimsel ve regülasyonel geçerliliği olmaz [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023].

5.5.3 Dijital Sürdürülebilirlik Raporlama Mimarisi

Aşağıdaki diyagram ESG veri kaynaklarının audit trail → uyum → raporlama döngüsünü nasıl oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 0.30Dijital ESG Raporlama Süreci – Audit Trail'den Paydaş Panellerine [EFRAG, 2023; ISSB – IFRS Foundation, 2023; GRI, 2021]

Yapay Zekâ Destekli Raporlama Motorları ve Otomatik Veri Analitiği

Geleneksel ESG raporlamasında veri toplama ve analiz süreçleri oldukça zaman alır. 2023 araştırmalarına göre büyük şirketlerde ESG verisi toplama süreci yılda ortalama 6–12 ay sürmektedir [Deloitte, 2023; PwC, 2022].

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı raporlama motorları bu süreci radikal biçimde dönüştürür.

YZ destekli raporlama motorları:

- eksik veri doldurma (imputation),
- emisyon eğilim analizi,
- tedarik zinciri risk taraması,

- anomali tespiti (abnormal veri saptama),
- veri kalite kontrolü,
- otomatik 3. taraf doğrulama önerileri,
- uyum metriklerinin otomatik geçirilmesi

gibi süreçleri saniyeler içinde gerçekleştirir [Deloitte, 2023; Google Research, 2022; IBM, 2023].

5.5.4 Büyük kurumlarda etkisi:

Süreç	Geleneksel	Dijital / YZ
Veri toplama	6–12 ay	Dakikalar–günler
Veri doğrulama	2–6 ay	Anlık / Otomatik
Raporlama	3 ay	1 dakika–1 gün
Denetim	1–3 ay	Zincir üzerinden saniyeler

Yapay zekânın dijital sürdürülebilirlik raporlamasına etkisi, finansal denetimin XBRL ile dönüşmesine benzer bir yapısal dönüşümdür [ISSB – IFRS Foundation, 2023; Deloitte, 2023].

5.5.5 Regülasyon Uyum Mimarileri: CSRD, SEC, IFRS S2 ve Yerel Düzenlemeler

Kurumlar sürdürülebilirlik verilerini yalnızca iç analiz için değil, dış paydaşlara raporlamak ve resmi regülasyonlara uyum sağlamak için toplar.

En kritik uyum çerçeveleri şunlardır:

- **CSRD / ESRS** : AB’de 50.000’den fazla şirket için zorunludur. E1 standardı karbon ve enerji verilerini teknik formatlarda ister [EFRAG, 2023; European Commission, 2023].
- **SEC İklim Bildirimi (ABD)** : Halka açık şirketler kapsam 1–2–3 veriyi dijital olarak sunmak zorundadır [SEC, 2024].
- **IFRS S1–S2 (ISSB)** : Finansal raporlama ile sürdürülebilirlik raporlamasını entegre eder [ISSB – IFRS Foundation, 2023].
- **TCFD** : Risk yönetimi ve yönetim odaklıdır [TCFD, 2021].
- **Türkiye – Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TFRS S1–S2)** : 2024 itibarıyla Türk şirketleri için uyum gereklidir [IPCC, 2023]. Dijital sürdürülebilirlik platformları bu standartların tümüyle uyumlu veri şemaları üretmelidir [GRI, 2021; PwC, 2022].

Bu uyum çerçevelerinin ortak noktası, dijital MRV verilerinin yalnızca teknik doğruluğunu değil, aynı zamanda işletmelerin hukuki sorumluluğunu da belirlemesidir. CSRD, CBAM ve SEC standartları, yanlış ya da eksik raporlamayı ciddi idari yaptırımlar ve finansal sonuçlar doğurabilecek bir yükümlülük alanı olarak tanımlar. Bu

nedenle veri üretiminin geriye dönük izlenebilirliği ve değiştirilemezliği, teknik bir zorunlulukları aşarak doğrudan yasal bir gereklilik hâline gelmektedir.

5.5.6 Paydaş Şeffaflığı, Kurumsal Güven ve Veri Görselleştirme

ESG verisinin değer kazanabilmesi için doğru paydaşlara doğru formatta aktarılması gerekir:

- Yönetim kurulu
- Yatırımcılar
- Bankalar
- Düzenleyici kurumlar
- Sivil toplum
- Çalışanlar
- Tedarikçiler

Bu nedenle modern raporlama sistemleri dinamik gösterge panelleri (dashboard) içerir. Karbon yoğunluğu (kgCO₂e), enerji verimliliği, sosyal performans skorları gibi metrikler anlık olarak görüntülenebilir [Deloitte, 2023; IBM, 2023].

Bu panellerde:

- trend analizleri
- kıyaslamalar
- risk göstergeleri
- hedef sapma uyarıları
- sinyal tabanlı karar tavsiyeleri yer alır [PwC, 2022].

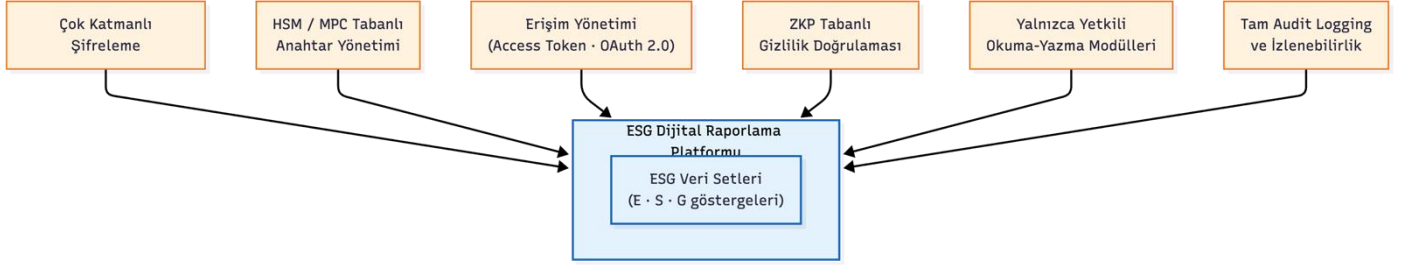
5.5.7 Dijital Raporlamada Güvenlik, Gizlilik ve Erişim Hakları

Dijital ESG verileri hassastır.

Bu nedenle şu güvenlik katmanları zorunludur:

- Çok katmanlı şifreleme (AES-256, TLS 1.3)
- HSM tabanlı anahtar yönetimi
- Yalnızca yetkili kullanıcılara açık okuma-yazma modülleri
- ZKP ile veri gizlilik doğrulaması
- Access Token / OAuth 2.0 tabanlı erişim yönetimi
- Tam audit logging sistemi

Bu mekanizmalar olmadan sürdürülebilirlik verileri üçüncü taraflara (ör. tedarikçiler, denetçiler, yatırımcılar) güvenle aktarılamaz [MIT DCI, 2022; Hedera Guardian, 2023; IBM, 2023].



Şekil 0.31 Dijital ESG Raporlamasında Güvenlik, Gizlilik ve Erişim Katmanları

5.6 Kurumsal Dijital Karbon Yönetimi Platformları: IoT, Yapay Zekâ, Uydu MRV, Blokzincir ve Çok Katmanlı Entegrasyon

Kurumsal karbon yönetimi, yalnızca emisyonların ölçülmesi ve raporlanması değil; aynı zamanda kurumsal operasyonların, tedarik zincirlerinin ve enerji tüketim döngülerinin dijital olarak yönetildiği çok katmanlı bir karar destek sistemidir. Modern işletmeler için karbon yönetimi, finansal performans, risk yönetimi, sürdürülebilirlik, regülasyon uyumu ve operasyonel verimliliğin kesişim noktasında yer almaktadır [IPCC, 2023; OECD, 2022].

Geleneksel karbon yönetimi uygulamaları, verilerin manuel toplanması ve yıllık raporlamaya dayanan yavaş bir yapıya sahipti. Ancak günümüzde karbon yönetimi:

- IoT tabanlı anlık veri toplama,
- uydu görüntüleriyle arazi/emisyon doğrulama,
- yapay zekâ ile tahmine dayalı analiz,
- blokzincir altyapısıyla veri bütünlüğü,
- otomatik senaryo simülasyonları,
- tedarik zinciri emisyon entegrasyonu,
- etkileşimli karbon panelleri,
- regülasyon uyum API'leri

gibi sistemlerle tamamen dijital ve bütünleşik bir yapıya dönüşmüştür [IEA, 2022; IEA, 2023; MIT DCI, 2022; IBM, 2023].

Bu bölüm, modern kurumsal karbon yönetimi platformlarının teknik mimarisini, veri akışlarını, doğrulama süreçlerini ve operasyonel etkilerini detaylı bir biçimde açıklamaktadır [World Economic Forum, 2022; Deloitte, 2023].

5.6.1 IoT Tabanlı Karbon Ölçümü: Gerçek Zamanlı Veri Ekosistemi

Kurumsal karbon hesaplamasının en kritik adımı "ölçüm"dür. Ölçüm ne kadar doğru ve sık gerçekleşirse:

- karbon yoğunluğu hesaplamaları,
- süreç iyileştirme kararları,
- enerji optimizasyonu,

- karbon azaltım fırsatları o kadar güvenilir olur [ISO 14064-1, 2018; IEA, 2023].

IoT sensörleri, karbon yönetiminin ölçüm katmanını oluşturan temel alt yapıdır [IEA, 2022; World Economic Forum, 2022].

IoT ile ölçülen temel metrikler:

- elektrik tüketimi,
- yakıt tüketimi,
- proses ısısı,
- baca gazı akışı,
- metan / VOC sızıntıları,
- su tüketimi,
- üretim miktarı,
- makine çalışma saatleri,
- filo yakıt kullanımı.

Teknik gereklilikler:

- MQTT / AMQP veri protokolleri,
- zaman damgası (timestamp) bütünlüğü,
- sensör sertifikasyonu,
- edge analytics (yerinde veri işleme),
- sensör kimlik doğrulama (device identity).

Güncel araştırmalar, IoT tabanlı karbon ölçümünün manuel MRV'ye göre %50–90 daha düşük hata payı sağladığını göstermektedir [IEA, 2023; IBM, 2023].

5.6.2 Uydu MRV: Arazi Kullanımı, Metan Sızıntısı ve Uzaktan Doğrulama

Uydu ölçüm teknolojileri, karbon yönetiminde özellikle tarım, orman, petrol/gaz ve ağır sanayi sektörlerinde kritik bir bileşendir [ESA, 2023; NASA, 2023].

Uydu MRV'nin avantajları:

- geniş alanların sürekli izlenmesi,
- arazi kullanım değişikliği (LULUCF) ölçümü,
- orman karbon stok analizi,
- metan sızıntısının tespiti,
- su yüzeyi/tarım verimliliği analizi,
- sıcaklık haritaları,
- hava kalitesi ölçümleri.

Kullanılan uydu sistemleri:

- ESA Sentinel-2 & Sentinel-5P,
- NASA Landsat 8–9,
- Planet Labs yüksek çözünürlüklü LEO uyduları,
- GHGSat metan ölçüm uyduları.

Bu veriler, IoT tabanlı verilerle birleştirildiğinde çok daha doğru bir karbon yönetim altyapısı oluşur [GHGSat, 2022; Planet Labs, 2023].

5.6.3 Yapay Zekâ ile Karbon Analizi: Tahmin, Simülasyon ve Anomali Tespiti

Yapay zekâ, karbon yönetim platformlarının karar destek sistemidir [Google Research, 2022; IBM, 2023].

YZ'nin karbon yönetiminde temel işlevleri:

- **Tahmine Dayalı Emisyon Modelleme** : Makine öğrenmesi ile:
 - üretim hacmine göre emisyon tahmini,
 - enerji talep tahmini,
 - emisyon eğilim tahmini yapılabilir [Google Research, 2022; Deloitte, 2023].
- **Anomali Tespiti** : YZ, normal operasyon dışındaki anomalileri saniyeler içinde tespit edebilir:
 - anormal yüksek enerji tüketimi,
 - metan sızıntıları,
 - beklenmeyen karbon yoğunluğu artışları,
 - cihaz arızası kaynaklı tüketim artışları [IBM, 2023].
- **Karbon Azaltım Simülasyonları** : YZ, alternatif senaryolar üretir:
 - enerji verimliliği yatırımı,
 - proses optimizasyonu,
 - yakıt türü değişimi,
 - tedarikçi değişikliği

gibi kararların karbon etkisini önceden hesaplar [Deloitte, 2023; OECD, 2022].

Süreç Öneri Motorları : "Karbon azaltımı için şu parametreyi düşür", "bu makineyi şu saatlerde çalıştır" gibi öneriler üretir. Bu özellikler, karbon yönetimini reaktif bir süreçten proaktif bir süreç haline getirir [Deloitte, 2023; Google Research, 2022].

5.6.4 Tedarik Zinciri Emisyonları (Scope 3), Çok Katmanlı Veri Entegrasyonu ve Blokzincir Tabanlı Doğrulama

Kurumların en karmaşık karbon alanı kapsam 3 emisyonlarıdır. Çünkü bu emisyonlar tedarikçilerin, müşterilerin ve lojistik süreçlerin karbon etkisini içerir [IPCC, 2023; ISO 14083, 2023].

Scope 3 neden zordur?

- veri çoğu zaman şirketin kontrolünde değildir,
- tedarikçi olgunluk seviyesi farklıdır,
- ölçüm yerine tahmine dayalı faktörler kullanılır,
- çok farklı sektörlere yayılan veri gerektirir [OECD, 2022; PwC, 2022].

Dijital entegrasyon çözümü:

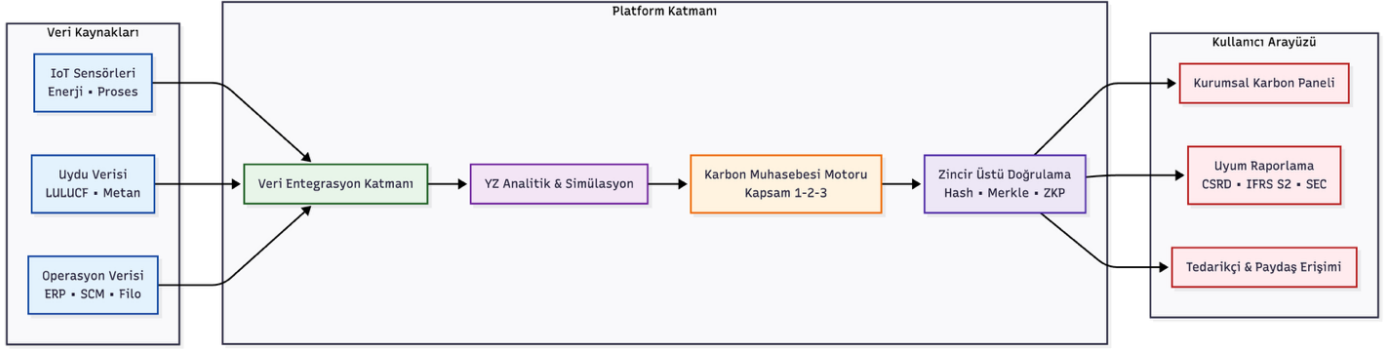
- tedarikçi API bağlantıları,
- dijital karbon pasaportları (product carbon footprint – PCF),
- lojistik rota analizi,
- emisyon faktörü modellemesi,
- blockchain tabanlı tedarik zinciri doğrulaması.

Bu yapı, kapsam 3'ün daha doğru hesaplanmasını sağlar [World Bank, 2023; ICAP, 2023; MIT DCI, 2022].

Kapsam 3'e ilişkin bu zorlukların aşılmasında ürün bazlı karbon ayak izi (PCF) ve dijital karbon pasaportları giderek daha merkezi bir araç hâline gelmektedir. PCF yaklaşımı, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca üretilen emisyonların tekil bir kimlik altında toplanmasını sağlayarak hem tedarik zinciri boyunca şeffaflığı artırır hem de CBAM gibi düzenlemelere uyumu kolaylaştırır. Bu doğrulanabilir yapı, kurumların ürün düzeyinde daha doğru ve bütüncül bir karbon yönetimi stratejisi geliştirmesine imkân tanır.

5.6.5 Entegre Dijital Karbon Yönetimi Mimarisi ve Kurumsal Platform Tasarımı

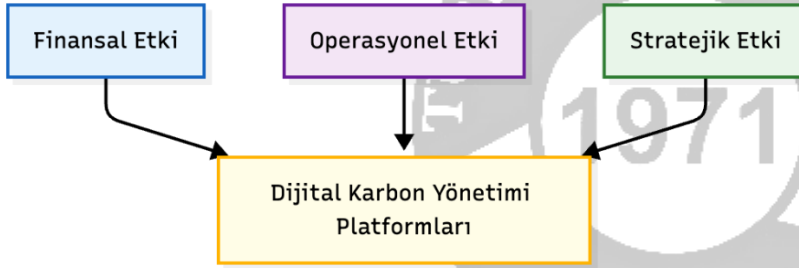
Aşağıdaki model, modern bir kurumsal karbon yönetim platformunun teknik mimarisini göstermektedir.



Şekil 0.32 Entegre Dijital Karbon Yönetimi Platformu – Çok Katmanlı Mimari [World Economic Forum, 2022; IEA, 2023; MIT DCI, 2022]

5.6.6 Kurumsal Etkiler: Finansal, Operasyonel ve Stratejik Dönüşüm

Dijital karbon yönetimi platformlarının işletmelere etkisi üç temel boyutta değerlendirilir: **finansal, operasyonel ve stratejik**.



Şekil 0.33 Finansal, Operasyonel ve Stratejik Etkilerin Dijital Karbon Yönetimi Platformlarına Katkısı

Finansal boyutta, dijital karbon yönetimi altyapıları kurumların karbon fiyatlamasından kaynaklanan risklerini azaltarak bütçe öngörülebilirliğini güçlendirmekte; enerji verimliliği uygulamaları sayesinde CAPEX ve OPEX üzerinde doğrudan optimizasyon sağlamaktadır. Ayrıca CBAM ve ulusal/uluslararası ETS rejimlerine uyum maliyetlerini düşürmekte, süreç verimsizliklerinden doğan kayıpları azaltmakta ve karbon yönetimi çerçevesinde erişilebilen teşvik ve hibelere uygunluk kapasitesini artırmaktadır [World Bank, 2023; ICAP, 2023; OECD, 2022].

Operasyonel düzeyde bu platformlar, kurumsal süreçlere ilişkin **gerçek zamanlı görünürlük** sağlayarak karar verme mekanizmalarının doğruluğunu artırmakta; yapay zekâ destekli kestirimci bakım algoritmalarıyla bakım maliyetlerini düşürmekte; veri destekli üretim planlaması sayesinde operasyonel verimliliği yükseltmekte; tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği güçlendirerek kapsam 1–2–3 emisyon hesaplamalarında veri tutarlılığı ve kalite sorunlarını minimize etmektedir [IEA, 2023; IBM, 2023].

Stratejik açıdan bakıldığında dijital karbon yönetimi, karbon nötr stratejilerinin izlenebilirliğini artırarak yönetim kalitesini güçlendirmekte; kurumsal sürdürülebilirlik performansının şeffaf raporlanmasını sağlayarak yatırımcı güvenini artırmakta; sürdürülebilirlik performansının rekabet avantajı yaratmasına imkân tanımakta; kurum içinde

dijital dönüşüm kültürünün yerleşmesine katkı sağlamak ve regülasyon uyumu süreçlerinde riskleri azaltmaktadır [IPCC, 2023; EFRAG, 2023; ISSB – IFRS Foundation, 2023].

Bu üç etki alanı bir arada değerlendirildiğinde, dijital karbon yönetimi platformlarının kurumların **temel dijital altyapısının ayrılmaz ve stratejik bir bileşeni** haline geldiği görülmektedir. Bu nedenle modern işletmeler için dijital karbon yönetimi artık yalnızca çevresel bir uygulama değil, aynı zamanda sürdürülebilir finans, operasyonel etkililik ve uzun vadeli kurumsal dayanıklılık açısından kritik bir gerekliliktir [Deloitte, 2023; PwC, 2022].

5.6.7 Sonuç: Dijital ve Blokzincir Tabanlı Karbon Yönetimi, Kurumsal Dayanıklılığın Temelidir

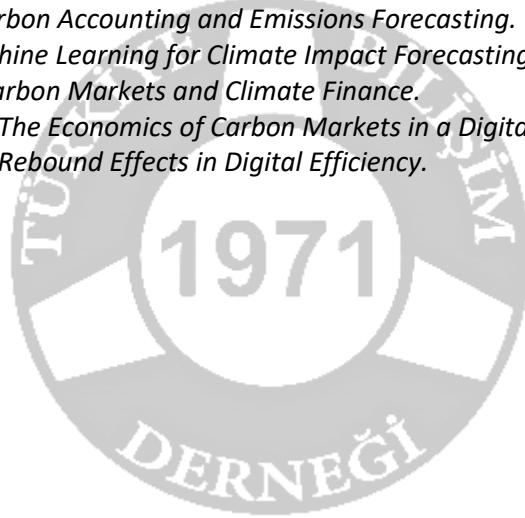
IoT, uydu teknolojileri, yapay zekâ, blokzincir ve tedarik zinciri entegrasyonunu bütünleştiren dijital platformlar, modern kurumların karbon nötrlük hedeflerine ulaşabilmesi için kritik bir altyapı sunmaktadır [IPCC, 2023; MIT DCI, 2022; World Bank, 2023]. Bu bütünleşik mimari, karbon yönetiminin ölçümden doğrulamaya, veri analizinden raporlamaya, uyum süreçlerinden senaryo simülasyonlarına ve nihayet karar destek mekanizmalarına kadar tüm katmanlarını tek bir çatı altında toplayarak kurumsal sürdürülebilirliğin teknik omurgasını oluşturur [ISO 14064-1, 2018; GRI, 2021]. Dolayısıyla dijital karbon yönetimi, yalnızca bir teknoloji yatırımı olmanın ötesine geçerek kurumların dayanıklılığını artıran, geleceğe yönelik hazırlığını güçlendiren ve sürdürülebilir rekabet üstünlüğünü destekleyen stratejik bir bileşen hâline gelmektedir [OECD, 2022; Deloitte, 2023].

5.7 Kaynakça

Aşağıdaki referanslar, 5.1–5.6 arasında kullanılan tüm teknik, akademik ve düzenleyici kaynakların bütünüdür.

1. **IPCC (2023).** *Sixth Assessment Report (AR6) – Mitigation of Climate Change.*
2. **International Carbon Action Partnership – ICAP (2023).** *Emissions Trading Worldwide Report.*
3. **TSVCM (2021).** *Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets – Final Report.*
4. **World Bank (2023).** *State and Trends of Carbon Pricing 2023.*
5. **European Commission (2023).** *Regulation (EU) 2023/956 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM).*
6. **European Financial Reporting Advisory Group – EFRAG (2023).** *European Sustainability Reporting Standards (ESRS).*
7. **ISSB – IFRS Foundation (2023).** *IFRS S1 and IFRS S2: General Sustainability & Climate-Related Disclosures.*
8. **SEC (2024).** *The Enhancement and Standardization of Climate-Related Disclosures for Investors.*
9. **GRI (2021).** *Global Reporting Initiative Standards – Universal Standards.*
10. **ISO 14064-1 (2018).** *Greenhouse gases — Part 1: Quantification and reporting at the organization level.*
11. **ISO 14083 (2023).** *Greenhouse gases — Quantification and reporting of emissions from transport chain operations.*
12. **ISO 14067 (2018).** *Carbon footprint of products — Requirements and guidelines.*
13. **Verra (2022).** *Verified Carbon Standard – Program Guide.*
14. **Gold Standard (2023).** *Methodology Standards and Verification Framework.*
15. **MIT DCI (2022).** *Blockchain & Climate: Opportunities for Digital MRV.*
16. **International Energy Agency – IEA (2022).** *Digital Demand-Driven Electricity Systems.*

17. **International Energy Agency – IEA (2023).** *Digitalization and Energy Efficiency.*
18. **OECD (2021).** *Digital Transformation of SMEs: Trends and Policies.*
19. **World Economic Forum (2022).** *Industrial IoT for Energy Efficiency.*
20. **McKinsey (2021).** *Digital Twins: Creating Operational Excellence in Industry 4.0.*
21. **Ethereum Foundation (2022).** *ERC Token Standards Documentation (ERC-20, ERC-1155, ERC-3525).*
22. **Ethereum Foundation (2022).** *The Merge Energy Analysis Report.*
23. **Hedera Guardian (2023).** *Open Source Digital MRV & Tokenization Framework.*
24. **Climate Action Data Trust – CADT (2023).** *Technical Whitepaper.*
25. **Toucan Protocol (2022).** *Digital Carbon Market Infrastructure Whitepaper.*
26. **KlimaDAO (2022).** *AMM-Based Carbon Market Architecture.*
27. **Farmonaut (2022).** *Remote Sensing for MRV.*
28. **European Space Agency – ESA (2023).** *Sentinel-2 User Handbook.*
29. **NASA (2023).** *Landsat 8/9 Science Product Guide.*
30. **GHGSat (2022).** *Methane Satellite Observation Data Report.*
31. **Planet Labs (2023).** *High-Resolution Earth Data for Climate Monitoring.*
32. **Deloitte (2023).** *AI in Climate & Sustainability Reporting.*
33. **PwC (2022).** *ESG Data Quality: Challenges and Best Practices.*
34. **IBM (2023).** *Applying AI to Carbon Accounting and Emissions Forecasting.*
35. **Google Research (2022).** *Machine Learning for Climate Impact Forecasting.*
36. **OECD (2022).** *The Future of Carbon Markets and Climate Finance.*
37. **Brookings Institution (2022).** *The Economics of Carbon Markets in a Digital Era.*
38. **Brookings Institution (2022).** *Rebound Effects in Digital Efficiency.*



6. YAPAY ZEKA İLE ENERJİ TÜKETİM ANALİZİ VE AZALTIM SENARYOLARI

6.1 Yapay Zeka Tabanlı Enerji Analitiği

Enerji yönetimi, artık yalnızca sayaç okumak ya da geçmiş tüketimlere bakarak karar almak değil; büyük veri (Big Data) ve yapay zeka (AI) desteğiyle geleceğe dönük stratejiler üretme sürecidir.



Yapay zeka (YZ) ve makine öğrenme algoritmaları, enerji sektöründe devrim yaratmaktadır. Artan veri miktarı, karmaşık tüketim desenleri ve sürdürülebilirlik baskısı ile enerji üretiminden tüketime kadar tüm adımlar, artık geleneksel araçlarla yönetilemeyecek kadar çok değişkenli ve dinamik hale gelmiştir. YZ tabanlı enerji analitiği, bu probleme sistematik ve akıllı çözümlerle yaklaşır: Enerji talebi ve tüketim tahminleri, optimizasyon, anomali tespiti ve gerçek zamanlı kontrol gibi işlevlerde kullanılır.

6.1.1 Veri Toplama ve İşleme: YZ'nın Ham Maddesi

Yapay zeka, veri olmadan çalışamaz. Bina otomasyon sistemleri (BMS), endüstriyel SCADA altyapıları, akıllı sayaçlar ve çevresel sensörlerden toplanan **yüksek frekanslı tüketim verileri**, yapay zeka sistemlerinin beslendiği ana kaynaktır.

Veri Türleri:



- **Zaman serisi verileri:** Elektrik, su, gaz tüketim değerleri (dakikalık/saatlik).
- **Çevresel veriler:** İç/dış ortam sıcaklığı, nem, ışık düzeyi.
- **Operasyonel veriler:** Üretim hatları, HVAC çalıştırma döngüleri, ekipman durumları.

6.2 Yapay Zeka Tabanlı Enerji Analitiği Nedir?

Enerji sektöründe yapay zeka, IoT ve sensörler yoluyla elde edilen büyük hacimli verileri ileri makine öğrenme teknikleriyle analiz ederek tüketimin ve üretimin her adımını akıllı şekilde yönetir. Kapsamlı amaçlar şunlardır:

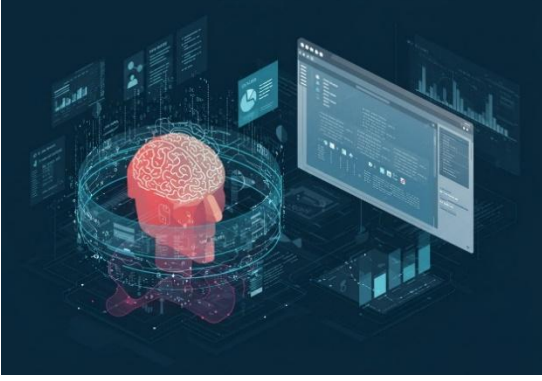
- **Tüketim Analizi:** Akıllı sayaçlardan gelen verilerle kullanıcı bazlı tüketim profili çıkarma,
- **Talep Tahmini:** İleri zamanlı tüketim taleplerini, gün içindeki değişimleri tahmin etme,
- **Verimlilik Artışı:** Verim kaybı ve enerji israfını tespit ederek hızlı aksiyon alma,
- **Operasyonel Optimizasyon:** Şebeke, bina, tesis veya endüstride optimum enerji kullanımı senaryoları oluşturma.

Türkiye’de TEİAŞ ve EPIAŞ gibi kurumlar şebeke modelleme, yük tevzi ve tüketim analizi için YZ kullanmaya başlamış, TPAO ise 40 bin kaynaktan akışkan veriyle doğal gaz çıkarımı ve dağıtımında çoklu makine öğrenme modeli tabanlı bir platform (ZEKİ) geliştirmiştir.

Kaynak: <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/tpao-petrol-endustrisine-katki-sunacak-milli-yazilim-zekiyi-hayata-gecirecek/2726156>

6.3 Makine Öğrenme Algoritmaları: Enerji Tüketiminin Kodunu Çözmek

6.3.1 Makine Öğrenmesi Nedir?



Makine öğrenmesi (ML), bilgisayarların veriden öğrenerek öngörü ve karar mekanizmaları geliştirmesini sağlar. Enerji tüketiminde, ML modelleri tüketim trendlerini anlamak, anomali tespit etmek ve optimizasyon senaryoları üretmek için kullanılır.

Kullanılan Temel Algoritmalar:

- **Regresyon Analizi (Linear & Nonlinear Regression):** Tüketimi etkileyen faktörlerle enerji kullanımını ilişkilendirir.
- **Karar Ağaçları & Rastgele Ormanlar (Random Forest):** Farklı kullanım senaryolarında enerji tüketimini öngörmek için.
- **Destek Vektör Makineleri (SVM):** Yüksek boyutlu veri setlerinde sınıflandırma ve tahminleme için.
- **Yapay Sinir Ağları (ANN) & Derin Öğrenme:** Kompleks enerji sistemlerinde davranış modelleri çıkarır.



a) Enerji Talep ve Üretim Tahmin Modelleri

Zaman Serisi Modelleme: Geçmiş tüketim verilerinden eğilimleri öğrenerek gelecek talep ve üretimi %90'a varan doğrulukla tahmin etmek mümkündür (örn. PSO, Yapay Sinir Ağları gibi algoritmalar).

Kaynak:<http://acikerisim.harran.edu.tr:8080/jspui/bitstream/11513/4154/1/10702014.pdf>

<https://earsiv.batman.edu.tr/items/c569f3be-d507-4e93-b479-857791523809>

Yenilenebilir Entegrasyon: Rüzgar ve güneş gibi değişken üretimli kaynaklarda, hava durumu ve üretim dalgalanmalarını ML ile efektif tahmin edebiliriz.



b) Anomali Tespiti ve Gerçek Zamanlı İzleme

Akıllı sayaç ve sensör verileri üzerinden anormal/yüksek enerji kullanımı, bozuk ekipman veya şebeke kaçakları ML ile anında tespit edilir.

Arıza öncesi bakım: Programlanabilir mantık kontrolcüsü (PLC) – Giriş Çıkış Denetleyicisi (I/O) akıllı ekipmanları ile, bakım ihtiyacını önceden tespit edip enerji ve onarım giderlerini minimize eder.

c) Otomatik Optimizasyon ve Karar Desteği

HVAC ve aydınlatma gibi sistemlerde YZ, ortam doluluğu, sıcaklık ve dış hava değişkenlerine göre ayarları otomatik optimize eder ve enerji tüketimini %15-30 oranında azaltabilir.

Enerji piyasası ve şebekelerde yük dengeleme: YZ ile çalışan akıllı şebekeler, talep değişimlerini anlık tespit ederek şebeke dengesini gerçek zamanlı optimize eder.

Batarya ve elektrikli araç yönetimi: ML modelleri, şarj/deşarj eğrilerini analiz eder, batarya ömrünü uzatacak senaryoları uygular.

6.4 Zaman Serisi Analizi ve Enerji Tüketimi Tahminleri

6.4.1 Yapay Zeka ile Geleceği Görmek Desen tanıma ve anomali belirleme sistemleri



Enerji tüketimi, rastgele bir süreç değildir; **mevsimsellik, operasyonel döngüler, kullanıcı davranışları ve çevresel değişkenler** gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, enerji tüketimini yönetmek için geçmiş verilere bakmak yetmez; **gelecek tüketimi doğru tahmin etmek gerekir.**

İşte burada **zaman serisi analizi** devreye girer, zaman serisi analizi, geçmiş dönemlerde ölçülmüş enerji tüketim verilerinin belirli **matematiksel modellerle** incelenip gelecekteki tüketim tahminlerinin yapılabilmesini sağlar. Enerji talebinin **doğru ve hassas** biçimde tahmin edilmesi ise, şebeke yönetimi, üretim planlaması, maliyet kontrolü ve **sürdürülebilirlik** açısından kritik öneme sahiptir.

a). Zaman Serisi Analizinin Temel Kavramları ve Önemi

Zaman serisi, belirli bir süre boyunca düzenli aralıklarla ölçülmüş veri noktalarının oluşturduğu dizidir. Enerji tüketimi verileri genellikle saatlik, günlük, aylık gibi periyotlarda toplanır ve tüketim desenlerinin analizinde kullanılır.

Zaman serisi, tüketim verilerinin (kWh, m³, vb.) düzenli aralıklarla ölçülerek kaydedildiği veri setleridir. Enerji alanında bu veriler genellikle:

- **Elektrik tüketim kayıtları** (dakikalık, saatlik, günlük).

- **Gaz ve su tüketim değerleri.**
- **Ortam değişkenleri** (sıcaklık, nem, üretim hacmi).

Zaman serisi analizi bu verilerde:

- **Trendleri** (uzun vadeli değişim).
- **Mevsimselliği** (yaz/kış, hafta içi/hafta sonu).
- **Düzensiz dalgalanmaları** (arıza, anomali). belirlemeyi sağlar.

Neden önemlidir?

Enerji arz ve talep dengesinin sağlanması, şebeke güvenilirliği ve ekonomik optimizasyon için gelecekteki tüketim tahminlerinin doğru yapılması gerekir. Ayrıca, yenilenebilir kaynak entegrasyonunda dalgalanmalar zaman serisi temelli tahminlerle yönetilir.

6.4.2 Yaygın Kullanılan Zaman Serisi Modelleri ve Yapay Zeka Yaklaşımları

6.4.2.1 Klasik İstatistiksel Modeller

- **ARIMA** (Otokorelasyonlu Entegre Hareketli Ortalama): Zaman serilerindeki trend ve mevsimselliği yakalayabilen istatistiksel model. Hem geçmiş veriye hem rastlantısal hata bileşenlerine dayanır.
- **SARIMA** (Mevsimsel ARIMA): ARIMA modelinin mevsim etkilerini de içeren çeşididir.
- **Holt-Winters Üstel Düzgünleştirme**: Mevsimsel ve trend bileşenleriyle zaman serilerini modelleyen klasik metotlardan biridir.

Bu modeller matematiksel olarak iyi tanımlanmış olup, enerji tüketiminde mevsimsel trendleri yakalamak için sıklıkla kullanılırlar.

6.4.2.2 Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları (YSA)

- **Yapay Sinir Ağları (YSA)**: Non-lineer, karmaşık veri ilişkilerini yakalayabilen yapay zeka algoritmalarıdır.
- **Destek Vektör Regresyonu (SVR), Random Forest, XGBoost**: Enerji talebi tahmininde kullanılan ileri ML modellerindendir.
- **Derin Öğrenme (LSTM, GRU)**: Özellikle uzun süreli bağımlılıkları modellemek için tekrarlayan sinir ağı tabanlı modellerdir. Elektrik tüketiminde dakikalık veya saatlik veri tahminlerinde yüksek doğruluk sağlar.

6.4.2.3 Karşılaştırmalı Performans

Araştırma ve uygulamalar, YSA ve LSTM gibi modellerin klasik ARIMA/SARIMA modellerine göre daha yüksek doğruluk ve uyum sağladığını göstermektedir. Ancak, **klasik modeller yorumlanabilirlik** ve kullanım kolaylığı açısından hala tercih edilebilir.

6.4.2.4 Veri Ön İşleme: Doğru Tahmin İçin Temel Adım

Enerji tüketim verileri genellikle gürültülü (anlık pikler, eksik değerler) ve heterojen (farklı kaynaklardan gelen) olur.

6.4.2.5 Veri Hazırlama

- **Ön işlem:** Eksik verilerin tamamlanması, aykırı değerlerin düzeltilmesi ve normalizasyon,
- **Özellik mühendisliği:** Tarih, saat, gün tipi, hava durumu ve ekonomik göstergeler gibi ek değişkenlerin kullanılması,
- **Zaman serisi ayrıştırması:** Trend, mevsimsellik, hata ve rastlantısal kısımların ayrıştırılması.

6.4.2.6 Model Eğitimi ve Doğrulama

- **Veri seti eğitim ve test olarak bölünür,**
- **Performans metrikleri:** RMSE (karekök ortalama hata), MAE (ortalama mutlak hata), MAPE (ortalama mutlak yüzde hata), R^2 (determinasyon katsayısı),
- **Model parametre optimizasyonu ve çapraz doğrulama yapılır.**

6.4.2.7 Tahmin ve Uygulama

- Günlük, haftalık, aylık gibi farklı zaman dilimleri için tahminler üretilir,
- Tahmin ları operasyonel karar destek sistemlerine entegre edilir.

6.4.3 Pratik Uygulama ve Örnekler

6.4.3.1 Üniversite Kampüsünde Elektrik Tüketimi Tahmini

Yıldız Teknik Üniversitesi'nde yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında, SARIMA ve Holt-Winters modelleri ile 5 yıllık elektrik tüketimi verileri kullanılarak 6 aylık tahminler yapılmıştır. Model başarısı AIC ve MAPE metrikleri ile analiz edilmiş, sektörde geçerli lar elde edilmiştir.

Kaynak: <https://avesis.yildiz.edu.tr/dosya?id=e5427c66-cf74-486c-8e78-9364f60dcae8>

6.4.3.2 Kısa Vadeli Enerji Talep Tahmini

Bülent Ecevit Üniversitesi'nde yapay sinir ağları, destek vektör regresyonu ve regresyon modelleri karşılaştırılarak, elektrik talebi tahmininde YSA'nın en iyi performansı sergilediği; RMSE=0.86, MAE=0.62 ve $R^2=0.97$ değerlerine ulaştığı raporlanmıştır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2010127>

6.4.3.3 Derin Öğrenme ile Daha İyi Tahminler

Bazı çalışmalar NARNET (nonlinear autoregressive neural networks) modelleri ve derin öğrenmeyi kullanarak zaman serisi tahminlerinde klasik modellere kıyasla daha iyi lar almıştır. Bu durum, enerji tüketimindeki kompleks kalıpların daha iyi yakalanmasını sağlamaktadır.

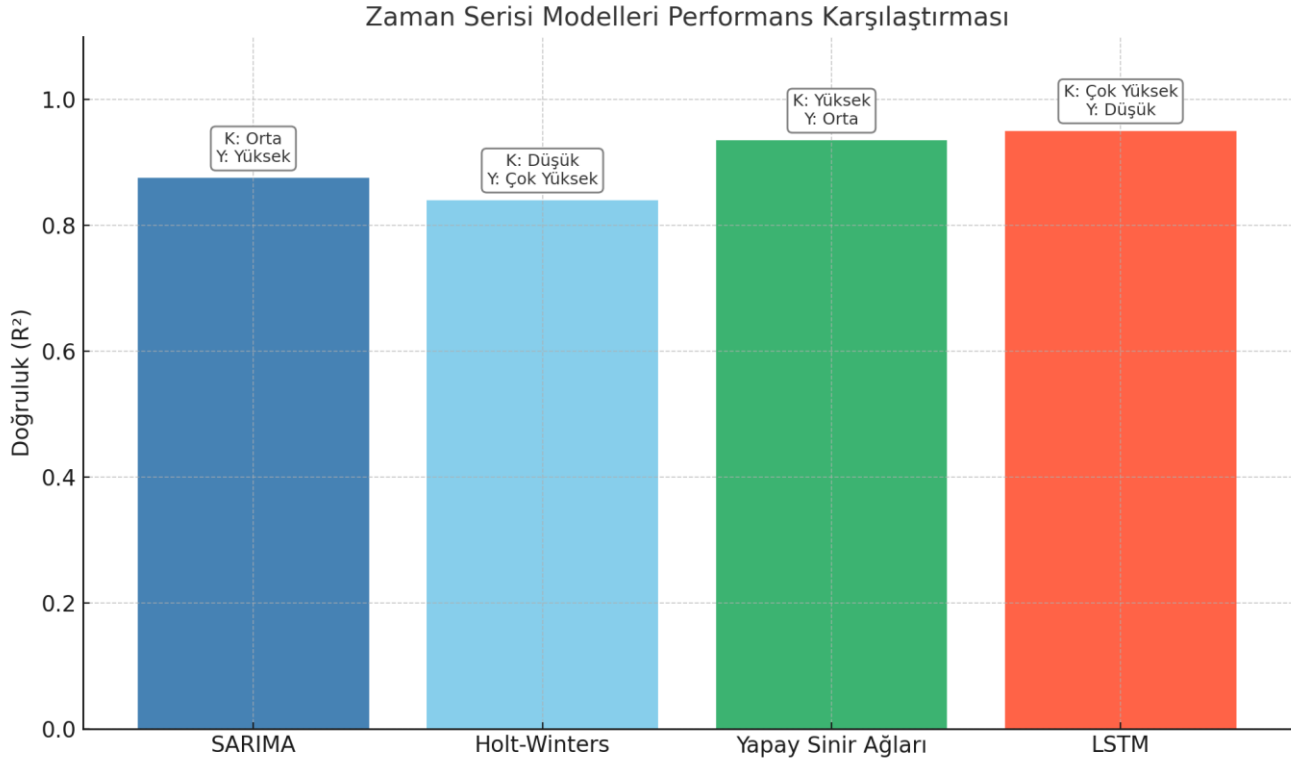
Kaynak: <http://jes.ksu.edu.tr/tr/pub/issue/83405/1369811>

6.4.4 Zaman Serisi Analizinde Uygulama Alanları

Uygulama Alanı	Açıklama
Enerji Tüketimi Talep Tahmini	Şebeke yönetimi, üretim planlama ve enerji dağıtımı
Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	PV ve rüzgar enerjisinde değişken üretim tahmini
Anomali Tespiti ve Bakım	Elektrik tüketimindeki anormalliklerin fark edilmesi
Operasyonel Optimizasyon	HVAC, aydınlatma ve yük yönetiminde gerçek zamanlı kontrol

6.4.5 Zaman Serisi Modelleri Performans Analizi

Model	Doğruluk (R^2)	Karmaşıklık	Yorumlanabilirlik	Kapsam ve Esneklik
SARIMA	0.85-0.90	Orta	Yüksek	Lineer ve mevsimsel kalıplar
Holt-Winters	0.80-0.88	Düşük	Çok Yüksek	Basit, sezonsal veriler için
Yapay Sinir Ağları	0.90-0.97	Yüksek	Orta	Karmaşık ve büyük veri için
LSTM (Derin Öğrenme)	0.92-0.98	Çok Yüksek	Düşük	Uzun süreli bağımlılıklar



*K: Karmaşıklık *Y: Yorumlanabilirlik

6.4.6 Değerlendirme

Zaman serisi analizi, yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmaları enerji tüketimi tahminlerinde giderek standart yaklaşım haline gelmektedir. Gelişmiş modeller, enerji talebindeki mevsimsel, günlük ve anlık değişimleri **yüksek doğrulukla** tahmin etmekte; bu da şebeke operasyonlarının optimize edilmesi, enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve maliyet tasarrufu anlamına gelir.

Basit ve yorumlanabilir modeller, küçük ve orta ölçekli sistemler için uygundur,

Derin öğrenme ve yapay sinir ağları, büyük ve karmaşık veri kümelerinde daha başarılıdır,

Türkiye ve dünya genelinde yapılan uygulamalar, değişik yöntemlerin birleştirilmesiyle en iyi lara ulaşmaktadır.

Bu alanın teknik karmaşıklığı, aynı zamanda enerji sektörünün dijital dönüşümünün itici güçlerinden biri olarak devam edecektir.

Kaynak: <https://avesis.yildiz.edu.tr/dosya?id=e5427c66-cf74-486c-8e78-9364f60dcae8>

<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2010127>

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejosat/issue/66239/998277>

<https://core.ac.uk/download/586376312.pdf>

Yapay zeka destekli zaman serisi analizi, geçmiş enerji tüketim verilerindeki trend, mevsimsel desen ve değişimleri modelleyerek gelecekteki tüketimi yüksek doğrulukla tahmin etmeyi sağlar. Özellikle enerji talebi planlama, üretim optimizasyonu ve şebeke güvenliği için kritik olan bu yöntemler, klasik istatistiksel modeller (ARIMA, SARIMA, Holt-Winters) ile modern makine öğrenmesi (Yapay Sinir Ağları, LSTM gibi) algoritmalarını kapsamaktadır.

Zaman serisi verileri; enerji tüketiminde günlük, haftalık ve yıllık döngüleri ortaya koyarak, bu periyotlar için tahmin yapmaya imkan verir. ARIMA ve SARIMA modelleri mevsimselliği yakalamada güçlüdür; ancak yapay sinir ağları ve derin öğrenme yöntemleri, karmaşık ve non-lineer tüketim kalıplarını daha isabetli tahmin edebilir. Örneğin, Yıldız Teknik Üniversitesi'nin kampüs enerji tahmin çalışmasında SARIMA modeli 5 yıllık verilerle 6 aylık tüketimi başarılı biçimde öngörmüş, Bülent Ecevit Üniversitesi'nde yapay sinir ağı modelleri klasik regresyon ve destek vektör regresyona kıyasla daha üstün performans göstermiştir.

Modelleme süreci; veri ön işleme (eksik ve aykırı değerlerin giderilmesi), özellik mühendisliği (tarih, saat, hava durumu gibi faktörlerin entegrasyonu), eğitim-test veri seti oluşturma ve performans ölçümü (RMSE, MAE, MAPE, R^2) aşamalarını içerir.

Zaman serisi analizi farklı uygulama alanlarında kullanılır: kısa ve uzun dönem tüketim tahmini, yenilenebilir enerji entegrasyonu için üretim tahmini, anomali tespiti ve gerçek zamanlı operasyonel optimizasyon.

Aşağıda klasik ve yapay zeka tabanlı yöntemlerin performans ve özellikleri karşılaştırılmıştır:

Model	Doğruluk (R^2)	Karmaşıklık	Yorumlanabilirlik	Kapsam ve Esneklik
SARIMA	0.85-0.90	Orta	Yüksek	Lineer, mevsimsellik için uygun
Holt-Winters	0.80-0.88	Düşük	Çok Yüksek	Basit, mevsimsel verilerde tercih edilir
Yapay Sinir Ağları	0.90-0.97	Yüksek	Orta	Karmaşık ve büyük veri için uygun
LSTM (Derin Öğrenme)	0.92-0.98	Çok Yüksek	Düşük	Uzun bağımlılık gerektiren verilerde üstün

Türkiye'de ve dünyada EPIAŞ, TEİAŞ gibi kurumlar ve akademik çevrelerde bu teknikler kullanılarak şebeke talep tahminleri ve enerji yönetimi optimize edilmektedir. Yıllık yüzbinlerce verinin analiz edildiği projelerde yapay zeka ile %90'a varan tahmin doğruluğuna ulaşılmıştır.

Özetle, zaman serisi analizi enerji tüketimi tahminlerinde vazgeçilmezdir; klasik modeller kolay anlaşılırken, yapay zeka ve makine öğrenmesi daha karmaşık kalıpları yakalayarak performansı artırır. Her iki yaklaşımın hibrit kullanımı en iyi ları verir.

6.5 Derin öğrenme modelleri ve sinir ağları

Enerji Yönetiminde Yeni Ufuklar

Enerji sistemleri, çok sayıda değişkenin (hava durumu, kullanıcı davranışları, üretim döngüleri, şebeke koşulları) etkileşim içinde olduğu **karmaşık dinamik sistemlerdir**. Klasik istatistiksel yöntemler veya temel makine öğrenmesi modelleri bu çok katmanlı ilişkileri tam anlamıyla yakalamakta zorlanır. İşte bu noktada **derin öğrenme** devreye girer.

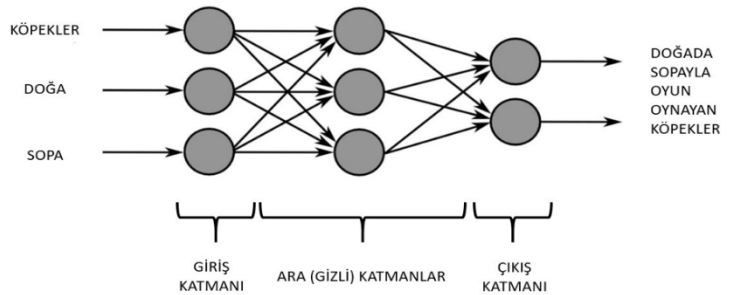
Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağları (deep neural networks, DNN) sayesinde **doğrusal olmayan, yüksek boyutlu ilişkileri modelleyerek** enerji tüketimi tahmini, anomali tespiti ve optimizasyon stratejilerinde **üstün doğruluk** sağlar.

6.5.1 Derin Öğrenme ve Sinir Ağlarına Genel Bakış

6.5.1.1 Derin Öğrenme Nedir?

Derin öğrenme, çok katmanlı sinir ağlarının kullanıldığı bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Çok sayıda gizli katmanlarla verideki karmaşık ilişkileri ve örüntüleri ortaya çıkarır. Bu modeller, özellikle geniş zaman serisi, görüntü, ses veya metin gibi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış büyük veri setlerinin analizinde başarılıdır.

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE DERİN ÖĞRENME



6.5.1.2 Sinir Ağlarının Temel Yapısı

Sinir ağı, bilgi işleyen nodlardan (nöronlar) oluşan bir ağ modelidir. Katmanlar halinde yapılandırılır:

- **Girdi katmanı:** Modelin aldığı özelliklerin (ör. geçmiş enerji tüketimi, saat, gün, sıcaklık) yer aldığı katman.
- **Gizli katmanlar:** Çoklu katmanlardan oluşur. Bu katmanlar veriden özellikler çıkarır.

- **Çıktı katmanı:** Tahmin edilen değerleri (örneğin sonraki saat ya da günün enerji tüketimi) verir.

Derin öğrenme modellerinde gizli katman sayısı uluslararası literatürde 3-100 arasında değişebilmektedir.

6.5.2 Enerji Tüketim Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri

6.5.2.1 Yinelemeli Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks - RNN)

RNN, zaman serisi gibi ardışık veri dizilerini analiz etmek için tasarlanmıştır. Geçmiş girdilerin etkisini belleğinde tutarak işlem yapar. Ancak klasik RNN'ler uzun zaman dilimlerindeki bağımlılıkları yakalamakta zorluk yaşar.

6.5.2.2 Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM)

LSTM, RNN'nin geliştirilmiş versiyonudur ve unutma, hafıza ve giriş kapıları ile uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilir. Zaman serisi verisinde, özellikle enerji talebi gibi karmaşık ve mevsimsel kalıplarda yüksek başarı sağlar.

6.5.2.3 İki Yönlü LSTM (Bidirectional LSTM - BiLSTM)

BiLSTM, veriyi hem geçmişten geleceğe hem de gelecekteki verilerden geçmişe doğru işlem yapar. Bu çift yönlü analiz sayesinde daha doğru tahminler ortaya koyabilir.

Kullanım Alanı: Uzun vadeli enerji tüketim tahminleri, şebeke yük dalgalanmalarının öngörülmesi.

6.5.2.4 1 Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağları (1D-CNN)

Özellikle kısa dönemlik ve lokal desenlerin yakalanmasında etkilidir. Diğer sinir ağları ile birlikte hibrit modellerde tercih edilir. Enerji tüketim isteklerindeki kısa dönem değişimleri modellemek için faydalıdır.

Kullanım Alanı: Güneş panellerinde termal görüntülerle arıza tespiti, enerji altyapısındaki görsel incelemeler.

6.5.3 Derin Öğrenme Modellerinin Teknik Yapısı ve Çalışma Prensipleri

6.5.3.1 Veri Hazırlığı

Enerji tüketiminde kullanılan zaman serilerinde;

- Zaman damgalarının doğruluğu ve sürekliliği,
- Eksik veya uç değerlerin temizlenmesi,
- Özellik mühendisliği (saat, gün, tatil bilgisi, sıcaklık vb.) kritik öneme sahiptir.

6.5.3.2 Model Eğitimi

- Veriler eğitim (train) ve test (validation) olarak ayrılır.

- Model, girdiler (geçmiş tüketim ve diğer değişkenler) ile çıktılar (gelecekteki tüketim) arasındaki ilişkiyi öğrenir.
- Eğitimde yaygın kullanılan optimizasyon yöntemleri arasında Adam ve RMSProp bulunur.

6.5.3.3 Performans Değerlendirme

Model başarısı tipik olarak;

- RMSE (Karekök Ortalama Hata),
- MAE (Ortalama Mutlak Hata),
- R^2 (Belirlilik Katsayısı)

ile değerlendirilir. Literatürde LSTM ve BiLSTM modelleri %90'ın üzerinde tahmin doğruluğu sağlayabilir.

6.5.4 Enerji Tüketim Tahmininde Derin Öğrenme Modelleri: Uygulama ve Karşılaştırmalar

6.5.4.1 Diyarbakır alışveriş merkezi örneği

Dicle Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi onayıyla yapılan bir çalışma, 2027 günlük aktif enerji tüketim verileri üzerinde 1D-CNN, RNN, LSTM ve BiLSTM modellerini test etti. Her model aynı ağ yapısıyla 10 kez çalıştırılarak başarı karşılaştırıldı. lar;

- LSTM ve BiLSTM modelleri RMSE ve R^2 değerlerinde öne çıktı,
- 1D-CNN ise kısa dönem dalgalanmalar konusunda etkilidir,
- Geleneksel RNN ise daha düşük performans gösterdi.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf/issue/85466/1415055>

6.5.4.2 Derin Öğrenme ile Enerji Tüketim Azaltım Senaryoları

Derin öğrenme yalnızca tahmin yapmak için değil; **tüketim azaltım senaryolarını otomatik olarak üretmek için** de kullanılabilir.

Uygulamalar:

- **Dinamik HVAC optimizasyonu:** İç/dış sıcaklık ve doluluk verilerine göre enerji kullanımını minimize eden otomatik kontrol stratejileri.
- **Talep yanıt programları:** Şebeke pik yüklerinde tüketimi proaktif olarak azaltan senaryolar.

- **Arıza önleme:** Ekipman performansındaki anormal desenleri tespit ederek plansız duruşları engellemek.

Örnek: Google DeepMind, veri merkezlerinde derin öğrenme tabanlı kontrol algoritmaları ile soğutma enerji tüketimini **%40 azalttı** (DeepMind Blog, 2018).

Kaynak: <https://deepmind.google/discover/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/>

Derin Öğrenme Modellerinin Performansları

Model	RMSE	MAE	R ²	Uygunluk Alanı	Avantajlar	Dezavantajlar
RNN	Orta	Orta	0.80-0.85	Kısa dönemli zaman serileri	Zaman bağımlılığını modelleyebilir	Uzun dönem bağımlılıklarda yetersiz
LSTM	Düşük	Düşük	0.90-0.97	Uzun dönem ve karmaşık zaman serileri	Uzun dönem hafızası, mevsimsellik	Hesaplama maliyeti yüksek
BiLSTM	Çok Düşük	Çok Düşük	0.92-0.98	Daha derin ve çift yönlü veriler	En yüksek tahmin doğruluğu	En karmaşık ve maliyetli model
1D-CNN	Düşük	Düşük	0.88-0.94	Kısa vadeli sinyal ve desen tanıma	Lokal desenlerde yüksek başarımlı	Zaman bağlamında sınırlı

Zorluklar ve Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Derin öğrenme, güçlü bir araç olsa da:

- **Veri İhtiyacı:** Büyük hacimli ve kaliteli veri gerektirir.
- **İşlem Gücü:** GPU destekli yüksek performanslı altyapı ihtiyacı.
- **Model Şeffaflığı:** "Kara kutu" yapısı nedeniyle karar mekanizmalarının anlaşılması zor olabilir.

Bu nedenle, **hibrit modeller (ör. ARIMA + LSTM)** ve **açıklanabilir yapay zeka (XAI)** yaklaşımları giderek daha fazla tercih edilmektedir.

: Derin Öğrenme ile Enerji Yönetiminde Paradigma Değişimi

Derin öğrenme tabanlı sinir ağları, enerji yönetimini **reaktif bir süreçten proaktif ve öngörülü bir sisteme** dönüştürüyor:

- **Tahminlerde yüksek doğruluk** (özellikle LSTM tabanlı modeller).

- **Anomali tespitiyle erken müdahale** ve kayıpların önlenmesi.
- **Optimizasyon senaryolarıyla maliyet ve karbon azaltımı.**

Bu teknolojiler, **akıllı binalardan enerji yoğun endüstriyel tesislere ve şebeke yönetimine kadar** her alanda enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biri haline gelmiş durumda.

6.6 Tahmine Dayalı Analitik

Enerji sistemlerinde tahmine dayalı analitik, **gelecekteki tüketim ve talep** desenlerini öngörmek; **arz-talep** dengesini sağlamak; hava durumunu ve kullanıcı davranışlarını analiz ederek enerji yönetimini ve verimliliğini üst seviyeye taşımak amacıyla kullanılır. Yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmaları sayesinde veri odaklı, **hızlı ve hassas öngörüler elde etmek mümkündür.**

6.6.1 Tahmine Dayalı Analitik Nedir ve Neden Kritik?

Tahmine dayalı analitik, enerji sektöründe şu anahtar işlevleri yerine getirir:

- **Tüketim tahminlerini oluşturur:** Gelecekteki elektrik/gaz/hammadde talebini öngörmek
- **Üretim planlamasını optimize eder:** Kaynak atamasını ve bakım süreçlerini en verimli şekilde planlamak
- **Operasyonel riski azaltır:** Ani dalgalanmalara veya ani taleplere hızlı yanıt verebilmek
- **Ekonomik ve çevresel fayda sağlar:** Fazla üretim/israfı önler, karbon salımını azaltır.

Yapay zeka destekli analitik platformlar, milyonlarca sensör ve ölçüm noktasından alınan verileri işleyerek "gelecek simülasyonları" üretir ve enerji yönetiminde insan kararlarını güçlendirir.

6.6.2 Enerji Talep Tahmini ve Planlaması

Enerji talep tahmini, akıllı şebekelerin ve piyasa yönetiminin belkemiğidir. Hem kısa hem uzun vadede öngörüler sağlar:

- **YZ tabanlı tahmin modelleri:** Regresyon, yapay sinir ağları, LSTM, XGBoost gibi algoritmalar, geçmiş tüketim verilerini ve çevresel değişkenleri analiz ederek talep öngörüsü üretir. Özellikle XGBoost ve LSTM, çok değişkenli büyük veri ile en yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır.

Kaynak: <http://jes.ksu.edu.tr/tr/pub/issue/90608/1528386>

- **Kısa dönem ve uzun dönem tahminler:** Şebeke yükü, günlük ve saatlik ihtiyaç tahmini, yıllık talep trendleri ve pik yönetimi.

Kaynak: <https://fintables.com/arastirma/yazilar/sektor-analiz/2025-ilk-ceyrek-enerji-uretim-sirketleri-analizi>

- **Planlamaya katkı:** Şirketler, üretimini ve kaynak dağılımını bu öngörülere göre ayarlayarak hem maliyeti hem de riski minimize eder.

Gerçek uygulama: Türkiye’de elektrik piyasasında EPIAŞ ve TEİAŞ gibi kurumların kullandığı YZ tabanlı yük tahmini platformları, günöncesi ve gün içi piyasada rekabet gücünü ve şebeke sağlığını destekler.

Kaynak: <https://www.ituvakif.org.tr/yapay-zeka-destekli-akilli-elektrik-guc-sistemleri-gelecegin-enerji-cozumleri>

6.6.3 Hava Durumu Verilerinin Entegrasyonu

Enerji üretimi ve tüketimde hava durumu kritik rol oynar. Özellikle yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgar, hidroelektrik) ve soğutma/ısıtma ihtiyaçları hava koşullarıyla doğrudan bağlantılıdır.

- **IoT ve çevresel veri entegrasyonu:** IoT sensörlerinden alınan hava sıcaklığı, nem, rüzgar, basınç gibi veriler yapay zeka algoritmalarına beslenerek üretim ve tüketim tahminlerini hassaslaştırır.

Kaynak: <http://jes.ksu.edu.tr/tr/pub/issue/90608/1528386>

- **Makine öğrenimli hava tahmin modelleri:** SVM, KNN, LSTM ve XGBoost gibi algoritmalar, çok büyük veri üzerinde saatlik ve günlük tahminlerde %98-100 doğruluk oranına ulaşmıştır.

Kaynak: <http://jes.ksu.edu.tr/tr/pub/issue/90608/1528386>

- **Planlama ve operasyon avantajı:** Enerji yönetim yazılımları, hava durumu tahminleriyle bakım takvimleri ve üretim azalış/dalgalanma senaryolarını öngörebilir.

Kaynak: <https://energyexporter.com/tr/blog-detay/enerji-uretiminde-yapay-zeka-uygulamalari>

Akademik örnek: Fırat Üniversitesi’nde 600,000 kayıtlı hava durumu verisiyle yapılan çalışmada LSTM ve XGBoost algoritmalarıyla hava tahmininde %99-100 doğruluk sağlanmıştır.

Kaynak: <http://jes.ksu.edu.tr/tr/pub/issue/90608/1528386>

6.6.4 Kullanıcı Davranış Analizi ve Profili

Kullanıcı davranışlarının analiz edilmesi, enerji verimliliği ve tasarrufu açısından en etkili yöntemlerden biridir. Modern analitik yazılımlar ve akıllı sayaçlar ile;

- **Tüketim trendleri ve anomaliler:** Bireysel ve toplu tüketim alışkanlıkları, saatlik ve dönemsel ihtiyaçlar analiz edilir.

Kaynak: <https://www.enerjicebinde.com/elektrik-tuketim-takibi-ve-analizi-nedir/>

- **Geri bildirim ve sosyal karşılaştırma:** Kullanıcıların kendi tüketimini geçmişe ve akranlarına göre görmesi, tüketim alışkanlıklarının olumlu yönde değişmesini sağlar. Kocaeli’nde yapılan saha deneyinde, sosyal karşılaştırma ve periyodik tüketim geri bildirimi, hane başı elektrik tüketimini anlamlı şekilde azaltmıştır.

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2891812>

- **Tüketici profilleme:** İleri analitik ile ev/işyeri tipine, yaşam tarzına veya davranış modeline göre kullanıcı grupları oluşur ve kişiselleştirilmiş tasarruf önerileri sunulur.

Kaynak: <https://mmoteskon.org/images/2025/01/2011-106.pdf>

Akıllı binalarda ve enerji yönetimi yazılımlarında bu analizler IoT tabanlı veri akışı ile gerçek zamanlı uygulanabilmektedir.

Tahmine Dayalı Analitik Modülleri

Modül	Teknik Yöntemler	Avantajları	Akademik/Endüstriyel Örneği
Enerji Talep Tahmini	LSTM, XGBoost, ANN, Regresyon	Yüksek doğruluk, otomatik planlama	EPIAŞ, TEİAŞ, Fintables, XGBoost - FÜ
Hava Durumu Entegrasyonu	IoT, ML, LSTM, XGBoost	Saatlik & günlük hassas tahmin	Fırat Üniversitesi - IoT Veriyle %99 doğruluk
Kullanıcı Davranış Analizi	Geri bildirim, sosyal karşılaştırma	Davranış değişimi, motivasyon	Kocaeli Saha Deneyi, ANCOVA Analizi
Tüketici Profilleme	Clustering, regression	Kişiselleştirilmiş öneriler, verim	Enerji Cebinde, davranış-bilgi entegre analitik

Tahmine dayalı analitik sistemler, enerji sektöründe hava durumu ve kullanıcı davranış verilerini yapay zekaya entegre ederek talep ve üretim tahminlerinin doğruluğunu dramatik şekilde artırmıştır. **IoT ve büyük veri analitiği**

ile, **enerji arz-talep yönetimi**, tüketim alışkanlıklarında değişim ve ekonomik/çevresel fayda birlikte sağlanmaktadır. Türkiye ve dünyadan gerçek deneyler, gelişmiş algoritmaların ve davranış analitiğinin hızlı bir dönüşüm yarattığını göstermektedir.

6.7 Enerji Tüketim Optimizasyonu

Enerji sistemlerinin dijitalleşme yolunda en kritik atılımlardan biri, enerji tüketiminin optimize edilmesi, talep yanıtının etkin yönetimi, dinamik fiyatlandırma stratejilerinin uygulanması ve tüketici davranış değişikliği programlarıdır.

6.7.1 Enerji Tüketim Optimizasyonu: Temel Yaklaşım

Enerji tüketiminin optimize edilmesi; şebeke, üretim, dağıtım ve tüketici tarafında, minimum maliyet ve maksimum verimlilik hedefiyle enerji kullanımının planlanmasıdır. Bu süreçte yapay zeka ve büyük veri analizleriyle:

- Akıllı algoritmalar, anlık tüketim verilerini ve sistem kapasitesini analiz ederek gereksiz yükleri azaltır.
- Enerji izleme yazılımları (örn. SCADA, IoT tabanlı platformlar) fabrikalarda ve kampüslerde tüketimi optimize eder; örneğin talep yanıtı programlarına katılımı kolaylaştırır.

6.7.2 Talep Yanıt Yönetimi

Talep yanıt yönetimi (Demand Response), özellikle akıllı şebekeler ve yenilenebilir entegrasyon açısından kritik rol oynar:

- **Talep tepkisi programları** ile tüketiciler, fiyat sinyallerine veya kontrol anlaşmalarına göre enerji kullanımını ayarlarlar. Bu, şebekeye esneklik ve maliyet avantajı sağlar.
- **Yük kesme ve kaydırma:** Yoğun talep saatlerinde yükün azaltılması veya daha düşük maliyetli zamanlara ertelenmesi ile sistem üzerindeki baskı azalır ve toplam şebeke maliyeti düşer.

Talep Yanıtının Faydaları:

- Pik yüklerin ve ani dalgalanmaların önlenmesi
- Şebeke yatırım ihtiyacının ertelenmesi
- Tüketicie indirim ve teşvik imkanı
- Fatura ve maliyet avantajları
- Yenilenebilir kaynaklarla daha entegre, esnek sistem

6.7.3 Dinamik Fiyatlandırma ve Yük Kaydırma Stratejileri

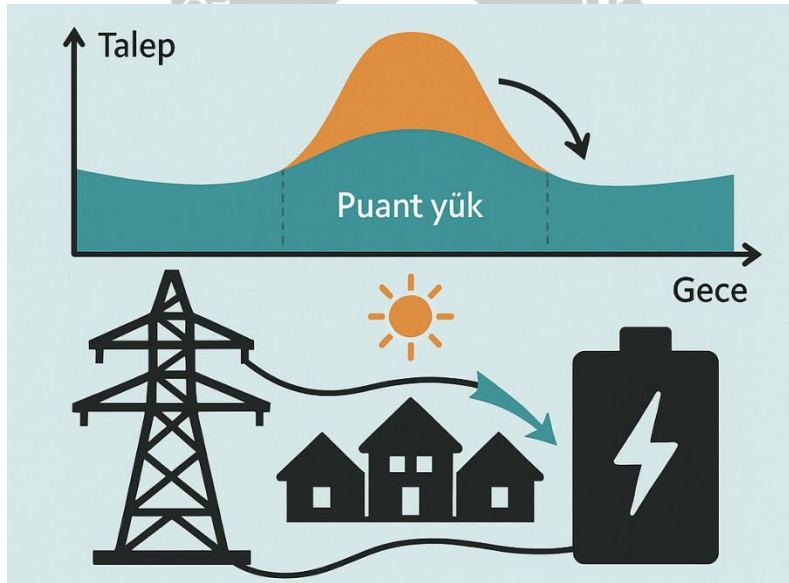
6.7.3.1 Dinamik Fiyatlandırma

- **Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma:** Enerji fiyatı anlık piyasa koşullarına göre değişir; bu da tüketicinin daha ucuz zamanlarda kullanımı teşvik etmesini sağlar.
- **Kritik Tepe Fiyatlandırması:** Kısıtlı saatlerde, aşırı talep olduğunda alışılmadık derecede yüksek fiyat uygulanır; yük kaydırma davranışı tetiklenir.
- **Teşvikli Programlar:** Kısmi yük kesintisi veya yük kaydırma performansı için parasal ödül veya indirim sunulabilir.

Yük Kaydırma

- Fabrikalar/işletmeler, yüksek tüketimi düşük maliyetli saatlere taşır.
- Akıllı şebekeler IoT cihazları ve otomasyon sayesinde anlık talebe göre yük kaydırma uygulaması yapar.

6.7.4 Pik Yük Yönetimi ve Düzeltme Teknikleri

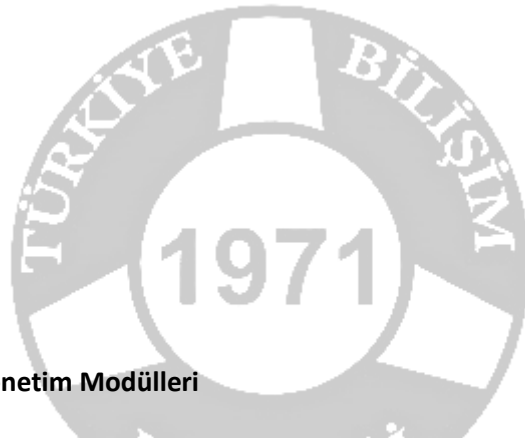


- **Pik yük yönetimi:** Yoğun talep dönemlerinde şebeke kapasitesi zorlanır; yapay zeka, depolama sistemleri (batarya vb.) ve talep yanıtı ile bu pikler önlenir.
- Pik saatlerde üretim ve tüketim israfı minimize edilir; enerji depolama ile şebekeden çekiş azaltılır, puant yük düzleştirilir.

6.7.5 Tüketici Davranış Değişikliği Programları

Davranışsal yaklaşımlar enerji verimliliğinin kalıcı olmasını sağlamak için kritik önemdedir:

- **Bilgilendirme ve eğitim:** Akıllı sayaçlar, çağrı merkezleri ve mobil uygulamalar tüketiciye aktif ve gerçek zamanlı bilgi sunar. Tüketici kararının sürdürülebilir ve bilinçli yönetilmesi sağlanır.
- **Geri bildirim ve karşılaştırma:** Tüketici kendi kullanımını geçmişe ve diğer kullanıcılara göre kıyaslar; sosyal motivasyon ve ödüllerle davranış değişikliği tetiklenir.
- **Teşvikler ve yarışmalar:** Yeşil tarifeler, indirim kampanyaları ve performans temelli ödüller kurumların davranışsal dönüşümü desteklemesinde etkilidir.



Enerji Optimizasyonu ve Talep Yönetim Modülleri

Modül	Yöntemler	Avantajlar	Uygulama Örneği
Tüketim Optimizasyonu	SCADA, IoT, veri analitiği	Gereksiz yüklerin azaltılması	Fabrika enerji yazılımları
Talep Yanıt Programları	Direkt kontrol, fiyat sinyali	Esneklik, teşvik, pik azaltma	Akıllı şebekeler, ev-işletme
Dinamik Fiyatlandırma ve Yük Kaydırma	Gerçek zamanlı, teşvikli	Maliyet minimizasyonu	Sabancı Üniversitesi, Avrupa Enerji Birliği
Pik Yük Düzeltme	Enerji depolama, arıza önleme	Şebeke güvenliği, kapasite artışı	Danimarka akıllı şebeke pilotu Kaynak:
Tüketici Davranış Değişikliği Programı	Mobil uygulama, yarışma, çağrı merkezi	Kalıcı verimlilik, sosyal etki	Türkiye saha deneyi

Kaynak: <https://enerji.pro/fabrikalarda-enerji-yonetimi-enerji-izleme-yazilimi-ile-verimlilik-giden-yol/>

Kaynak: <https://yesilbuyume.org/talep-tarafi-yonetimi-nedir/>

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1179422>

Kaynak: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/talep-tarafi-yonetimi-bilgilendirme-notu-120721.pdf>

Kaynak: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/4556691>

Enerji tüketim optimizasyonunda yapay zeka, IoT ve dinamik fiyatlandırma gibi teknolojiler talep yanıtı ve yük kaydırma stratejileri ile bütünleşik, esnek ve çevreci bir çözüm sunar. Pik yük yönetimi, enerji depolama ve tüketici davranış değişikliği programları, verimliliği ve sistem esnekliğini artırır; faturalarda ciddi tasarruf sağlar. Türkiye ve dünya örneklerinde, akıllı şebekeler ve kapsamlı veri kullanımı ile bu programlar enerji dönüşümünün kapsayıcı ve sürdürülebilir temel taşları olarak öne çıkmaktadır.

6.8 Otomatik Optimizasyon Sistemleri

Otomatik optimizasyon sistemleri, enerji tüketimini gerçek zamanlı ve geçmiş veri analizine dayanarak otomatik şekilde düzenleyen çözümlerdir. Bu sistemler insan müdahalesine minimum ihtiyaçla; sensör, veri toplama, analiz, **karar verme** ve aksiyon süreçlerini üstlenir. Yapay zeka, yapılan düzenlemelerin daha akıllı ve adaptif olmasını sağlar.



Enerji tüketiminin dijital kontrolü, veri temelli tahminlerin ötesinde artık gerçek zamanlı kararlar veren **otonom algoritmalar**a evrilmiştir. Bu dönüşümün odağında ise **Otomatik Optimizasyon Sistemleri** yer alır. Bu sistemler, yapay zeka (YZ) destekli yazılımlar aracılığıyla binalardaki enerji kullanımını sürekli izleyip **anlık kararlar** alarak tüketimi optimize eder.

Algoritmalar mevcut enerji tüketim verilerini, çevresel koşulları ve kullanıcı davranış modellerini değerlendirerek enerji yönetiminde en uygun ayarları sürekli olarak belirler. Böylece;

- Enerji israfı önlenir,

- Sistem performansı artırılır,
- Kullanıcı konforu korunur,
- Operasyonel maliyetler azaltılır.

Otomatik sistemlerin temel bileşenleri:

- **Sensörler:** Sıcaklık, nem, hareket, aydınlatma seviyesi gibi çevresel ve kullanıcı verileri toplanır.
- **Veri İşleme:** Toplanan ham veriler temizlenir, normalleştirilir ve analiz edilir.
- **Yapay Zeka Algoritmaları:** Veriler kullanılarak enerji tüketimini optimize edecek kararlar üretilir.
- **Uygulama Katmanı:** HVAC, aydınlatma veya diğer elektrikli sistemlere otomatik komutlar gönderilir.

6.8.1 Yapay Zeka Destekli Enerji Tasarrufu Algoritmaları

Yapay zeka (YZ), enerji yönetimi alanında artık sadece veri analizi aracı değil, doğrudan karar veren bir optimizasyon mekanizmasıdır. Bu algoritmalar, enerji tüketimi, çevresel koşullar, kullanıcı alışkanlıkları, takvimsel veriler ve dış girdiler (örneğin elektrik fiyatı, hava durumu gibi) ile enerji sistemlerine gerçek zamanlı müdahalede bulunabilir. Yani, sistem sadece enerji kullanımı analiz etmez, aynı zamanda hangi sistem ne zaman ne kadar çalışmalı sorusunun yanıtını da verir.

Enerji tasarrufu algoritmaları, makine öğrenimi (ML), derin öğrenme (DL) ve optimizasyon teknikleri ile geliştirilen bir yapıdır. Algoritmalar;

- Geçmiş ve gerçek zamanlı verileri analiz eder,
- Farklı senaryoları değerlendirir ve
- Enerji tüketimi için en verimli çalışma modlarını seçer.

6.8.1.1 Tipik Girdi-Karar Süreci

Yapay zeka algoritmaları aşağıdaki girdileri analiz eder:

- İç ortam sıcaklığı, nem, CO₂ seviyesi (İç hava kalitesi sensörleri)
- Dış hava koşulları (hava durumu API'leri veya meteorolojik istasyonlar)
- Kullanıcı doluluk durumu ve kullanım senaryoları
- Geçmiş tüketim desenleri

- Elektrik tarifiesi
- Kullanıcı konfor tercihleri

Ve bu verilere göre şunları yapabilir:

- HVAC sisteminin çalışma saatlerini ayarlar
- Isıtma/soğutma set noktalarını optimize eder
- Enerji yoğunluğu yüksek saatlerde sistemleri erteleyebilir
- Konfor seviyesinden sapmadan minimum enerjiyle işletim sağlar

Özellikle sık kullanım alanlarında (örneğin HVAC) enerji tüketimini minimuma indirirken konforu garanti ederler.

6.8.1.2 Algoritma Türleri ve Özellikleri

- **Regresyon ve sınıflandırma algoritmaları:** Basit enerji tüketimi tahminlerinde kullanılır.
- **Karar ağaçları ve rastgele orman (random forest):** Sensör verileri üzerinden anormallik tespiti için uygundur.
- **Yapay sinir ağları ve LSTM:** Karmaşık zaman serisi verilerinde verimlilik ve uyumluluk sağlar.
- **Takviye öğrenmesi (reinforcement learning):** Dinamik ortamda gerçek zamanlı kontrol ve optimizasyonu öğrenir.

6.8.2 Akıllı Termostat ve Aydınlatma Kontrolü Algoritmaları

Akıllı termostatlar ve aydınlatma kontrol sistemleri, enerji tüketiminin doğrudan azaltılabildiği en görünür iki alandır. Yapay zeka bu alanlarda, kullanıcı davranışlarını öğrenerek ve çevresel değişkenleri göz önüne alarak, hem enerji tasarrufunu hem de kullanıcı konforunu maksimum düzeyde tutacak otomatik kararlar verir.

6.8.2.1 Akıllı Termostat Algoritmaları

a) Temel Çalışma Prensipleri

Akıllı termostatlar yalnızca sıcaklık ayarı yapmaz, aynı zamanda:

- Kullanıcının evde olup olmadığını
- Dış hava durumunu
- Zaman dilimini

- Geçmiş davranış kalıplarını analiz ederek, ısıtma/soğutma sistemlerini önceden ayarlar, gereksiz çalışmaları engeller ve ısıtma/soğutma yükünü minimumda tutar.

Kullanılan Yapay Zeka Teknikleri

Algoritma	Kullanım Açıklaması
<i>LSTM (Long Short-Term Memory)</i>	Geçmiş sıcaklık/konfor verilerine göre gelecekteki konfor ihtiyacını tahmin eder
<i>Q-Learning (Reinforcement Learning)</i>	Kullanıcı konforu + enerji tüketimi dengesini zamanla öğrenir ve setpoint'leri optimize eder
<i>Decision Trees / Random Forest</i>	Hangi durumda ne yapılmalı sorusuna net ve açıklanabilir kurallarla yanıt verir

6.8.2.2 Akıllı Aydınlatma Kontrolü Algoritmaları

Aydınlatma sistemleri binalarda toplam tüketimin %15-25'ini oluşturabilir. Ancak yapay zeka destekli algoritmalar sayesinde bu oran ciddi şekilde düşürülebilir. Bu sistemler:

- Işık sensörleri (lüks ölçer)
- Hareket/doluluk sensörleri (PIR/ultrasonik)
- Zamanlayıcılar
- Konumsal veriler (coğrafi otomasyon) gibi girdilerle, ışık ihtiyacını optimize eder.

Kullanılan AI Teknikleri

Algoritma	Kullanım	Özellik
<i>Fuzzy Logic</i>	"Yeterince parlak mı?" gibi insan benzeri kararlar üretir	Doğal ışıkla uyumlu kontrol
<i>Neural Networks</i>	Gün boyunca ışık desenini öğrenerek sürekli optimizasyon yapar	Kademeli karartma/senaryo üretimi
<i>Bayesian Optimization</i>	En iyi ışık seviyesi ve enerji dengesini belirler	Konfor/enerji dengesini korur

6.8.2.3 Termostat ve Aydınlatma Entegrasyonunun Getirisi

Bu sistemler birlikte kullanıldığında, özellikle büyük ofis binalarında ya da kampüslerde ciddi verimlilik sağlar.

<i>Sistem</i>	<i>Enerji Tasarrufu Potansiyeli</i>	<i>Ekstra Faydalar</i>
Akıllı Termostat	%10–25	Konfor + talep yanıt uyumu
Akıllı Aydınlatma	%15–40	Görsel konfor + doğal ışık dengesi
İkisinin entegrasyonu	%30–45	Bina genelinde dengeli yük yönetimi

Kaynak:

https://www.researchgate.net/publication/343339781_Energy_Efficiency_Effectiveness_of_Smart_Thermostat_Based_BEMS

Yapay zeka destekli otomatik optimizasyon sistemleri, enerji verimliliğinde dönüşümün temelini oluşturur. Enerji tasarrufu algoritmaları, akıllı termostatlar ve aydınlatma sistemleriyle desteklenen bina otomasyon algoritmaları, ihtiyaçlara göre esneyebilen, enerjiyi ekonomik ve çevre dostu kullanan sistemlerin gelişmesini sağlar. Bu gelişmelerle hem tüketim maliyetleri azalır hem de karbon ayak izi küçülür. Bundan sonraki dönemde cihazların yapay zeka algoritmalarıyla otonom öğrenme ve davranış geliştirmesi, enerji yönetiminde yeni standartlar oluşturacaktır.

6.9 Enerji Verimliliği Senaryoları

6.9.1 Sektörel Uygulamalar

Enerji verimliliği, yalnızca tüketimi azaltmak değil; aynı zamanda tüketimi doğru yerde, doğru zamanda ve doğru miktarda kullanmak anlamına gelir. Bu hedefin gerçekleştirilmesinde yapay zeka (YZ), enerji sektöründe devrim niteliğinde bir rol oynamaktadır. Ancak her sektörün tüketim yapısı, üretim süreçleri, kullanıcı davranışı ve altyapısı farklı olduğundan, enerji verimliliği senaryolarının sektöre özel olarak kurgulanması gerekir.

Sanayi sektörü, dünya genelinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %37'sini oluşturmaktadır. Yüksek enerji yoğunluklu proseslerin bulunduğu bu alanda, enerji verimliliği yalnızca bir çevre politikası değil, aynı zamanda rekabet üstünlüğü sağlayan bir ekonomik stratejidir.

Bu noktada yapay zeka, sadece tüketimi takip eden değil, önleyici, yönlendirici ve odaklı çalışan senaryo tabanlı algoritmalar geliştirme potansiyeli ile devreye girmektedir. Endüstriyel otomasyon sistemlerine entegre edilen AI destekli enerji verimliliği algoritmaları, üretim kalitesini etkilemeden enerji tüketimini düşürebilmekte ve karbon ayak izini minimize edebilmektedir.

Yapay zeka tabanlı senaryo algoritmaları, gerçek zamanlı üretim verilerini, ekipman davranışlarını ve çevresel girdileri analiz ederek optimum enerji kullanım senaryoları oluşturur. Bu sistemlerin temel hedefleri:

- Süreçlerdeki enerji israflarını belirlemek
- Alternatif üretim yollarını modellemek
- Ekipmanların enerji verimliliğini karşılaştırmak
- Dinamik enerji fiyatlarına göre yük planlaması yapmak
- Talep tarafı yönetimi ile şebekeyle uyumlu olmak

Zorluklar ve Uyum Süreci

- **Veri kalitesi:** Eski tip makinelerden veri alma zorluğu
- **İnsan kaynağı:** Enerji uzmanlarının AI modellerini yorumlamada desteğe ihtiyacı
- **Siber güvenlik:** AI tabanlı otomasyon sistemlerinin güvenli çalışması için sürekli izleme

AI Tabanlı Enerji Senaryoları = Yeni Sanayi Devrimi

Endüstriyel tesislerde yapay zeka tabanlı enerji verimliliği senaryoları, geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşarak **süreç bazlı, davranış odaklı ve adaptif enerji yönetimini mümkün kılar.**

Bu sistemler sayesinde sanayi:

- Enerji maliyetlerini düşürür
- Karbon salımını azaltır
- Şebeke ile uyumlu çalışarak esneklik sağlar
- Verimlilik–kalite–sürdürülebilirlik dengesini aynı anda yakalar

6.9.2 Endüstriyel Alanlara Göre Bazı Uygulamalar ve Algoritmalar

A) Gıda Endüstrisi

Hedef: Soğutma sistemlerinde enerji optimizasyonu

Algoritma: LSTM + PID kontrol hibriti

İşlev: Soğuk hava depolarında yük ve sıcaklık eğrileri öğrenilir. Gereksiz soğutmalar azaltılır.

B) Çimento ve Cam Endüstrisi

Hedef: Yüksek sıcaklık proseslerinde enerji dengeleme

Algoritma: Model Predictive Control (MPC)

İşlev: Fırın sıcaklık kontrolü ve üretim hattında yük optimizasyonu.

C) Otomotiv Sektörü

Hedef: Montaj hatlarında atıl enerji yüklerini önleme

Algoritma: Random Forest + Anomali Tespiti

İşlev: Hatlardaki boşta çalışan ekipmanlar otomatik belirlenip pasif moda alınır.

D) Tekstil ve Boya Sektörü

Hedef: Sıcaklık ve nem kontrollü kurutma sistemlerinde optimizasyon

Algoritma: Fuzzy Logic + Regression Trees

İşlev: Nem oranı ve üretim yüküne göre kurutma sıcaklığı dinamik olarak ayarlanır.

E) Kimya ve İlaç Sanayi

Hedef: Sürekli proseslerde enerji/ısı değişim optimizasyonu

Algoritma: Bayesian Networks + RL

İşlev: Reaktör sıcaklığı, basınç, enerji tüketimi analiz edilerek verimli reçeteler oluşturulur.

6.9.3 Enerji Verimliliği Senaryoları ve Algoritmik Modeller

A) Makine Öğrenme Tabanlı Senaryolar

- **Denetimli öğrenme:** Enerji tüketim geçmişinden yeni senaryolar üretmek için kullanılır.
- **Takviyeli öğrenme:** Sistemin kendi davranışını optimize etmesi, pik talep yönetimi için uygundur.
- **Anomali tespiti:** Anormal tüketim davranışlarının algılanması otomatik olarak yapılır.

B) Optimizasyon Algoritmaları

- **Genetik algoritmalar:** Karmaşık enerji dağıtım problemlerinde optimum çözümü bulur.
- **Kuantum hesaplama destekli optimizasyonlar:** Yüksek boyutlu enerji yönetimi modellerinde çözüm süresini kısaltır.
- **Model Predictive Control (MPC):** Şebeke ve tesislerde önceden tahmin yaparak kontrollü enerji dağılımını sağlar.

Kaynak:<https://www.ituvakif.org.tr/yapay-zeka-destekli-akilli-elektrik-guc-sistemleri-gelecegin-enerji-cozumleri>

<https://www.winssolutions.org/tr/2025-surdurulebilirliigi-destekleyen-100-guclu-yapay-zeka-cozumu/>

Endüstriyel tesislerde enerji verimliliği, sektörler arası dönüşümün en kritik alanıdır. Yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmalarıyla desteklenen enerji verimliliği senaryoları, yalnızca tüketim optimizasyonu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda arıza önleme, bakım planlama, yenilenebilir entegrasyonu ve yük yönetimini de kapsayan bütünsel bir yaklaşımdır. Bu teknolojiler sayesinde tesisler; enerji maliyetlerini düşürür, operasyonel verimliliği artırır ve çevresel sürdürülebilirliğe büyük katkı sağlar. Gerçek dünya uygulamaları ve akademik araştırmalar, yapay zeka destekli senaryoların etkisini açıkça ortaya koymaktadır ve bunun yaygınlaşması enerji sektörünün geleceği için kaçınılmazdır.

6.10 Çevresel Etki Senaryoları

Yapay zeka (YZ) yalnızca enerji tasarrufu ve maliyet düşürme aracı değildir; aynı zamanda karbon ayak izini azaltmak ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için stratejik bir çevresel araç haline gelmiştir. Özellikle endüstriyel tesislerde, bina kampüslerinde ve enerji yoğun sektörlerde, YZ algoritmalarıyla geliştirilen enerji yönetimi stratejileri; karbon salımlarını ölçme, azaltma ve öngörme potansiyeline sahiptir.

6.10.1 Çevresel Etki Senaryoları: Dijitalleşme ve Yapay Zekanın Rolü

Çevresel etki senaryoları, farklı enerji kullanım ve üretim metodlarının sera gazı emisyonları, hava kirliliği ve kaynak tüketimi üzerindeki etkilerini modelleyerek geleceğe dönük stratejiler geliştirmeyi sağlar.

Yapay zeka;

- Büyük veri ve sensörlerle desteklenen gerçek zamanlı çevresel izleme sağlar,
- Dijital ikizler ve simülasyonlarla senaryolar oluşturur,

- Enerji sistemlerinin performansını karbon emisyonları açısından optimize eder,
- Siberetik güvenlik risklerini azaltır,
- Operasyonel süreçlerde karbon salımını minimize edecek kararları otomatik uygular.

Enerji sektöründe YZ tabanlı bu yaklaşımlar şebeke stabilizasyonuna, enerji kaynaklarının verimli kullanılmasına ve sürdürülebilir kentin/tesisin inşasına katkı sağlamakta, enerji dünyasının dönüşümüne öncülük etmektedir.



Enerji tüketimi artık sadece bir maliyet kalemi değil, çevresel bir sorumluluktur.

Dünya genelinde enerji kullanımı, iklim değişikliğinin en büyük tetikleyicilerinden biri olan sera gazı (GHG) salımlarının yaklaşık %73'ünden sorumludur (IPCC, 2021). Bu bağlamda enerji verimliliği, yalnızca bir teknik optimizasyon süreci değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin merkezinde yer alan bir müdahale stratejisidir.

Enerji verimliliği yolculuğu, uzun yıllar boyunca daha çok ekonomik fayda odaklı yürütülmüştür. Sanayi tesisleri, binalar ve enerji sistemleri; daha az enerji kullanarak aynı çıktıyı almayı hedeflemiş, bu da genellikle maliyet tasarrufu, üretim optimizasyonu gibi çıktılarla tanımlanmıştır.

Ancak 2020 sonrası dönemde bu bakış açısı değişmiştir. Paris Anlaşması'nın uygulamaya geçmesi, AB Yeşil Mutabakatı'nın yön verici olması ve SKDM (Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması) gibi düzenleyici araçlarla birlikte enerji verimliliği artık çevresel hedeflerin gerçekleşme aracına dönüşmüştür.

Enerji Verimliliğinin Evrimi: Maliyet → Karbon → Sürdürülebilirlik

<i>Dönem</i>	<i>Odak</i>	<i>Tanım</i>
1980–2000	Maliyet Tasarrufu	Enerji faturasını azaltmak için cihaz veya sistem verimliliğini artırma
2000–2020	Karbon Azaltımı	Enerji yoğunluğunu azaltarak CO ₂ salımlarını düşürme
2020–Sonrası	Sürdürülebilirlik	Enerji verimliliğini çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) çerçevesine alma

Bu evrimsel süreçte, yapay zeka teknolojilerinin yükselişi enerji verimliliğine ölçeklenebilirlik, otomasyon, öngörülebilirlik ve stratejik uyum kazandırmıştır. Artık YZ sayesinde yalnızca enerji tüketimi azaltılmıyor; aynı zamanda karbon etkisi hesaplanıyor, azaltım senaryoları üretiliyor ve çevresel hedeflere katkı otomatik olarak izlenebiliyor.

Yapay Zeka ile Sürdürülebilirlik Arasında Kurulan Yeni Köprü

Yapay zekanın enerji yönetimi sistemlerine entegrasyonu ile birlikte artık enerji verimliliği şu alanlarda doğrudan çevresel katkıya dönüşmektedir:

- **Karbon Ayak İzi Ölçümleme**

YZ destekli otomasyon sistemleri, gerçek zamanlı emisyon izleme yaparak her cihazın çevresel etkisini hesaplayabilir. → GHG Protocol ve ISO 14064 standardına uygun veri analitiği sağlar.

- **Azaltım Senaryoları Oluşturma**

Dinamik yapay zeka modelleri, alternatif enerji kullanım biçimlerine göre "emisy on azaltım senaryoları" üretebilir. Hangi strateji ne kadar karbon azaltır? Otomatik yanıt üretilebilir.

- **Yenilenebilir Enerji Uyum u**

Güneş ve rüzgar gibi de ğışken kaynakların tahmininde ve şebeke yönetiminde YZ kullanılarak entegrasyon başarı oranı artırılır. Net sıfır karbon hedefiyle doğrudan uyum sağlanır.

- **Tedarik Zinciri ve SKDM Uyumlu Raporlama**

Özellikle Avrupa'ya ihracat yapan firmalar için, SKDM kapsamında karbon raporlaması zorunlulu ğu getirilmiştir. YZ destekli sistemler bu raporları otomatik hazırlayabilir.

6.10.2 Karbon Ayak İzi Azaltım Projeksiyonları: Algoritmalar ve Modellemeler

Karbon ayak izi azaltım projeksiyonları, mevcut tüketim ve üretim alışkanlıklarının de ğiştirilmesiyle sağlanacak emisyon düşüşlerinin sayısal olarak tahmin edilmesidir. Modellerde şu algoritmalar kullanılır:

- Zaman serisi analizleri ve *makine öğrenmesi* temelli tahmin algoritmaları,
- Optimzasyon algoritmaları ile enerji kaynaklarının ve tüketimden kaynaklı karbon salımının minimuma indirilmesi,
- Dijital ikizler ve bunların gerçek zamanlı veri beslemesiyle sürekli güncellenen projeksiyonlar,
- Senaryo bazlı simülasyonlar ile farklı enerji politikalarının çevresel etkilerinin karşılaştırılması.

6.10.2.1 Yapay Zeka ile Karbon Azaltım Modellemesi Neden Gereklidir?

Geleneksel karbon ayak izi hesaplama yöntemleri (örneğin GHG Protocol ya da ISO 14064 bazlı LCA yaklaşımları) statik ve geçmişe dönüktür. Bu modeller genellikle yıllık ortalamalar, sabit emisyon faktörleri ve manuel veri girişleri üzerinden yürütülür.

Ancak günümüzde;

- Enerji sistemleri anlık de ğişkenlik gösteriyor,
- Yenilenebilir enerji üretimi öngörülemiyor,
- Tedarik zincirleri dinamik,

- Karbon fiyatları dalgalanıyor.

Dolayısıyla, karar vericilere geleceğe dönük, senaryo tabanlı, gerçek zamanlı ve öğrenebilen karbon projeksiyonları sunmak için yapay zeka tabanlı algoritmalar devreye giriyor.

a) Kullanılan Başlıca Algoritmalar ve Modeller

Denetimli Öğrenme (Supervised Learning)

Kullanım alanı: Tarihsel tüketim verilerinden karbon emisyon tahmini

- **Lineer Regresyon / Ridge / Lasso:** Basit karbon emisyon öngörülleri
- **Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM):** Çok değişkenli çevresel verilerle daha doğru lar üretir
- **Support Vector Regression (SVR):** Özellikle küçük verilerde yüksek doğruluk sağlar

Zaman Serisi Analizi (Time Series Forecasting)

- **ARIMA / Prophet:** Dönemsel karbon emisyon trendlerini tahmin eder
- **LSTM (Long Short-Term Memory):** Elektrik, doğal gaz, yakıt tüketimi gibi verilerin zamana bağlı davranışlarını öğrenerek CO₂ tahmini üretir

Karar Ağaçları ve Karar Destek Sistemleri

- **Random Forest:** En yüksek karbon katkısı olan süreçleri tespit eder (ör. buhar sistemleri, HVAC, basınçlı hava).
- **Decision Trees:** Alternatif senaryoların karbon çıktısını görselleştirir

Bayesyen Ağlar

- Belirsizlik altında karbon salımlarını modellemek için kullanılır.
- Özellikle **tedarik zincirindeki dolaylı (Kapsam 3) emisyonların tahmininde** öne çıkar.

Reinforcement Learning (Pekiştirmeli Öğrenme)

- Sistemlere kendi kendine en düşük karbonlu davranış öğrenme yetisi kazandırır.
- Örneğin bir fırın, hangi sıcaklık – zaman aralığında en az karbon üretildiğini deneyerek öğrenebilir.

Hesaplama Örneği – Emisyon Azaltım Projeksiyonu

Senaryo	Uygulama	YZ Yöntemi	Yıllık CO ₂ Azaltımı
Akıllı HVAC kontrolü	Ofis kampüsü	RL + Decision Tree	80 ton
Süreç optimizasyonu (fırın)	Seramik üretimi	LSTM	350 ton
Pik yük kontrolü	Endüstriyel soğutma sistemleri	XGBoost	120 ton
Üretim planlama optimizasyonu	Otomotiv fabrikası	Bayes + SVR	600 ton

6.10.2.2 Gelecek Perspektifi: Tahmine Dayalı Karbon Stratejileri

Yapay zekanın karbon ayak izi yönetiminde gelecekte şu özellikleri daha çok kullanılacaktır:

- Kendi kendine karar verebilen enerji sistemleri
- Tesis bazlı karbon bütçeleme
- Gömülü karbonun (embedded carbon) dijital ikizler ile modellenmesi
- Enerji tedarikçileriyle eş zamanlı karbon uyum sistemleri

Bu sayede karbon ayak izini sadece ölçmekle kalmayacağız; **karbon verimliliği** sağlayan karar sistemleri geliştirerek **net sıfır hedeflerine gerçek katkı** sağlayabileceğiz.

6.10.3 Yapay Zeka ile Karbon Hesaplama Yaklaşımları

YZ, doğrudan enerji tüketimi üzerinden karbon salımı projeksiyonu yapabilen algoritmalarla çalışır. Bunlar genellikle aşağıdaki üç bileşeni içerir:

- Veri Girişi: Enerji kaynak türleri (doğal gaz, elektrik, dizel vs.)
- Emisyon Faktörleri: IPCC, Ecoinvent veya GHG Protocol gibi kaynaklardan alınan çarpanlar
- Zaman Serisi Modellemesi: Yıllık ya da operasyonel bazda değişen emisyon analizleri

6.10.3.1 Veri Kaynağı ve Özellik Mühendisliği (Feature Engineering)

Yapay zeka ile karbon hesaplama yapabilmek için önce veri kaynakları belirlenir. Bunlar şunları içerebilir:

- Elektrik, doğalgaz, su ve yakıt tüketim verileri (IoT, sayaçlar, ERP)
- Tedarik zinciri hareketleri (tedarikçi verisi, taşıma yöntemleri)
- Üretim çıktıları ve proses verileri
- Ürün yaşam döngüsü verileri (LCA – Life Cycle Assessment)

6.10.3.2 Model Türleri ve Kullanım Amaçları

a) Regresyon Modelleri (Linear, Lasso, Ridge, SVR)

- **Ne işe yarar?:** Emisyon tahmini
- **Veri ihtiyacı:** Sayısal, sürekli veriler
- **Avantajı:** Hızlı ve yorumlanabilir modellerdir.

b) Ağaç Tabanlı Yöntemler (Random Forest, XGBoost, LightGBM)

- **Ne işe yarar?:** Çok değişkenli karbon tahminleri, süreçlerin emisyon etkisini sınıflandırma
- **Avantajı:** Hataları azaltır, yüksek doğruluk sağlar.
- **Örnek:** Bir çimento fabrikasında hangi fırının, hangi saatlerde en fazla CO₂ ürettiğini tespit etmek.

c) Yapay Sinir Ağları (Neural Networks)

- **Ne işe yarar?:** Karmaşık proseslerin karbon etkisini modellemek (özellikle enerji sistemlerinde)
- **Kullanım Alanı:** LSTM (Long Short-Term Memory) modelleri ile enerji tüketimi üzerinden CO₂ projeksiyonu yapılabilir.

d) Bayesyen Ağlar ve Olasılıksal Modeller

- **Ne işe yarar?:** Belirsizlik altında karbon hesaplaması, tedarik zinciri senaryoları
- **Kullanım Alanı:** Hammaddeye göre değişen karbon yükü tahmini

6.10.4 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu Potansiyeli

Yenilenebilir enerji kaynakları (Güneş, Rüzgar, Hidro, Biyokütle, Jeotermal vb.) karbon ayak izinin düşürülmesinde tek başına değil, yapay zeka ve enerji analitik sistemleriyle entegre çalışınca potansiyelini maksimum düzeye çıkarır.

- YZ algoritmaları değişken üretimi yönetir,
- Üretim tahminleri ve talep yanıt stratejileri ile enerji arz-talep dengesini sağlar,
- Enerji depolama sistemleri ve mikro şebekelerle sinerjik çalışır.

İşlevsel Potansiyel Alanları

- **Güneş üretim tahminleri** → CNN ve LSTM modelleri ile yapılır
- **Rüzgar değişkenliği analizi** → Stokastik YZ algoritmaları
- **Şebeke uyumluluğu** → Yük yönetimi ve net ölçüm algoritmaları
- **Depolama entegrasyonu** → Batarya yönetimi ve şarj-boşaltım optimizasyonu

6.11 Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkı Analizi

Yapay zeka destekli çevresel ve enerji verimliliği programları, yürütülen projelerin sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkısını artırır. Bu katkılar;

- Doğru planlama ile enerji üretim ve tüketiminde karbon salımının azaltılması,
- Şehir ve endüstri bazında kirlilik değerlerinin düzelmesi,
- Ekonomik fayda; daha az enerji tüketimi, düşük operasyon maliyeti,
- Sosyal etkiler; halk sağlığı, enerji erişiminde adalet,
- Ve uzun vadede iklim hedeflerinin gerçekleştirilmesine hızlanır.

6.11.1 YZ'nin SDG'lerle (Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları) Uyumu

Yapay zeka tabanlı enerji verimliliği ve karbon azaltım senaryoları, özellikle aşağıdaki sürdürülebilir kalkınma hedeflerine (SDG) doğrudan katkı sunar:

SDG Hedefi	Katkı Açıklaması
7 – Erişilebilir ve Temiz Enerji	Verimli enerji kullanımı, yenilenebilir enerji adaptasyonu
9 – Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı	Endüstride dijital dönüşüm, üretkenlik ve sürdürülebilir teknoloji kullanımı
11 – Sürdürülebilir Şehirler	Akıllı binalar, entegre kampüs yönetimi, talep yanıt sistemleri
13 – İklim Eylemi	Karbon salımı azaltımı, emisyon senaryoları, iklim adaptasyonu politikalarının veri temeli

Uygulama Örneği: Microsoft Carbon Negative Plan (2030)

Microsoft, yapay zeka destekli enerji yönetimi platformlarıyla sadece karbon nötr olmayı değil, 2030'a kadar "karbon negatif" olmayı hedeflemektedir.

- YZ destekli dijital ikizler, enerji tüketimi ve karbon salımı üzerinde gerçek zamanlı etki yaratır.
 - Örnek uygulamalar: HVAC yapay zeka kontrolü, batarya şarj optimizasyonu, yenilenebilir üretim eşlemesi
- Kaynak: <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/>

6.12 Enerji Verimliliği İnternet ve Yapay Zeka Maliyetleri

6.12.1 İnternet Enerji Tüketimi

Neden İnternet Enerjisi Önemli?

İnternet, görünmez bir altyapı gibi çalışır; ancak bu altyapı, devasa miktarda enerji tüketir. Evde bir e-posta göndermek ya da video izlemek gibi basit işlemler bile global düzeyde enerji harcanmasına neden olur. Bu enerji, cihazların tüketiminden veri merkezlerinin soğutulmasına kadar uzanan geniş bir sistem tarafından kullanılır.

6.12.1.1 İnternet Enerji Tüketiminin Temel Bileşenleri

İnternetin enerji tüketimini anlamak için zincirin tüm halkalarını incelemek gerekir:

Aşama	Açıklama	Ortalama Enerji Tüketimi*
Cihaz Kullanımı	Bilgisayar, akıllı telefon gibi kullanıcı cihazları	2–30 Wh/saat
Yerel Ağ (Modem vs.)	Ev modemleri, Wi-Fi router'lar	5–15 Wh/saat
Erişim Ağı	Hücreli ağ, fiber optik ağ gibi bağlantı altyapıları	0.2–5 Wh/GB
Veri Aktarımı	İnternet omurgası üzerinden veri taşıma	1–10 Wh/GB
Veri Merkezleri	Sunucuların çalışması ve soğutulması	0.5–5 kWh/1000 işlem

*Not: Veriler genel ortalamalardır. Gerçek tüketim bölgeye, teknolojiye ve trafiğe göre değişebilir.

6.12.1.2 Evden Sunucuya Giden Bir Verinin Enerji Yolculuğu

Bir internet kullanıcısı olarak örneğin YouTube'da bir video izlediğinizde ya da Google'da bir arama yaptığınızda, bu işlem yalnızca bilgisayarınızda gerçekleşmez. Veri, ev ağınızdan başlayarak dünyanın başka bir yerindeki bir veri merkezine ulaşır. Bu süreçte birçok fiziksel ve dijital bileşen çalışır ve her biri enerji tüketir.

Bu yolculuk 5 ana aşamada gerçekleşir:

1. Uç Cihaz (kullanıcı cihazı)
2. Yerel Ağ (modem/router)
3. Erişim Ağı (ISP – internet servis sağlayıcısı)
4. İnternet Omurgası (uluslararası veri aktarımı)
5. Veri Merkezi (sunucu işleme ve depolama)

Her bir adımı şimdi detaylandıralım:

A) Uç Cihaz: Bilgisayar, Telefon, Tablet

Enerji Tüketimi:

- Ortalama bir dizüstü bilgisayar: **20–60 W/saat**
- Akıllı telefon: **2–6 W/saat**
- Tablet: **5–10 W/saat**

Ne Olur?

- İşlemci, RAM ve ekran kartı içerikleri işler.

- Veriyi ağ kartı aracılığıyla modem/router'a yollar.

Basit bir web araması $\approx 0.3 \text{ Wh}$ 1 saatlik HD video izleme $\approx 20\text{--}25 \text{ Wh}$

Not:Kullanılan donanımın türü, ekran çözünürlüğü, uygulamanın işlem yoğunluğu gibi etmenler enerji tüketimini doğrudan etkiler.

B) Yerel Ağ: Modem ve Router

Enerji Tüketimi:

- Modem: **5–10 W/saat**
- Router: **3–7 W/saat**

Ne Olur?

- Cihazlardan gelen veriler kablosuz veya kablolu olarak toplanır.
- Veriler, ISP'ye gönderilmek üzere dış ağa yönlendirilir.

Donanım Etkisi:

Wi-Fi 6 modemler, daha yüksek verimlilikle çalışır ancak yoğun trafik altında daha fazla enerji harcar.

Ortalama bir evde yıl boyunca sadece modem/router kullanımı $\approx 80\text{--}120 \text{ kWh/yıl} \rightarrow \approx 56\text{--}84 \text{ kg CO}_2$

C) Erişim Ağı: İnternet Servis Sağlayıcıları (ISP)

Enerji Tüketimi:

- 1 GB veri için ortalama enerji: **2–5 Wh**
- Fiber altyapılar daha verimlidir; ADSL/Copper kablo sistemleri daha fazla enerji harcar.

Ne Olur?

- Veriler, ISP'nin yerel ağ geçitlerine (gateway) gönderilir.
- Gerekirse farklı yönlendiriciler (router) üzerinden yönlendirilerek omurgaya bağlanır.

Teknik Detay:

- Erişim ağı; DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), OLT (Optical Line Terminal) gibi aktif bileşenler içerir.
- Bu donanımlar sürekli çalıştığı için 7/24 enerji tüketir.

D) İnternet Omurgası: Global Veri Aktarımı

Enerji Tüketimi:

- Ortalama **1–10 Wh/GB**
- Uluslararası veri aktarımı daha yüksek tüketimlidir.

(örneğin Türkiye'den ABD'deki bir sunucuya giden veri).

Ne Olur?

- Veriler, fiber optik kablolar üzerinden binlerce kilometre seyahat eder.
- Bu sistemde router, switch, optik sinyal güçlendiricileri (amplifier/repeater) gibi donanımlar çalışır.

Altyapı Örneği:

- DE-CIX Frankfurt (Avrupa'nın en büyük internet değişim noktası) → **Dakikada 10 Tbit/s'**yi aşan veri geçişi.
- Yalnızca bu tür değişim merkezlerinin yıllık tüketimi **50+ GWh**'yi bulabilir.

E) Veri Merkezi: Sunucular, Depolama, Soğutma

Enerji Tüketimi:

- Ortalama **15–30 Wh/GB** (veri işleme, depolama ve soğutma dahil)
- Yapay zeka işlemleri veya 4K içerik akışı için bu oran 2–3 kat artabilir.

Ne Olur?

- Sunucu, gelen veriyi işler ve karşılık verir (örneğin bir arama sonucu döner).
- Aynı zamanda depolama sistemleri (NAS, SAN) ve soğutma sistemleri (HVAC) çalışır.

PUE (Power Usage Effectiveness):

Veri merkezlerinin enerji verimliliği bu oranla ölçülür.

PUE = Toplam Enerji / BT Ekipman Enerjisi

İdeal PUE: 1.0

Ortalama: 1.6–2.0

Google veri merkezleri: ≈1.1–1.2

Örnek Senaryo Hesaplaması

Bir kullanıcı, 1 saat boyunca 1080p çözünürlükte bir YouTube videosu izliyor. Verinin ABD'deki bir sunucudan geldiğini varsayalım.

Aşama	Tüketim (Wh)	Açıklama
Kullanıcı cihazı	25 Wh	Dizüstü bilgisayar
Modem/Router	8 Wh	Ortalama tüketim
Erişim ağı	4 Wh	Fiber altyapı
İnternet omurgası	6 Wh	Kıtalararası veri transferi
Veri merkezi	20 Wh	Video işleme + CDN + soğutma
Toplam	63 Wh	≈ 0.063 kWh ≈ 0.044 kg CO ₂ salımı (ortalama 0.7 kg CO ₂ /kWh ile)

1 milyar kullanıcı aynı anda video izlediğinde:

63 GWh enerji tüketimi → ≈ 44,000 ton CO₂ salımı

Enerji Tüketimi – Alternatif Senaryolar Karşılaştırması

Aktivite	Ortalama Enerji Tüketimi	CO ₂ Salımı*	Not
1 saatlik 1080p video izleme	60–70 Wh	~44 g	Uzun mesafeli veri transferi
1 saatlik müzik akışı	10–15 Wh	~7–10 g	Ses dosyaları daha küçük
1 arama sorgusu (Google vb.)	0.3 Wh	~0.2 g	AI destekli aramalarda bu miktar artabilir
1 e-posta gönderimi (metin)	0.05 Wh	<0.04 g	Resim ve dosya ekleri bu değeri artırır

*Karbon salımı, OECD ortalama enerji karışımı (0.7 kg CO₂/kWh) üzerinden hesaplanmıştır.

Enerji Tasarrufu için Ne Yapabiliriz?

Adım	Kazanım
Video kalitesini HD'ye düşür	%30–50 daha az veri
Wi-Fi modemleri kapatmak	Aylık 5–10 kWh tasarruf
Edge server kullanan servisler	Uzak veri merkezlerine göre %40 daha az enerji
CDN (Content Delivery Network) tercihleri	Kullanıcıya yakın sunucu → düşük gecikme ve düşük enerji

6.12.1.3 Global Perspektif: Tüm İnternet Ne Kadar Enerji Tüketiyor?

- Dünya genelinde internet trafiği 2024 itibarıyla **400 exabyte/ay** seviyesini geçti.
- Cisco verilerine göre internet altyapısı ve veri merkezleri, dünya elektriğinin yaklaşık **%2-3'ünü** tüketiyor.
- Tahminlere göre bu oran 2030'da **%8'e** kadar çıkabilir.

6.12.1.4 Ülkelere Göre Dağılım ve Karbonsal Etki

Aşağıdaki tablo, bazı ülkelerdeki internet altyapısının karbon ayak izine etkisini göstermektedir:

Ülke	İnternet Kullanıcı Sayısı	Tahmini Yıllık Enerji Tüketimi (TWh)	Karbon Salımı (Mt CO ₂ e)
ABD	300 milyon	80	56
Almanya	82 milyon	25	17.5
Türkiye	73 milyon	12	8.4
Hindistan	900 milyon	60	42

Not: Veriler IPCC 2006 Emisyon Faktörleri ve IEA raporlarıyla modelleme yöntemiyle elde edilmiştir.

6.12.1.5 Enerji Tüketiminin Nedenleri

a) Video akışı servisleri (Netflix, YouTube, TikTok)

- Global internet trafiğinin %60'ından fazlasını oluşturur.

b) Bulut bilişim ve uzaktan çalışma

- Ofis yazılımlarının bulutta çalışması veri merkezlerini zorlar.

c) IoT cihazları

- 2025'e kadar 75 milyar cihazın internete bağlı olması bekleniyor.

6.12.1.6 Verimlilik Geliştirme Yöntemleri

a) Edge Computing

- Verileri merkezi yerine kullanıcıya yakın noktada işler.
- Veri merkezine giden veri trafiğini azaltır → daha az enerji.

b) Yenilenebilir enerji kullanan veri merkezleri

- Google, Amazon gibi şirketler veri merkezlerini güneş ve rüzgarla çalıştırıyor.

c) Data throttling / video sıkıştırma teknolojileri

- 4K yerine HD akışa geçiş, %30–40 daha az enerji harcarabilir.

6.13 Yapay zeka enerjisi enerji tüketimi problemleri

Yapay zeka (YZ), her geçen gün daha fazla hayatımıza entegre olurken, bu teknolojinin arka planındaki **muazzam enerji ihtiyacı** çoğu zaman göz ardı ediliyor.

Neden YZ Enerjisi Bu Kadar Gündemde?

- Gelişmiş yapay zeka sistemleri, devasa veri kümeleri üzerinde eğitilir.
- Model boyutları büyüdükçe, hem eğitim hem de kullanım (inference) sırasında ihtiyaç duyulan enerji katlanarak artar.
- Bu durum yalnızca enerji tüketimiyle sınırlı kalmaz; **karbon ayak izi, altyapı yatırımları ve sürdürülebilirlik** konularını da doğrudan etkiler.

6.13.1 Yapay Zeka Modelleri Nasıl Çalışır ve Neden Enerji Tüketir?

Yapay zeka sistemleri iki temel süreçte enerji tüketir:

- **Model Eğitimi (Training)**
- **Model Kullanımı (Inference)**

a) Model Eğitimi

- Devasa veri setleri üzerinde matematiksel işlemler gerçekleştirilir.
- Bu işlemler yüksek performanslı GPU / TPU sistemlerinde yapılır.

Örnek: GPT-3 modeli

- 175 milyar parametrelili bir modeldir.
- Eğitim süreci 355 GPU yılına denk gelmiştir.
- Tahmini enerji tüketimi: **1.3 GWh**
- Tahmini karbon salımı: **~552 ton CO₂e** (lokasyona göre değişir)

b) Model Kullanımı (Inference)

- Kullanıcıdan gelen veriye yanıt üretmek için model çalıştırılır.
- Genellikle daha düşük güç gerektirir ancak sürekli ve milyonlarca kez yapıldığı için toplamda büyük enerji harcaması oluşur.

Hesaplama Örneği:

1 ChatGPT sorgusu $\approx$ 0.03–0.1 Wh

1 milyon sorgu = 30–100 kWh $\rightarrow$ $\approx$ 21–70 kg CO₂e (ortalama 0.7 kg CO₂/kWh)

Enerji Tüketim Faktörleri

Faktör	Açıklama
Model büyüklüğü	Parametre sayısı arttıkça işlem yükü katlanır.
Eğitim süresi	Daha uzun eğitim döngüsü $\rightarrow$ daha fazla enerji.
Donanım türü	GPU/TPU/CPU türleri farklı enerji verimliliğine sahiptir.
Lokasyon	Elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynağı karbon salımını belirler.

Soğutma sistemleri

Veri merkezlerinde toplam tüketimin %30–40'ı soğutma sistemine gider.

Yapay Zeka Tabanlı Modellerin Karşılaştırılması

Model	Parametre Sayısı	Eğitim Enerjisi (kWh)	Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ e)*
BERT (2018)	110 milyon	~650 kWh	~455
GPT-2 (2019)	1.5 milyar	~1,300 kWh	~910
GPT-3 (2020)	175 milyar	~1,287,000 kWh (1.3 GWh)	~552,000
BLOOM (2022)	176 milyar	1.2 GWh	400,000–850,000 (lokasyona göre)

*Karbon ayak izi tahminleri kullanılan enerji karışımına göre farklılık gösterir (örneğin Almanya'da daha yüksek, Norveç'te daha düşük olur).

6.13.2 Enerji Tüketimi Neden Bir Problem?

A) Karbon Ayak İzi

YZ modellerinin eğitimi, kömür veya doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen elektrik ile yapıldığında büyük karbon salımlarına neden olur.

B) Su Tüketimi

Veri merkezlerinin soğutulması için milyonlarca litre su kullanılır.

Örneğin:

- Google'ın veri merkezleri 2022'de 20 milyar litre su kullanmıştır.

C) Donanım Tüketimi ve E-atık

YZ modelleri için özel donanımlar (NVIDIA A100 gibi GPU'lar) kullanılır ve bunların üretimi de ciddi çevresel maliyetler yaratır.

6.13.2.1 YZ Enerji Verimliliği İçin Hesaplama Örneği

Basitleştirilmiş Formül:

Toplam Enerji = (Model Eğitimi Süresi [saat]) × (Donanım Gücü [W]) × (Kullanılan Donanım Sayısı)

Örnek:

- 8 GPU ile 200 saat eğitim
- Her biri 300 W güç tüketiyor

Toplam Enerji = $200 \times 300 \times 8 = 480,000 \text{ Wh} = 480 \text{ kWh}$

CO₂e $\approx 480 \times 0.7 = 336 \text{ kg CO}_2$

Lokasyonun Etkisi: Aynı Model, Farklı Emisyon

Ülke	Enerji Karışımı	Aynı Modelin CO ₂ Salımı
Almanya	%60 fosil yakıt	Yüksek
Norveç	%95 hidroelektrik	Çok düşük
Çin	%70 kömür	Çok yüksek
Türkiye	%35 yenilenebilir + %65 fosil	Orta düzeyde

Bu nedenle sadece enerji miktarı değil, nereden geldiği de çok önemlidir.

6.13.2.2 Neden Optimize Edilmeli?

- Enerji maliyetleri hızla artıyor.
- Kurumsal sürdürülebilirlik hedefleri bu tür tüketimleri sınırlamayı şart koşuyor.
- Avrupa Yeşil Mutabakatı, SKDM ve diğer regülasyonlar enerji verimliliğini zorunlu hale getiriyor.

YZ Enerji Sorunlarına Yaklaşımlar

Yöntem	Açıklama
Model küçültme	Daha az parametre ile benzer performans (örneğin DistilBERT)
Transfer öğrenme	Eğitim maliyetini azaltır; önceden eğitilmiş modelleri kullanır
Verimli donanım	Düşük enerjiyle çalışan özel işlemciler (TPU, ASIC, vs.)
Yenilenebilir enerji	Veri merkezlerinin güneş, rüzgar gibi kaynaklara geçişi
Soğutma teknolojileri	Sıvı soğutma, yeraltı veri merkezleri

Yapay zeka sistemleri, enerji açısından oldukça yoğun teknolojilerdir. Özellikle büyük dil modelleri gibi sistemler, karbon salımı, su kullanımı ve elektrik talebi gibi çevresel etkileriyle dikkat çeker. Bu nedenle hem teknolojik gelişim hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından enerji verimliliği stratejilerinin bir an önce hayata geçirilmesi gerekmektedir.

6.14 Verimlilik artışı ve enerji maliyeti dengeleri

Yapay zeka (YZ) ve dijitalleşme, üretkenlikte ve verimlilikte önemli artışlar sağlarken, bu sistemlerin enerji tüketimi de ciddi bir maliyet oluşturmaktadır. Bu bölümde, "Kazanç mı daha fazla, enerji yükü mü?" sorusuna teknik, ekonomik ve çevresel perspektiflerden yaklaşacağız. Aynı zamanda üretken yapay zeka, otomasyon ve veri işleme sistemlerinin enerji-verimlilik dengesi ayrıntılı olarak analiz edilecektir.

6.14.1 Verimlilik Kazancı Nedir?

Verimlilik kazancı, daha az kaynakla (zaman, iş gücü, enerji) daha fazla çıktıya ulaşılması anlamına gelir. Yapay zeka sayesinde:

- İnsan gücü daha karmaşık işlere yönlendirilebilir.
- Süreçler otomatize edilerek hata oranı ve tekrar işlemleri azaltılır.
- Büyük veri kümeleri daha hızlı işlenir → karar alma süreçleri hızlanır.

Örnek Verimlilik Alanları

Alan	YZ'nin Katkısı	Kazanç Türü
Finans	Otomatik fraud tespiti	Zaman, iş gücü
Lojistik	Rota optimizasyonu, tahminleme	Yakıt tasarrufu
Sağlık	Görüntü analizi, teşhis destek sistemleri	Hız, doğruluk
Üretim	Arıza tahmini, proses optimizasyonu	Enerji ve bakım maliyeti
Tarım	Sulama, ilaçlama optimizasyonu	Su ve kimyasal tasarrufu

6.14.2 Enerji Maliyetleri – Artan Teknolojik Tüketim

YZ teknolojileri ne kadar verimli olursa olsun, **temel bir fiziksel maliyet** taşır: **enerji**. Yapay zeka uygulamalarının enerji tüketimi; model eğitimi, çalıştırılması, depolama ve veri transferi gibi alanlara dağılır.

Her birim verimlilik kazanımı, çoğu zaman **ek bir enerji maliyetini** beraberinde getirir.

6.14.2.1 Enerji – Verimlilik Dengesinin Nicel Analizi

Örnek Senaryo: Lojistik Rota Optimizasyonu

- Geleneksel yöntemle yılda 10 milyon km araç kullanımı
- YZ tabanlı optimizasyon sonrası mesafe %10 azaldı → 1 milyon km azaldı
- Yakıt tasarrufu: $\approx 350,000$ litre/dizel → = **930 ton CO₂ azaltımı**

Ancak bu sistemin çalışması için:

- Yılda 200,000 sorgu işleniyor
- Sistem toplamda ≈ 200 kWh enerji tüketiyor → = **140 kg CO₂ salımı**
- Enerji gideri küçük ama karbon faydası büyük → Net pozitif etki

6.14.2.2 Ama Ters Örnekler de Var

Örnek: YZ destekli müşteri hizmetleri chatbot'u

- 1 milyon müşteri sorgusu ayda → = **50,000–100,000 Wh (50–100 kWh)**
- Karşılığı: **Dakikada 10 saniye tasarruf, toplamda 2,800 saat insan emeği**
- Ama bu model büyükse (GPT benzeri):
- Eğitimi sırasında = **1 GWh enerji harcandı**
- Kısa vadeli kullanımlarda **enerji geri dönüşü düşük** olabilir

6.14.3 Verimlilik Artışı Hangi Durumda Enerjiye Değer?

Bu sorunun cevabı genellikle verimlilik kazancının "**türüne**" ve "**ölçeğine**" göre değişir.

Durum	Yorum
Makro ölçeğe üretim	YZ'nin enerji maliyeti, verim kazanımıyla dengelenir
Mikro ölçeğe bireysel kullanım	Enerji tüketimi zaman zaman kazancın üstüne çıkabilir
Sürekli kullanım gerektiren süreçler	Enerji gideri amorti edilebilir
Büyük dil modelleri ile basit işler	Enerji verimsizliği yaşanabilir

6.14.3.1 Rebound Etkisi (Geri Tepme Etkisi)

Verimlilik arttıkça tüketim de artabilir.

Bu, enerji ekonomisinde "Jevons Paradoksu" olarak bilinir.

Örnek:

- YZ sayesinde sunucu verimliliği %30 artar → aynı kaynakla 30% daha fazla işlem yapılır
- Ancak bu durum veri trafiğini artırabilir → Toplam enerji yine artar

Yani verimlilik = enerji tüketiminin mutlaka azalması anlamına gelmez.

6.14.3.2 Formül: Enerji Maliyeti Karşılığı Verimlilik Kazancı

Basit bir karşılaştırma modeli:

Verimlilik Enerji Dengesi (VED) = Toplam Kazanç / Toplam Enerji Tüketimi

- $VED > 1$: Sistem enerji açısından verimli
- $VED < 1$: Enerji tüketimi kazancı aşıyor

Örnek:

- Otomasyon sayesinde yılda 2000 adam/saat tasarrufu → ≈ 60,000 EUR
- Enerji maliyeti yıllık 1,500 EUR

→ $VED = 60,000 / 1,500 = 40$ → Sistem çok verimli

6.14.3.3 Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirme

- Enerjiye karşı elde edilen verim, **sadece finansal değil, çevresel değerle** de ölçülmelidir.
- SKDM (Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması) gibi sistemler, karbon maliyetini enerji maliyetinin bir parçası haline getiriyor.
- Bu nedenle **düşük karbonlu veri merkezleri** ve **verimli modeller** tercih edilmeli.

Verimlilik Enerji Dengesini Optimize Etmenin Yolları

Yöntem	Açıklama

Küçük ve özel amaçlı modeller	Her iş için devasa modeller yerine optimize çözümler
Enerji verimli algoritmalar	Az işlemle aynı sonucu üreten modeller (quantization vb.)
Yalnızca gerektiğinde çağırma	Sürekli çalışmak yerine tetiklemeli sistem kullanımı
Edge AI	Veriyi merkeze göndermeden cihaz üzerinde işleme
Yeşil bilişim stratejileri	Yenilenebilir enerji + soğutma verimliliği

Yapay zeka teknolojileri büyük verimlilik kazançları sağlayabilir, ancak bu kazanımlar **dikkatli planlanmazsa enerji yükünü artırabilir**.

Bu nedenle verimlilik kazanımı ve enerji maliyeti arasında **dengeli bir yaklaşım** gereklidir. Teknik, finansal ve çevresel boyutların tümü hesaba katıldığında, sürdürülebilir yapay zeka uygulamaları için yol haritası daha net ortaya çıkar.

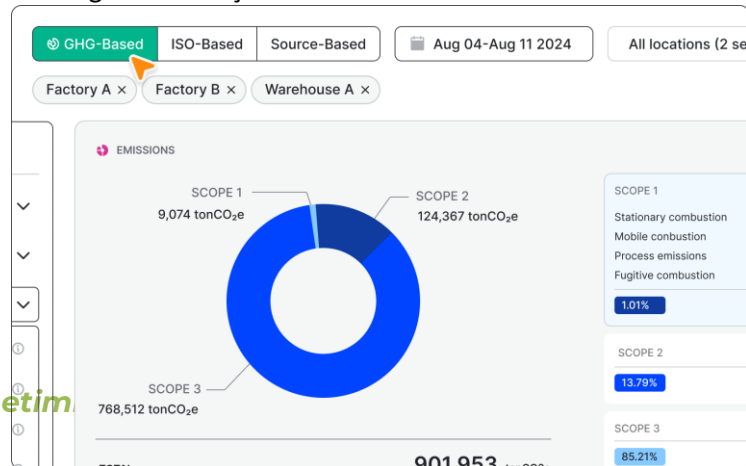


7. Kurumlar İçin Karbon Ayak İzi Raporlanması Neden Gereklidir?

- ❖ **Yasal Zorunluluklar:** Öncelikle AB ile ticari faaliyette bulunan kurumlar ve bu kurumların tedarikçileri için yasal düzenlemeler söz konusudur. Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'na (CBAM) göre, ihraç edilen ürün dolayısıyla ortaya çıkan karbon için kurumlar vergi zorunluluğuyla karşılaşacaktır. Yeşil Mutabakat Döngüsel Eylem Planına göre ise, birçok sektörün karbon hesabını yaptırmaları gerekecektir.
- ❖ **Müşteri ve Yatırımcı Talepleri:** Yeşil Dönüşümün küresel çapta önem kazandığı görülmektedir. Sektör fark etmeksizin düşük karbonlu/karbon nötr ürün ve hizmetler de müşteri ve yatırımcılar tarafından hızla değer kazanmakta ve bunları tercih sebebi yapmaktadır.
- ❖ **Kurum ve Marka İmajı:** Küresel bir iklim krizini sonlandırmak, hızlı harekete geçmeyi ve kendi eylem planını oluşturmayı gerektirmektedir. Kurumların karbon ayak izini hesaplatması, iklim ve çevreye duyarlı bir duruş sergilemesi açısından olumlu geri bildirimler sağlayarak marka imajını artıracaktır. Dünya'nın önde gelen markaları, karbon ayak izini hesaplatarak bunu pazarlama stratejisi olarak oldukça etkin kullanmaktadır.
- ❖ **Emisyon Ticaret Sistemine Katılım:** Türkiye'de hazırlıkları yapılan Emisyon Ticaret Sistemi'nde, sera gazı emisyonu fazla olan kurum az olan kurumdaki karbon sertifikası satın alabilecek, yani sistemde bulunan kurumlar arasında karbon emisyonu ticareti söz konusu olacaktır.

7.1 Dijital Karbon Ayak İzi Muhasebe Ve Ölçümleri

Küresel iklim değişikliği sorunu için önlem alınmazsa, daha sonraki dönemlerde de etkisinin artarak süreceği ve bunun telafisi olmayan bir durumu ortaya çıkaracağı belirtilmektedir. Artan sıcak hava dalgaları, şiddetli hava olayları, kıyı taşkınları ile kar ve kutup buz örtüsünün kaybı ile birlikte, insanların gerçekleştirdiği endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerinden kaynaklanan, atmosferde sera gazlarının birikmesinin beklenen etkilerinden sadece birkaçı olarak ortaya çıkmaktadır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin 6. değerlendirme raporu, iklim değişikliğinin ekosistem ve insanlara yönelik kayıp ve zararlara sebep olduğunu, tarım ve gıda üretimi üzerinde olumsuz etkilerinin arttığını ve ekonomik olarak büyümeyi zorlaştırdığını kanıtlamaktadır. Son yirmi yılda, özellikle 1997 Kyoto Protokolü ve 2015 Paris Anlaşması gibi uluslararası iklim zirveleriyle beraber, uluslararası iklim politikasında tüm dünya ülkelerini ilgilendiren sonuçlar ortaya çıkmış ve bu konuda bölgesel, ulusal ya da uluslararası birtakım önlemler alınmaya başlanmıştır. Öncesinde ise 1972 yılında Stockholm'de, 1992 yılında Rio de Janeiro ve 2002 yılında Johannesburg'da ülkeler toplanarak iklim değişikliğinin küresel boyuttaki etkilerini kabul ederek değerlendirmişlerdir. Karbon ayak izi, kişi ve kuruluşların faaliyetleri, enerji tüketimi ve ulaşım gibi etkinlikleri sonucunda doğrudan ya da dolaylı atmosfere salınan sera gazı miktarını karbondioksit eşdeğeri cinsinden belirtmek için kullanılır. Kyoto Protokolünde; CO₂, metan (CH₄), azot oksitler (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFCs), perflorokarbonlar (PFCs) ve kükürt heksaflorür (SF₆) gibi gazlardan oluşan ve atmosferde ısı tutma özelliğine sahip bileşikler sera gazı olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda yer alan CO₂ eşdeğeri (CO₂ eşd.); CO₂ haricinde diğer sera gazlarının aynı miktar CO₂'e kıyasla 20-23.900 kat daha fazla ısı tutabilme kapasitesine sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu birim kullanılarak tüm sera gazları ortak bir paydada toplanarak, yapılan emisyon hesaplamalarının anlaşılması ve karşılaştırılması kolaylaştırılmıştır. Bu tabloya göre en tehlikeli sera gazı SF₆, en az olansa CO₂ gibi görünmektedir. Ancak miktar açısından CO₂ diğer sera gazlarına kıyasla çok yüksek seviyede olmasından dolayı durum tam tersi olduğu belirtilmiştir.



7.2 Dijital Karbon Ayak İzi İzleme (E-Dijital Karbon)

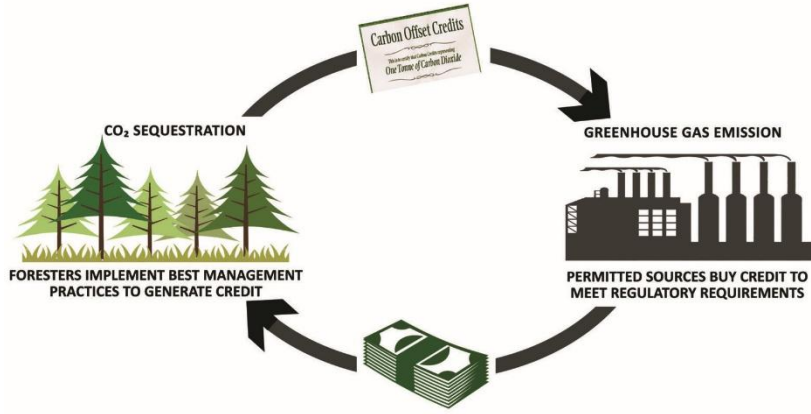
Nüfus, şehirleşme ve sanayileşmenin artmasıyla birlikte çevresel sorunlar günümüzde hızla ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu etkilerin başında ise küresel iklim değişikliği gelmektedir. İklim değişikliğinin etkilerini azaltılması için sera gazı emisyonlarının hızlı bir şekilde azaltılması gerekmektedir. Günümüzde karbon ayak izi iklim değişikliği ile ilgili en yaygın kullanılan çevresel göstergelerden biridir. Kurumsal faaliyetlerin, ürünlerin veya hizmetlerin yüksek karbon emisyonlarına sebep olması işletmeleri iş süreçlerini tekrar değerlendirerek daha çevreci yaklaşımları ön plana almaya yöneltmiştir. Sanayi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyon miktarının yoğunluğundan dolayı kurumsal boyutta karbon ayak izi hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Yasal zorunlulukların yanında müşteri talepleri, kurumsal imaj, pazarlama stratejilerinden dolayı şirketler gönüllü ya da zorunlu olarak kurumsal boyutta karbon ayak izi hesaplaması yapmaktadır. Kurumsal karbon ayak izi azaltımlarıyla kurumlar ekosisteme karşı sorumluluklarını yerine getirirken küresel pazardaki yerlerini sağlamlaştırma olanağına sahip olurlar. Bu da sürdürülebilir şirket olmanın ilk ve en büyük adıımıdır. Kurumsal karbon ayak izi hesaplaması için detaylı ve gerçek verilerle envanter oluşturulması gerekmektedir. Kapsam 1 ve Kapsam 2 faaliyetleri için veriye ulaşım sağlanırken Kapsam 3 faaliyetleri için tedarikçilerden alınması gereken veriye ulaşmak kolay olmamaktadır. İşletmelerin bu konuda özel çaba sarf etmeleri gerekmektedir. Kurumsal karbon ayak izinin hesaplanıp, takip edilmesi yani mevcut durum analizi ile birlikte işletmelerin iş süreçlerini, paydaş ilişkilerini, tedarik zincirlerini ve diğer tüm ilgili faaliyetlerini değerlendirerek sera gazı emisyonu azaltımı için gerekli önlemlerin belirlenmesi ve uygulaması gerekmektedir. Bu çalışma, sera gazı emisyonları, kurumsal sürdürülebilirlik, kurumsal karbon ayak izi ve hesaplama yöntemlerine genel bir bakış sunmaktadır. Ayrıca kurumsal düzeydeki karbon ayak izi hesaplayıcılarının kılavuz olarak kullanılabileceği kurumsal karbon ayak izi hesaplamasını ve hesaplama sonucunda elde edilen sonuçların nasıl değerlendirileceğini gösteren örnek bir çalışmayı içermektedir. Şirketlerin kurumsal karbon yönetimlerini yapılarına entegre etmeleri gerekmektedir. Gelecek için engel olarak görünen bu konu ile ilgili yapacakları çalışmalar bu engeli kaldırarak onları ileriye taşıyacaktır.

IEA bilgisine dayanarak 2023 CO₂ Emisyonları Raporu'na göre kişi başına düşen ortalama karbon ayak izi 4,8 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama, küresel toplam karbon emisyonlarının dünya nüfusuna bölünmesiyle uygulanmıştır. Türkiye, karbon ayak izi ortalaması artan ülkeler arasındadır. Türkiye'de ortalama karbon salınımı 2023 yılında, bir önceki yıla göre %6,9 artış göstererek 598,9 milyon ton CO₂ eş değerine ulaşmıştır. Kişi başına düşen sera gazı emisyonunun ise 2023'te 7 tona ulaştığı tespit edilmiştir.



7.3 Gönüllü Karbon Piyasaları

Gönüllü Karbon Piyasaları; hükümetlerin iklim değişikliği ile mücadele hedefleri ve politikalarından bağımsız olarak geliştirilmiş, iş dünyasından, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları ve bireylere kadar ilgili her kesimin karbon denkleştirme maksadıyla katılım sağlayabileceği niteliğe sahiptir. İklim değişikliği ve etkileri konusunda artan kamuoyu bilinci ve karbon denkleştirmenin güvenilir bir önlem stratejisi olduğu gerçeğinin kabul görmesi bu piyasaların son yıllarda hızla gelişmesini sağlamıştır. Bu piyasada ticareti yapılan emisyon sertifikalarına Gönüllü Emisyon Azaltım (Voluntary Emission Reduction- VER) sertifikası adı verilmektedir. Faaliyetleri çerçevesinde oluşturdukları sera gazı emisyonlarını dengelemek isteyen firmalar emisyon miktarlarını hesaplayarak bu emisyonlarını azaltmak ve dengelemek için emisyon azaltımı sağlayan projelerin üretmiş oldukları karbon sertifikalarını sosyal sorumluluk prensibi çerçevesinde satın almaktadırlar. Dünyada gönüllü piyasanın 2011 yılı itibariyle hacmi 95 Mt CO₂e ve değeri 576 milyon US Dolarıdır.



Zorunlu Piyasalar Karbon piyasaları karbon emisyonu azaltımı karşılığında kazanılan karbon kredilerinin el değiştirdiği piyasalardır. 2005 yılında Kyoto protokolünün yürürlüğe girmesiyle karbon piyasaları hızla büyümüştür. Kyoto protokolü ile bazı gelişmiş ülkelere yönelik emisyon üst sınırları belirlenmiştir. Bu ülkelerin sorumluluklarını yerine getirmelerini kolaylaştırmak amacıyla esneklik mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar aracılığıyla azaltılan sera gazı emisyonları karşılığı olarak işletmeler karbon sertifikaları elde etmişler ve bu sertifikaların işlem gördüğü zorunlu piyasalar ortaya çıkmıştır. Zorunlu piyasalar olarak adlandırılan bu esneklik mekanizmaları sayesinde, gelişmiş ülkeler diğer ülkelerde bazı projeler aracılığıyla, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayarak, bu projeler sonucu sera gazı emisyonları azaltım kotaları ile de yükümlülüklerini yerine getirmektedirler.

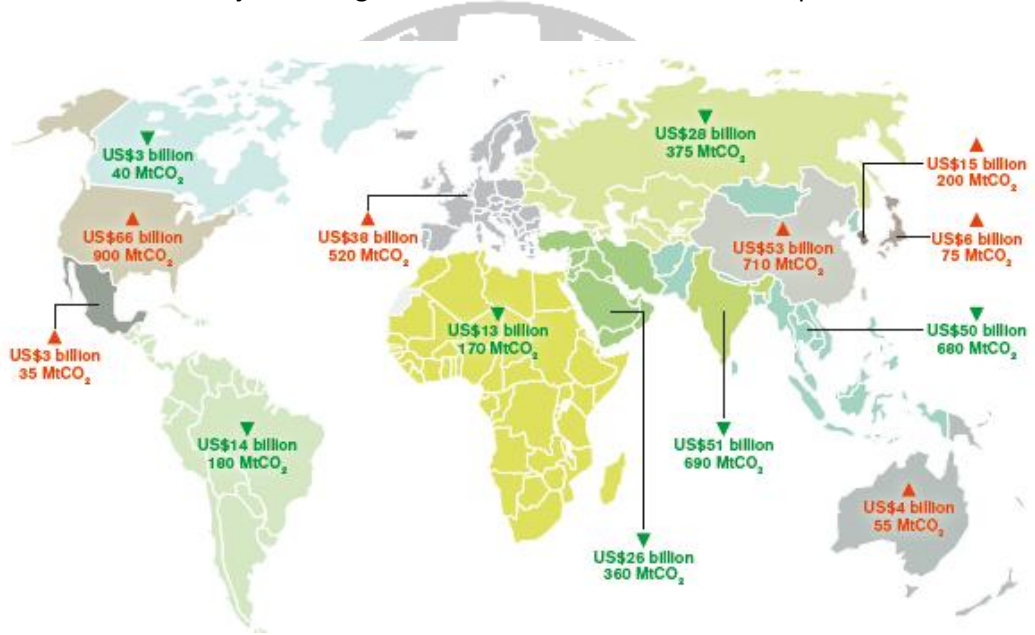
7.4 Türkiye'nin Karbon Piyasalarındaki Mevcut Durumu Ve Geleceği

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında atılan adımlarda Türkiye'nin konumu incelendiğinde düzenlenen her bir uygulama ülkelere farklı yükümlülükler ve yaptırımlar getirirken, Türkiye de söz konusu uygulamalar içerisinde farklı durumlara dâhil olmuştur. BMİDÇS'nin hazırlanması esnasında, atmosferde bulunan sera gazı miktarında salımlar bakımından tarihsel sorumlulukları olduğu düşünülen ve bu nedenle salım azaltımlarında çaba göstermeleri istenen ülkeler "gelişmiş ülkeler" olarak adlandırılmış ve Sözleşmede yerleştirilmişlerdir. Bu ülkelere OECD üyeliği bulunan ülkeler ise, gelişmekte olan ülkelere finansman ve teknoloji desteği sağlamakla yükümlü kılınmışlar ve Sözleşmeye dâhil edilmişlerdir. OECD'nin kurucu ülkelerinden olan Türkiye de, bu nedenle hem Ek-I hem de Ek-II de yer almıştır. Türkiye için öngörülen bu statü, Türkiye'ye emisyon azaltımının yanında diğer gelişmekte olan ülkelere finansman ve teknoloji desteği sağlama konusunda da bazı sorumluluklar getirmektedir. Ancak Türkiye, BMİDÇS'nin yürürlüğe girdiği 1994 yılından sonra, ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ilkesi, ulusal ve bölgesel

kalkınma öncelikleri ve özel koşulları bağlamında konumunun yeniden ele alınması gerektiğini dile getirerek, BMİDÇS'nin hem Ek-I hem de Ek-II listesinden çıkarılmayı talep etmiştir.

Lahey Konferansı'nda alınan karara bağlı olarak 2001 yılında Marakeş Konferansı'nda Türkiye'nin özel koşullarının dikkate alınarak, isminin Ek-I'de kalması ancak Ek-II'den silinmesi kabul edilmiştir. Böylece Türkiye'nin sanayileşme sürecini tamamlamamış gelişmekte olan bir ülke olarak sadece OECD üyesi olması nedeniyle iklim değişikliği ile mücadelede adil olmayan bir konumda yer almasının önüne geçilmiştir. Dolayısıyla, Protokol'ün 2008- 2012 yıllarını kapsayan ilk yükümlülük döneminde Türkiye'nin herhangi bir sayısallaştırılmış emisyon azaltım yükümlülüğü bulunmamıştır. BMİDÇS kapsamında Ek-I ve Protokol kapsamında ise Ek-B Dışı ülke konumunda bulunan Türkiye, herhangi bir sayısal sera gazı azaltım yükümlülüğü ne sahip olmaması nedeniyle Protokol'ün ilk yükümlülük dönemi boyunca Protokol'ün esneklik mekanizmalarından faydalanamamaktadır. Ancak; bu mekanizmalardan bağımsız olarak geliştirilen, çevresel ve sosyal sorumluluk ilkesi prensibinde oluşturulan Gönüllü Karbon Piyasasına yönelik projeler Türkiye'de uygulanmaktadır. Mevcut durumda, Ülkemizde 2014 yılı Nisan ayı itibarıyla Gönüllü Karbon Piyasasında işlem gören 308 adet proje bulunmaktadır. Bu projelerden yıllık 20 Milyon tCO₂ eşdeğerinin üzerinde sera gazı emisyon azaltımı gerçekleşmesi beklenmektedir.

Gönüllü Karbon Piyasasında Yürütülen Projelerin Sektörel Dağılımı (Nisan 2014 itibarıyla) Proje Türü Sayısı Yıllık Emisyon Azaltımı (tCO₂ /yıl) Hidroelektrik Santrali 159 8.747.634 Rüzgar Santrali 106 7.951.391 Atıktan Enerji Üretimi/Biyogaz 27 3.069.273 Enerji Verimliliği 10 432.081 Jeotermal 6 405.309 Toplam 308 20.605.688 dır.



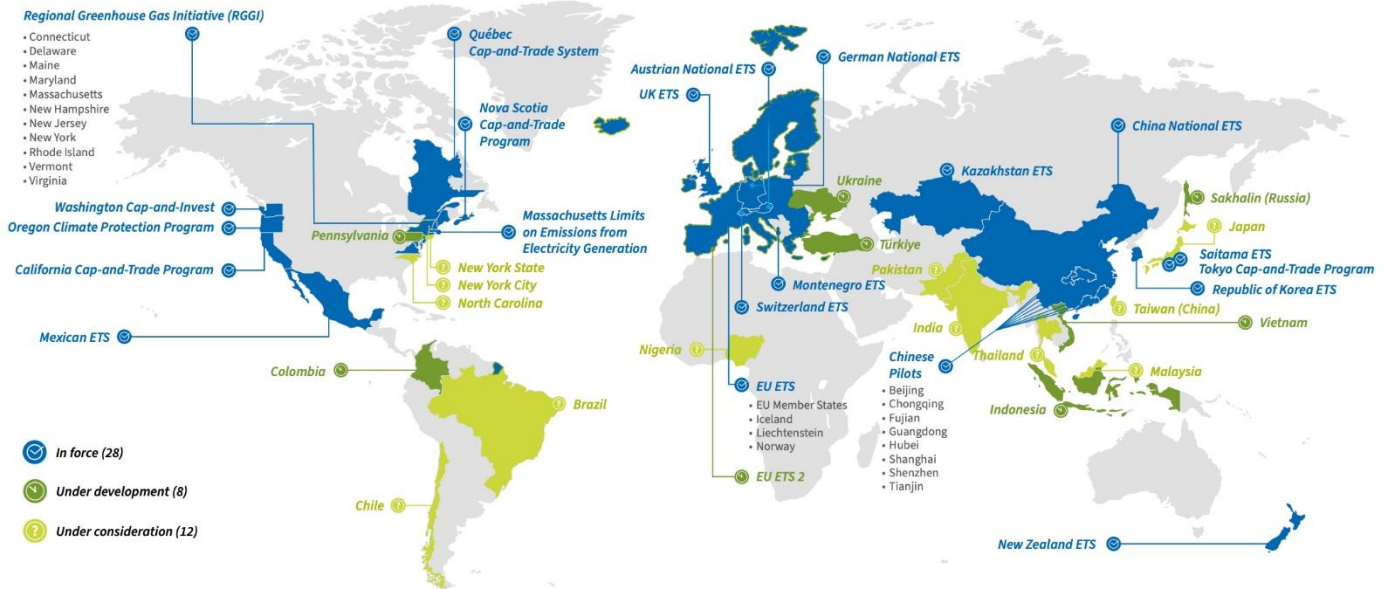
Küresel gönüllü karbon kredisi pazarı büyüklüğünün 2024 yılında 4,04 milyar ABD doları olacağı tahmin ediliyor ve 2030 yılına kadar 23,99 milyar ABD dolarına ulaşması, 2025 ile 2030 yılları arasında %35,1'lik bir bileşik yıllık büyüme oranıyla büyümesi öngörülüyor. Pazar büyümesi, şirketlerin net sıfır emisyonu ulaşma sözü vermesi ve tamamen ortadan kaldırılamayan emisyonları telafi etmek için dengeleme ihtiyacı tarafından yönlendiriliyor.

7.5 Pazar Boyutu Ve Trendler:

- Kuzey Amerika gönüllü karbon kredisi pazarı küresel pazara hakim oldu ve 2024 yılında %37,07'nin üzerinde en büyük gelir payına sahip oldu.
- ABD gönüllü karbon kredisi pazarı Kuzey Amerika pazarına hakim durumda ve 2024 yılında %81,0'ın üzerinde bir gelir payına sahip oldu.
- Proje bazında yenilenebilir enerji, 2024 yılında %39,09'un üzerinde bir gelir payıyla gönüllü karbon kredisi pazarına hakim oldu.
- Başvurulara göre 2024 yılında en yüksek gelir payı %32,21 ile endüstriyel segmentte gerçekleşti.
- Son kullanıma göre, özel şirketler gönüllü karbon kredisi pazarına hakim oldu ve 2024 yılında %62,13'ün üzerinde bir paya sahip oldu.

7.6 Temel Pazar İstatistikleri:

- 2024 Pazar Boyutu: 4,04 Milyar ABD Doları
- 2030 Tahmini Pazar Boyutu: 23,99 Milyar ABD Doları
- CAGR (2025-2030): %35,1
- Kuzey Amerika: 2024'teki en büyük pazar
- Asya Pasifik: En hızlı büyüyen pazar



Piyanın, emisyonları azaltmaya odaklanmaktan tamamen ortadan kaldırmaya doğru kayması ve 2030 yılına kadar emisyon azaltma kredilerinin piyanın %35'ini oluşturmaları bekleniyor. Gönüllü karbon piyanının büyümesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada karbon kredilerinin artan önemiyle de destekleniyor. Şirketler ve hükümetler, emisyon azaltımları için güvenilir teşviklere duyulan ihtiyacın farkında. Piyanın, kredilerin kalitesi ve doğrulanabilirliğine odaklanmanın giderek daha önemli hale gelmesiyle birlikte gelişmeye devam etmesi bekleniyor.

Kurumsal net sıfır taahhütleri, gönüllü karbon kredisi piyanındaki büyümenin önemli bir itici gücüdür. Şirketler net sıfır emisyonu ulaşma sözü verdikçe, kendi karbonsuzlaştırma çabalarıyla tamamen ortadan kaldıramadıkları emisyonları telafi etmek için giderek daha fazla gönüllü karbon piyasasına yöneliyorlar. Bu talep artışı, şirketlerin iklim değişikliği konusunda harekete geçme ve sürdürülebilirliğe olan bağlılıklarını gösterme aciliyetinden kaynaklanıyor. Gönüllü karbon piyasası, şirketlere kalan emisyonlarını telafi etmeleri ve küresel emisyon azaltma çalışmalarına katkıda bulunmaları için bir mekanizma sağlıyor.

Gönüllü karbon kredisi piyasası, şirketlere ve bireylere karbon ayak izlerini azaltmaları ve daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmaları için çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Piyasa, atmosferden bir ton karbondioksit veya eşdeğerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması anlamına gelen karbon kredilerinin alım satımına olanak tanır. Gönüllü karbon kredisi piyanındaki temel fırsatlar arasında yeni karbon dengeleme projelerinin geliştirilmesi, karbon ticaret platformlarının büyümesi ve şirketler ve hükümetler tarafından karbon kredilerinin giderek daha fazla benimsenmesi yer almaktadır.

7.7 Bölgesel Görüşler

Kuzey Amerika gönüllü karbon kredisi pazarı, küresel pazara hakim oldu ve 2024 yılında %37,07'nin üzerinde en büyük gelir payını oluşturdu. Kuzey Amerika pazarı, karbon dengelemeye yönelik artan talep ve şirketlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma ihtiyacının etkisiyle önemli bir büyüme yaşıyor.

7.8 Abd Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri

ABD gönüllü karbon kredisi pazarı, Kuzey Amerika pazarına hakim durumda ve 2024 yılında %81,0'ın üzerinde bir gelir payına sahip oldu. Talepteki artış, büyük ölçüde karbon ayak izlerini azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele çalışmalarına katkıda bulunmak isteyen şirketler ve bireylerden kaynaklanıyor.

Kanada'daki gönüllü karbon kredisi pazarının %35,4'lük en hızlı bileşik yıllık büyüme oranıyla (CAGR) büyümesi bekleniyor. Kanada'nın gönüllü karbon pazarındaki (VCM) karbon kredisi talebi, kurumsal ve bireysel karbon dengeleme talebinin artmasıyla önemli ölçüde arttı.

7.9 Avrupa Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri

Avrupa gönüllü karbon kredisi piyasası, yüksek kaliteli kredi arayışında olan kurumsal alıcıların güçlü talebiyle önemli bir büyüme kaydetti.

Almanya'daki gönüllü karbon kredisi pazarı, 2024 yılında %35,2'nin üzerinde bir oranla en büyük paya sahip oldu. Pazar, emisyonlarını dengelemek ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak isteyen Alman şirketlerinin güçlü talebiyle yönlendiriliyor.

İspanya gönüllü karbon kredisi pazarının tahmin döneminde %36,8'lik bir bileşik yıllık büyüme oranıyla (CAGR) büyümesi bekleniyor. İspanya gönüllü karbon kredisi pazarı, şirketlerin ve hükümet girişimlerinin artan talebiyle

büyüyor. Doğa temelli kredilere, özellikle ormancılık ve arazi kullanım projelerine, karbon tutma kabiliyetleri ve biyolojik çeşitliliğin korunması ve ekosistem restorasyonu gibi ortak faydalar sunmaları nedeniyle yüksek talep var.

7.10 Asya Pasifik Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri

Asya Pasifik'teki gönüllü karbon kredisi piyasası, hükümet girişimleri ve kurumsal sürdürülebilirlik hedefleriyle yönlendiriliyor; ormancılık ve arazi kullanım projeleri, karbon sekestrasyonunda ve ekolojik faydalarda önemli oyuncular olarak ortaya çıkıyor. Çin'in gönüllü karbon kredisi pazarının önemli bir oranda büyümesi bekleniyor. Pazar, Çin'in zorunlu Emisyon Ticareti Sistemi'ni (ETS) desteklemeyi ve ülkenin 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını zirveye çıkarma ve 2060 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşma hedefini desteklemeyi amaçlıyor. Hindistan'daki gönüllü karbon kredisi piyasası, 2024 yılında %15,30'un üzerinde bir paya sahip olarak önemli bir paya sahip oldu. Hindistan'ın gönüllü karbon kredisi piyasasının, sürdürülebilirlik girişimlerine yönelik artan kurumsal talep ve olumlu hükümet politikaları sayesinde önemli ölçüde büyümesi bekleniyor.

7.11 Orta Ve Güney Amerika Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri

Orta ve Güney Amerika gönüllü karbon kredisi pazarının tahmin döneminde önemli bir oranda büyümesi bekleniyor. Artan talep ve olumlu politikalar sayesinde pazarın küresel karbon kredisi pazarında önemli bir oyuncu olarak ortaya çıkması bekleniyor.

Brezilya'daki gönüllü karbon kredisi piyasası, 2024 yılında bölgede %49,4'lük bir payla en büyük paya sahip olmuştur. Ülke, geniş ormanları ve yenilenebilir enerji projeleri sayesinde bu pazarda lider konumdadır.

7.12 Orta Doğu Ve Afrika Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Trendleri

Orta Doğu ve Afrika gönüllü karbon kredisi pazarının önemli bir oranda büyümesi bekleniyor. Orta Doğu ve Afrika'nın gönüllü karbon pazarı, BAE'nin Afrika kredilerine 450 milyon dolarlık taahhüdü ve Suudi Arabistan'daki ilk bölgesel açık artırma gibi girişimlerle yükselişte.

7.13 Gönüllü Karbon Kredisi'nin Temel Görüşleri

Gönüllü karbon kredisi piyasası giderek daha rekabetçi hale geliyor ve South Pole, Verra ve Gold Standard gibi lider oyuncular, güvenilir karbon dengelemelerine yönelik artan kurumsal talebi karşılamak için yüksek bütünlüklü projeler, güçlü sertifikasyon standartları ve şeffaf raporlama ile kendilerini farklılaştırıyor. Ortaya çıkan rakipler, izlenebilirliği artırmak ve çift sayım risklerini azaltmak için blok zinciri (örneğin Toucan, KlimaDAO) ve yapay zeka destekli izleme gibi yenilikçi teknolojilerden yararlanırken, doğa temelli çözümler (örneğin yeniden ağaçlandırma, REDD+) ve mühendislikli uzaklaştırmalar (örneğin DAC, biyokömür) yüksek fiyatlı segmentlere hakim oluyor.

Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Raporu Kapsamı

Rapor Özniteliği	Detaylar
2025'te pazar büyüklüğü değeri	5,32 milyar ABD doları
2030'daki gelir tahmini	23,99 milyar ABD doları
Büyüme oranı	2025'ten 2030'a %35,1'lik bileşik yıllık büyüme oranı
Gerçek veriler	2018 - 2024
Tahmin dönemi	2025 - 2030
nicel birimler	Gelir milyon/milyar ABD doları, hacim milyon ton ve 2025'ten 2030'a kadar bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR)
Rapor kapsamı	Gelir tahmini, hacim tahmini, rekabet ortamı, büyüme faktörleri ve trendler
Kapsanan segmentler	Proje, uygulama, son kullanım, bölge
Bölgesel kapsam	Kuzey Amerika; Avrupa; Asya Pasifik; Orta ve Güney Amerika; Orta Doğu ve Afrika
Ülke Kapsamı	ABD, Kanada, Meksika, Almanya, Fransa, İngiltere, İtalya, İspanya, Çin, Hindistan, Japonya, Güney Kore, Avustralya, Endonezya, Malezya, Brezilya, Arjantin, Suudi Arabistan, Güney Afrika, BAE
Dünyadaki Önemli şirketlerin profilleri çıkarıldı	EcoSecurities; BioCarbon Partners; Combio Energia; BURN Manufacturing; Biofilica Ambipar; Indus Delta Capital Limited; Terrasos; EKI Energy Services Ltd. (eski adıyla EnKing International); 3Degrees; Climate Impact Partners; EcoAct; AB Verra; Puro.earth, ZECA BANK v.b. gibi markalar

7.14 Küresel Gönüllü Karbon Kredisi Piyasası Raporu Segmentasyonu

Bu rapor, küresel, bölgesel ve ülke düzeylerinde gelir büyümesini tahmin ediyor ve 2018'den 2030'a kadar her alt segmentteki en son sektör trendlerinin analizini sunuyor. Bu çalışma için küresel gönüllü karbon kredisi pazar raporunu proje, uygulama, son kullanım ve bölgeye göre segmentlere ayırdı:

7.14.1 Proje Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030)

- Yenilenebilir Enerji
- Enerji Verimliliği
- Ağaçlandırma ve Yeniden Ağaçlandırma
- Metan Yakalama ve İmhası
- Diğerleri (toprak karbon tutulumu, enerji verimliliği)

7.14.2 Uygulama Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030)

- Endüstriyel
- Ev Aletleri
- Enerji
- Tarım
- Diğerleri

7.14.3 Son Kullanım Görünümü (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030)

- Devlet Kurumları
- Sivil Toplum Kuruluşları (STK'lar)
- Özel Şirketler
- Bireyler

7.14.4 Bölgesel Görünüm (Hacim, Milyon Ton; Gelir, Milyon Abd Doları, 2018 - 2030)

Kuzey Amerika

- ❖ Türkiye
- ❖ Kanada
- ❖ Meksika

Avrupa

- ❖ Almanya
- ❖ İngiltere
- ❖ İtalya
- ❖ İspanya
- ❖ Fransa
- ❖ Hollanda

Asya Pasifik

- ❖ Çin

- ❖ Hindistan
- ❖ Japonya
- ❖ Güney Kore
- ❖ Avustralya
- ❖ Endonezya
- ❖ Malezya

Orta ve Güney Amerika

- ❖ Brezilya
- ❖ Arjantin

Orta Doğu ve Afrika

- ❖ BAE
- ❖ Suudi Arabistan
- ❖ Güney Afrika

Dijital ekonominin bir uzantısı olan akıllı üretim teknolojileri birçok ülkenin gündeminde ön sıralarda yer almaktadır. Bulut teknolojisi, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, mobil internet ve yapay zekâ vb. de dahil olmak üzere yeni bilgi teknolojilerinin gelişmesi ve uygulanmasıyla birlikte, çeşitli ülkeler bir sonraki sanayi devrimine hazırlanmak için farklı üretim stratejileri (örneğin endüstri 4.0, endüstriyel internet, hizmet odaklı üretim ve bulut üretim vb.) önermiştir.

Dijital ekonominin bu denli dikkat çekmesi sağladığı faydalar dolayısıyladır. Bu raporda, oldukça geniş bir alana yayılan bu faydaların önemli birkaçına yer verilmiştir. Yeni bir ekonomik form olarak dijital ekonomi, altyapı, kaynak tahsisi ve yapısal optimizasyon yoluyla kentsel karbon verimliliğini arttıracak yeşil, yenilikçi ve paylaşımcı olma avantajlarına sahiptir. Diğer taraftan, işletmelerin ve tüketicilerin çevre ile ilgili verileri daha etkin bir şekilde izlemesine, yönetmesine, çevre bilincinin artmasına ve çevrenin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Örneğin dijital ekonomi, kamu hizmetlerine ve politika bilgilerine erişim sağlayarak vatandaşların çevre koruma faaliyetlerine katılımını teşvik edebilmektedir. Aynı zamanda karbon emisyonunu azaltarak iklim değişikliği ile hedeflerin gerçekleştirilmesini sağlayabilmektedir.

Dijital ekonomi karbon emisyonu ilişkisi çeşitli kanallarla gerçekleşebilmektedir. İlk kanal dijital ekonominin endüstriyel yapı üzerindeki etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Öncelikle dijital ekonomi, 5G internet, bulut bilişim ve üretim faktörleriyle birleştirilmiş akıllı cihazlar gibi dijital altyapılar aracılığıyla, düşük karbonlu kalkınmayı gerçekleştirmek üzere yürütülen hükümet politikalarını destekleyerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmaya yardımcı olabilmektedir. İkinci olarak, dijital teknoloji yardımıyla endüstriyel yapının rasyonelleştirilmesi yeşil ve düşük karbonlu kalkınmaya katkı sağlamaktadır. Örneğin, emisyon ticaret sisteminin devreye girmesiyle birlikte firmalar yeni teknolojileri kullanarak temiz üretim, karbon tespiti ve depolama teknolojisi gibi yollarla hem çevre hem de ekonomi için kazanımlar sağlayabilmektedirler. Diğer taraftan dijital teknolojilerin tedarik zincirinde kullanımının hem ekonomik hem de çevresel anlamda katkı sağlayabileceği belirtilmektedir.

Raporda, dijital ekonomi göstergeleri ve finansal piyasa derinliğinin karbon emisyonu üzerindeki etkisi ampirik olarak araştırılmıştır. İncelemede OECD ülkeleri incelenmiş olup, 2010-2022 dönemi ele alınmıştır. Karbon emisyonun bağımlı, dijital ekonomi göstergeleri ve finansal piyasa derinliği göstergelerinin bağımsız değişken olduğu bir panel veri modeli geliştirilmiştir. Dijital ekonomi göstergesi olarak internet kullanılan bireylerin oranı, bilgi ve iletişim teknolojisi ürünleri ihracatı oranı ve 100 kişi başına sabit geniş bant aboneliği verileri kullanılmıştır. Finansal piyasaların derinliğine ilişkin ise finansal piyasalar derinlik endeksi verileri kullanılmıştır. Ayrıca doğrudan yabancı yatırımlar ve kişi başına GSYİH ise modelde kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır. Çalışmanın verileri Dünya Bankası, Uluslararası Para Fonu ve Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nden elde edilmiştir. Modelin varsayım testleri sonucunda sabit etkiler yaklaşımıyla Driscoll-Kraay standart hatalar tahmincisi kullanılarak model tahmin edilmiştir. Modelin tahmini sonucunda, internet kullanılan bireylerin oranının artışının karbon emisyonunu istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bilgi ve iletişim teknolojisi

ürünleri ihracatı oranı ve 100 kişi başına sabit geniş bant aboneliği artışının da karbon emisyonunu istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönde etkilediği saptanmıştır. Bu doğrultuda elde edilen bulgulara göre, dijital ekonomi göstergelerinde meydana gelen bir artışın karbon emisyonunu azalttığı diğer bir ifadeyle olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca finansal piyasaların derinliği endeksindeki artışın da karbon emisyonunu istatistiksel olarak anlamlı olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu bağlamda finansal piyasalardaki derinliğin artışının karbon emisyonunu azalmasına katkı sunduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmanın ampirik analizinden elde edilen bulgular kapsamında, OECD ülkelerinde 2010-2020 döneminde dijital ekonomi göstergelerindeki ve finansal piyasaların derinliğindeki artışların karbon emisyonunu azalttığı ifade edilebilir. Bu bulgu, dijital uygulamaların hayatın her alanına entegre edilmesinin, karbon emisyonlarına katkı sunabileceğine işaret etmektedir. Bu doğrultuda, dijital alt yapıların güçlendirilmesi, dijital teknoloji kullanımının teşvik edilerek endüstriyel dönüşümün sağlanması, yapay zeka uygulamalarının geliştirilmesi ve yeşil teknolojilere yapılan yatırımların artırılması gibi amaçlara yönelik politikaların geliştirilmesi önemli bir husustur.

Diğer taraftan, karbon salınımını azaltmak amacıyla uygulamaya konulan politikaların dijital ekonomi politikaları ile uyumlaştırılması daha etkili stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca ülkelerin ekonomik büyüme performanslarının iyileştirilmesinde belirleyici rolü olan finansal piyasaların derinlik düzeyindeki artışların da karbon emisyonlarına olumlu katkı sunabileceği bulgusundan hareketle, finansal piyasaların gelişimini sağlamak amacıyla finansal piyasa araçlarının çeşitlendirilmesi ve bu araçların dijital uygulamalarla desteklenmesi gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte ekonomik büyüme başta olmak üzere ekonomik faaliyetlerin sağlıklı bir biçimde sürdürülebilmesine ve çevre dostu üretim teknolojilerinin finanse edilmesine katkısı olan finansal piyasaların derinliği hususunun karbon emisyonları açısından etkisi de dikkate alınması politika yapıcılar ve karar vericiler açısından değerlendirilmesi gereken bir unsurdur. Gelecekteki çalışmalarda dijital ekonominin farklı göstergeleri ile farklı ülke grupları ve farklı dönemler karbon emisyonları açısından ele alınabilir. Ayrıca finansal piyasaların karbon emisyonları açısından etkisinin değerlendirilmesinde farklı finansal piyasa göstergelerinin incelenmesi mümkündür.

Türkiye, iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle mücadele etmeye ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya çalışmaktadır. Bu kapsamda 2009 yılında Kyoto Protokolü'ne, 2021 tarihinde Paris İklim Anlaşması'na taraf olmuş ve akabinde 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefini açıklamıştır. 13 Mayıs 2023 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İklim Değişikliği Başkanlığı ile Türk Standartları Enstitüsü tarafından emisyon azaltımı, karbon kredilendirme projelerinin tescili ve karbon kredilerinin belgelendirilmesi için ulusal standartlar ve metodolojiler oluşturmak amacıyla Ulusal Karbon Kredilendirme Programı Protokolü imzalanmıştır. Protokolün amacı, bir emisyon ticareti sistemi kapsamında ilgili sanayi sektörlerinin sera gazı emisyonlarını dengelemek ve gönüllü emisyon azaltım hedeflerini gerçekleştirmektir. 12. Kalkınma Planı'nda (2024-2028) "Çevrenin Korunması" başlığı altında Paris İklim Anlaşması ve Türkiye'nin Ulusal Katkı Beyanı çerçevesinde sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğine uyum eylemlerinin gerçekleştirilmesine yönelik tedbirlere yer verilmiştir. Orta Vadeli Program'da ise (2024-2026) "Yeşil Dönüşüm" başlığı altında da sera gazı emisyon azaltımı hedefinin altı çizilmiştir.

Türkiye'nin bu alanda önemli hedefleri vardır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, ("EPDK") niyetini ortaya koyan Karbon Piyasalarının İşletilmesine İlişkin Yönetmelik Taslağı'nı ("Taslak Yönetmelik") hazırlamıştır. Taslak Yönetmelik, emisyon ticaret sistemi kapsamında sera gazı emisyonlarının azaltılmasını teşvik etmek amacıyla karbon piyasalarının kurulması ve işletilmesine dair usul ve esasları belirlemektedir ve 13 Kasım 2023 tarihinde kamuoyunun görüşüne sunmuştur.

Taslak Yönetmelik

Taslak Yönetmelik, Emisyon Ticaret Sistemi'ni ("ETS") ve işleyişine ilişkin hükümleri düzenlemektedir ve karbon piyasaları, birincil ve ikincil karbon piyasaları, işletmecisi ve tahsisat gibi kavramları tanımlamaktadır. Buna göre ETS, sera gazı emisyonlarına bir üst sınır belirlenmesi ilkesine dayalı olarak işleyen ve tahsisatların alınıp satılması suretiyle sera gazı emisyonunu sınırlandıran veya sınırlandırmayı teşvik eden ulusal ve/veya uluslararası piyasa

temelli mekanizmadır. Tahsisatlar ise belirli bir süre boyunca bir ton karbondioksit eşdeğerine denk gelen sera gazı emisyon hakkını temsil eden, kaydı olarak ihraç edilebilen ve devredilebilen bir izin anlamına gelir.

Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. ("**Piyasa İşletmecisi**") karbon piyasalarının işletilmesinden sorumludur. Birincil karbon piyasaları, Piyasa İşletmecisi tarafından organize edilip işletilen ve tahsisatların katılımcılar arasında dağıtımını sağlamak için ihale yöntemiyle işlemlerin gerçekleştirildiği piyasayı ifade eder. İkincil karbon piyasaları ise Piyasa İşletmecisi tarafından organize edilip işletilen ve tahsisatların sürekli ticaret yöntemi ile alış satışının gerçekleştirildiği, spot karbon piyasasını ve fiziksel teslimatlı vadeli karbon piyasasını ifade eder. Taslak Yönetmelik'in 5. Maddesi, Piyasa İşletmecisi'nin sorumluluklarını belirlemektedir. ETS kapsamındaki işletmeciler piyasalarda faaliyet gösterebilmek için İşlem Kayıt Sistemi'ne ("**İKS**") kayıt olmak zorundadırlar. İKS ise tahsisatların ihracı, elde bulundurulması, başka bir hesaba transferi, iptali ve itfası işlemlerinin yapıldığı ve bu işlemlerin hak sahibi bazında hesaplarda izlendiği elektronik veri sistemidir.

Birincil karbon piyasası Taslak Yönetmelik'in 11 ila 17. maddeleri arasında düzenlenmiştir. Birincil karbon piyasasında tahsisat miktarı yıllık olarak belirlenecek ve ihale yöntemiyle satışa çıkarılacaktır. İhalelerde asgari teklif büyüklüğü bir lot iken, bir lot değeri 500 tahsisata tekabül etmektedir. Bir tahsisat da bir ton karbondioksit ve eşdeğeri sera gazı emisyon değerine karşılık gelmektedir. Bu ihalelerde Piyasa İşletmecisi tek satıcı rolünü üstlenecek ve piyasa katılımcıları sadece alış yönlü teklif sunabilecektir.

İkincil karbon piyasası ise Taslak Yönetmelik'in 18 ila 25. maddeleri arasında düzenlenmiştir. Spot karbon piyasasında kontratlar Piyasa İşletmecisi tarafından işleme açılır. Piyasa katılımcıları alış ve/veya satış yönünde teklif sunabilirler. Piyasa katılımcıları İKS'deki tahsisat miktarı ve aynı seans içerisinde spot karbon piyasasında aldıkları tahsisat miktarı toplamı kadar satış teklifi sunabilir. Alış veya satış için asgari teklif büyüklüğü bir lottur (Burada bir lot 1000 tahsisata eşittir).

Birincil ve ikincil karbon piyasalarında gerçekleştirilen işlemler Emisyon Ticaret Piyasa Yönetim Sistemi üzerinden gerçekleştirilir.

Taslak Yönetmelik karbon piyasasına ilişkin mali hususları da düzenlemektedir. Bu kapsamda piyasa katılımcıları Madde 29 uyarınca piyasaya ilişkin yükümlülüklerini yerine getirememeleri veya faaliyetlerini gerçekleştirememeleri durumunda, piyasa katılımcıları arasındaki nakit akışının sürekliliğini; piyasa katılımcılarının ödemelerini zamanında gerçekleştirememeleri durumunda ise alacaklı durumunda olan diğer piyasa katılımcılarının güvence altına alınmasını sağlamak üzere teminat sağlayacaktır.

7.15 Karbon Piyasası Geliştirme Projesi Açılışı

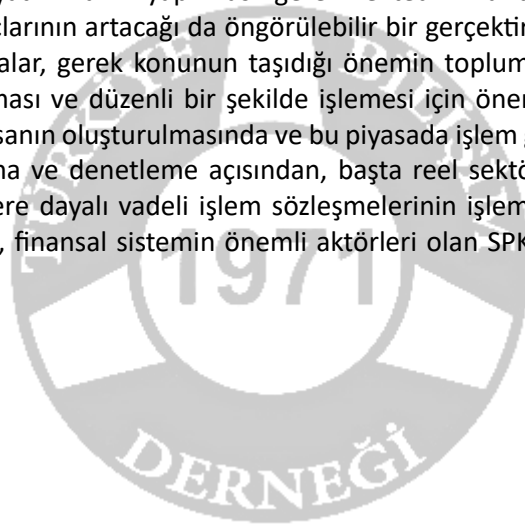
Dünya Bankası Uygulama Programı'nda yer alan ve bu alanda ilk örnek teşkil eden Türkiye Karbon Piyasası Geliştirme Projesi ("Karbon Piyasası Projesi") 30 Nisan 2024 tarihinde resmi olarak başlatılmıştır. Projenin amacı, 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi'ne ulaşılmasına ve karbon piyasalarının iklim hedefleri doğrultusunda kullanılmasına katkıda bulunmaktır. Ayrıca ulusal bir ETS kurmayı ve böylece Taslak Yönetmelik ile güçlü bir bağlantı oluşturmayı amaçlamaktadır. Gönüllü karbon piyasaları açısından Karbon Piyasası Projesi'nin ulusal karbon kredilendirme ve ulusal denkleştirme sistemlerinin kurularak karbon kredilerinin elde edilmesine ve karbon piyasaları açısından strateji belirlenmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir. Karbon Piyasası Projesi'nin hayata geçirilmesi ile Taslak Yönetmelik'in yürürlüğe girmesinin hızlanacağını öngörmek mümkündür.

Karbon piyasaları, iklim değişikliğini önlemek amacıyla sera gazı emisyonlarına sınır getirilmesi düşüncesinin sonucunda oluşmuştur. Bu piyasalar, bir yandan yüksek oranda karbon kullanan sektörlerle kısıtlamalar getirirken, diğer yandan karbon kullanımı verimli olan sektörlerin ve işletmelerin rekabete ayak uydurmasını sağlayacak bir fiyat göstergesinin ve karbon finansmanının gelişmesini sağlayacak koşullar oluşturmaktadır. 2008 yılı itibarıyla küresel karbon piyasasının işlem hacmi toplam 126 milyar dolara ulaşmıştır. Bunun yaklaşık %75'i AB ETS kapsamında verilen izinlerin ve türevlerin uyum, risk yönetimi, arbitraj, fon toplama ve kâr etme amaçları ile alınıp satılmasından oluşmaktadır (Kadılar, 2010: 110, 182). Karbon piyasalarındaki gelişmeler sermaye piyasaları için de

farklı bir bakış açısı ortaya koymuştur. İklim değişikliğinin önlenmesine katkı sağlaması beklenen ve organize veya tezgâhüstü piyasalarda işlem gören ERUs, CERs, EUAs, CFIs, AAUs ve VERs gibi ürünler, sermaye piyasası mantığı içinde işlem görürken, bu piyasa için yeni bir enstrüman olmuştur. Ayrıca, bazı finansal borsalar bahsedilen karbon borsalarına ortak olurken, bu ürünlerin geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır (Çikot, 2009: 24). TÜİK'in 2009 yılı Sera Gazı Emisyon Envanterine göre, Türkiye'nin 1990 yılında 180,03 milyon ton CO₂ eşdeğeri olan toplam sera gazı emisyonu, 2007 yılında 380 milyon ton, 2008 yılında 366,5 milyon ton, 2009 yılında 369,65 milyon ton CO₂ eşdeğerine yükselmiştir. 2009 yılı itibarıyla toplam sera gazı emisyonu içerisinde en büyük payı %75 ile enerji sektörü almaktadır. Dünya toplam karbon emisyonunun %0,9 gibi küçük bir kısmını oluşturmakla birlikte, Türkiye 1990-2009 yılları arasında dünyada en hızlı emisyon arttıran ülkelerden biri olmuştur. Türkiye'nin 2009 yılı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılına göre %98 artış göstermiştir (www.tuik.gov.tr, 2011). Bu durum, ülkemizde sera gazı emisyonlarının hızla arttığını göstermektedir. Bu artışın durdurulması veya emisyon miktarında indirimler gerçekleştirilebilmesi için, acil politikalar oluşturulması gerekmektedir. Bu politikalardan biri de, emisyon ticaretinin olumlu katkılarının yararlanılmasını sağlayacak uygulamaların hayata geçirilmesidir. Türkiye, gerek bir OECD ülkesi olduğu (gelişmiş ülkeler arasında sayıldığı ve gelişmekte olan ülkelerin karbon azaltım masraflarını karşılaması söz konusu olduğu) için, gerekse karbon salınımına konulacak bir sınırlamanın ülke ekonomisinin gelişimine engel teşkil edebileceği endişesi ile Kyoto Protokolü'nün imzalanmasından günümüze kadar, bir yükümlülük ve yaptırım altında kalmamak adına, 1992'de UNFCCC'ye imza atmamış ve UNFCCC'ye ek bir anlaşma niteliğindeki Kyoto Protokolü'nün 1997 yılındaki görüşmelerine de katılmamıştır. Dolayısıyla, hem Kyoto mekanizmaları hem de AB karbon ticareti piyasalarından faydalanamamıştır. Ancak, Kyoto Protokolü'nün AB'nin çevre müktesebatının bir parçası olması nedeniyle, AB'ye katılmak isteyen Türkiye için Protokolü kabul etmek kaçınılmaz olmuştur. Türkiye UNFCCC'yi ancak 2004'te, gelişmiş ülkeler içerisinde özel bir statü elde etmesi sonucu imzalarken, 2009 yılında da Kyoto Protokolü'nü imzalayan ülkeler arasına katılmıştır. Türkiye'nin Kyoto Protokolü'ne taraf olması ile, ülkemiz için yeni bir dönem başlamıştır. Her ne kadar 2012'ye kadar bir yükümlülüğü olmasa da bu süreçte Türkiye'den sera gazı emisyonlarını azaltması, yenilenebilir enerji kaynakları kullanması, kamuoyunu bu konuda bilinçlendirmesi gibi çalışmalar yapması beklenmektedir. Anlaşma gereği Türkiye, halen organize piyasalarda EUA, CER, ERU üzerine emisyon ticareti işlemleri yapamazken, organize olmayan piyasalarda emisyon ticareti işlemleri yapabilmektedir. Ülkemizde işletmeler çeşitli emisyon azaltım projeleri gerçekleştirerek, yaptıkları ve "Onaylanmış Emisyon İndirimi (Verified Emission Reductions-VER)" olarak adlandırılan emisyon azaltımlarını UNFCCC tarafından akredite edilmiş kurumlara onaylatabilmekte, onaylanmış bu indirimler de gönüllü karbon azaltım birimleri olarak tezgâh üstü piyasalarda işlem görebilmektedir. Bu işlemlerin organize bir şekilde yürütülmemesi ve merkezi bir birim tarafından takip edilmemesi nedeniyle işlem büyüklükleri konusunda toplu rakamlara ulaşılması neredeyse imkansızdır. Bununla birlikte, dünya karbon piyasalarının %1'ini bile oluşturmayan bu piyasaların küresel boyutta yaklaşık 2/3'ünü ülkemizde yapılmakta olan projelerin gerçekleştirdiği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla, Kyoto mekanizmalarının dışında kalmakla birlikte, gönüllü karbon piyasalarında önemli bir konuma gelmeyi başaran Türkiye'nin, bu küresel oyunun dışında kalması mümkün değildir.

İşletmelerin, yatırımcıların ve hükümetlerin iklim değişikliği tehdidine karşı önlem almalarını sağlayacak bilgileri toplamak ve paylaşmak amacıyla 2000 yılında Karbon Saydamlık Projesi (Carbon Disclosure Project -CDP-) başlatılmıştır. İklim değişiklikleri risklerinin işletmeler tarafından nasıl yönetildiğini küresel çapta raporlayan tek bağımsız kuruluş olan CDP, 2011 yılı itibarıyla 71 trilyon dolar değerindeki varlığı yöneten 551 kurumsal yatırımcı adına hareket etmektedir. CDP'nin bu girişimi, işletmeleri düşük karbonlu ekonomiye geçebilmeleri için teşvik ederken, kurumsal yatırımcılara da yatırım kararlarını alırken iklim değişikliğine bağlı riskleri göz önünde bulundurabilme imkanı sağlamaktadır. Bu kapsamda, 2010 yılında İMKB-50, 2011 yılında da İMKB-100 endeksine dahil olan işletmeler, sera gazı emisyon miktarları ve iklim değişikliği ile ilgili risk yönetim politikalarını uluslararası kurumsal yatırımcıların bilgisine sunmak üzere CDP Türkiye tarafından davet almıştır. CDP tarafından davet edilen ve CDP'ye yanıt veren işletmeler uluslararası yatırımcılar ile daha yakın diyalog sağlarken, iklim değişikliğinin kurumları için yarattığı risk ve olanakları da görme şansına sahip olmaktadır. Ancak, Türkiye'de 2010 yılında davet alan işletmelerden yalnızca 10 tanesi ve 1 de gönüllü işletme karbon emisyon bilgilerini açıklamıştır

(www.cdpturkey.sabanciuniv.edu.tr, 2011). Sınırlı sayıda işletme dışında, Türkiye’de işletmeler karbon emisyonlarını açıklamadıkları için, bu piyasalar aracılığıyla sağlanabilecek faydaların önemli bir kısmı kaçırılmaktadır. Düşük karbonlu ekonomiye geçiş sürecinde, ülkemizde ekonominin gelişimine engel olmayacak bir çözüm arayışına girilirken, aynı zamanda gelişmiş ülkelerden sağlanacak finansal ve teknolojik desteğin artırılması için de çaba harcanmalıdır. Bu nedenle, aktif bir strateji izlenerek, bu piyasalara entegre olunmalıdır. Bu kapsamda, karbon verimliliğini destekleyen bir karbon piyasası kurulmalı ya da ABD, Japonya ve Güney Kore gibi kendi ulusal karbon piyasalarını hayata geçirmeye kararlı büyük ekonomilerden CDM benzeri yeni mekanizmalarla faydalanılmalıdır. Örneğin, ABD’de yöresel “gönüllü ama bağlayıcı” karbon piyasaları ile karşılıklı pazarlık yapıp, bu piyasalarda karbon kredisi almak durumunda olan yatırımcıların ülkemizde üretilen karbon kredilerine yatırım yapabilmelerinin sağlanması hedeflenmelidir. Bunun, gelişmiş ülke pazarları ile son derece entegre olan ülkemiz ekonomisi için çok büyük olumlu etkileri olacağı düşünülmektedir. 2012 sonrası yeni dönemde Türkiye’nin emisyon yükümlülükleri artarken, Kyoto Protokolü ile oluşan esneklik mekanizmalarından da yararlanması söz konusu olabilecektir. Dolayısıyla, bu piyasaların Türkiye’de de oluşması ve benzer yatırım araçlarının devreye girmesi beklenmektedir. Bu yeni döneme ilişkin yapılacak düzenlemeler ile birlikte, gerek reel sektör ve gerekse yatırımcılar açısından, karbon piyasaları ve karbon sözleşmeleri önemli bir ihtiyaç ve yatırım aracı haline gelecektir. Ancak, aktif rol alarak bu piyasalardan beklenen faydaların elde edilebilmesi için, sera gazı emisyonlarını azaltıcı projeleri hayata geçirecek ileri teknoloji ürünü yatırımların yapılması gerekmektedir. Bu durumda, 2012 sonrası dönemde işletmelerimizin finansman ihtiyaçlarının artacağı da öngörülebilir bir gerçektir. İşletmelerimizin kendi çabaları ve CDP Türkiye’nin yürüttüğü çalışmalar, gerek konunun taşıdığı önemin toplumun çeşitli kesimlerince anlaşılması gerekse böyle bir piyasanın oluşması ve düzenli bir şekilde işlemesi için önemli adımlar olmakla birlikte yeterli değildir. Dolayısıyla, böyle bir piyasanın oluşturulmasında ve bu piyasada işlem görece ürünlerin geliştirilmesinde, mevzuat, işleyiş, izleme, raporlama ve denetleme açısından, başta reel sektörün ve finansal piyasaların ihtiyaç duyduğu emtia ve finansal ürünlere dayalı vadeli işlem sözleşmelerinin işlem gördüğü ülkemizin ilk ve tek özel borsası olan VOB AŞ olmak üzere, finansal sistemin önemli aktörleri olan SPK ve İMKB’ye önemli sorumluluklar düşmektedir.



7.16 Karbon Offsetleme Mekanizmaları Ve Dijital Doğrulama

Doğrulanabilir bir karbon offset stratejisini hayata geçirmek için kamu ve özel sektörün izlemesi gereken bir dizi adım bulunmaktadır. Bu adımlar, sürecin şeffaf, ölçülebilir ve stratejik şekilde yönetilmesine olanak tanır. İlk olarak, emisyonların kapsamlı şekilde hesaplanması gerekir. Şirketin faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı sera gazı salımlarının GHG Protocol veya ISO 14064 standartlarına uygun şekilde ölçülmesi, stratejinin temelini oluşturur.

İkinci adımda, bu emisyonların hangi bölümünün şirket içinde azaltılabileceği analiz edilir. Enerji verimliliği projeleri, yenilenebilir enerji yatırımları veya sürdürülebilir ulaşım geçiş gibi önlemlerle azaltılabilecek emisyonlar önceliklidir. Offset stratejisi yalnızca kalan, yani kaçınılmaz emisyonlar için devreye alınmalıdır.

Üçüncü adımda, offset hedeflerinin ve sınırlarının net biçimde tanımlanması gerekir. Hangi birimlerin, süreçlerin ya da tedarik zincirinin ne oranda nötrlenmek istendiği belirlenmelidir.

Dördüncü olarak, güvenilir bir offset projesi seçimi yapılmalıdır. Burada daha önce belirtilen uluslararası standartlara sahip projeler tercih edilmeli, sosyal etkiler, bölgesel katkılar ve uzun vadeli sürdürülebilirlik kriterleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Beşinci adımda, offset tedarikçisiyle şeffaf ve hukuki dayanağa sahip bir sözleşme yapılır. Bu sözleşme kapsamında mülkiyet hakları, kalıcılık garantisi ve izleme yöntemleri netleştirilir.

Altıncı olarak, projenin etkisinin izlenmesi ve düzenli olarak doğrulanması sağlanır. MRV (Monitoring, Reporting, Verification) süreçleri bu aşamada devreye girer. Bu sistemler, offsetin sürekli olarak ölçülmesini ve şeffaf biçimde raporlanmasını mümkün kılar.

Son olarak, tüm süreç şeffaf ve karşılaştırılabilir şekilde raporlanmalı; CSRD, IFRS S2 gibi uluslararası raporlama sistemleriyle uyum içinde paylaşılmalıdır. Diğer yandan ülkemizde kamu otoritesini ve bağlı kuruluşları offsetleme mekanizmaları ve bunların ulusal çerçevede politikalarını acil ve ivedi bir şekilde devreye almalıdır.

7.17 Sonuç Ve Öneriler:

- 1- Türkiye de özellikle AB piyasaları ve ticaretin geliştirilmesi , karşılıklı imzalanan uluslararası iklim anlaşmaları, SKDM (Sınırdaki Karbon Denetimi gibi bir çok uygulamamanın 2026 yılından itibaren hızla devreye gireceği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda özellikle yaşam döngüsü analizleri, karbon ayak izi hesaplarının büyük bir önemi özellikle e-verimlilik açısından mutlak bir nesne hale geleceğinin kamu ve özel sektör tarafından benimsenmesi ve sürütülebilir bir uygulamalar haline getirilmesi kaçınılmazdır.
- 2- Dijital olarak özellikle veri kaynakları ulusal kamu kurum ve kuruluşlarının sağlaması ürün ve hizmetlerin yaşam döngüsüne ışık tutacağı, bu verilenin kamuoyuna açık ve şeffaf bir şekilde özel sektörün de dijital olarak kullanabileceği önem arz etmektedir.,
- 3- Dijital yaşam döngüsü muhasebesi, analizi programları, kurumsal ve ürün karbon ayak izi muhasebe programlarının doğrulanması veya bu doğrulamalara yasal bir uygunluk getirilmesi çok büyük bir eksik olarak halen piyasalarda bilinilmektedir.
- 4- Gönüllü ve zorunlu karbon piyasalarının oluşturulması ve bu piyasaların hızla kamu tarafından denetlenmesi ve mevcut doğrulanmış veya doğrulanacak projelerin ortaya konulması kamunun en büyük görevlerinde biri olmalı ve bu konuda ciddi adımlar atılmalıdır.
- 5- Ülkemizin dış ticaret etkenlerinin ve gücünün azalmaması veya önünün kesilmemesi için SKDM sisteminin çok hızlı bir şekilde kurulması ve dijital dönüşüm projeleri kapsamında kamu ve özel sektörün bundan yararlanması çok büyük bir önem arz etmektedir.
- 6- Ulusal karbon piyasası veya doğrudan karbon kredisi piyasalarını zorunlu-gönüllü karbon piyasalarının geliştirilmesi ve rekabet ortamının e-verimlilik için yaratılması önemli olacaktır.

- 7- Türkiye olarak bölgesel projeleri de kapsayacak veya büyük bir döviz kaynağı olabilecek bölgesel ülkelerin yeşil karbon projelerinin değerlendirilmesi ve böylece bu doğrulanmış bölgesel projelerin karbon kredilerinin ülkemizde işlem görmesi için dijital karbon piyasalarının oluşturulması önem arz etmektedir.
- 8- Ülkemizde karbon offsetleme politikaları, bu politikalar çerçevesinde oluşturulacak işlem ve eylemler için yol haritalarının belirlenmesi, gerektiğinde standartların hazırlanması ve uluslararası boyutta kabul görecektir şekilde akreditasyonlarının sağlanması gerekmektedir.
- 9- Bu raporda adı geçen tüm uygulamaların yüksek derecede ehemmiyete sahip güncel ve global dünyanın küresel anlaşmalarına tabi olan konular olup, bu uygulamalarındaki göz önünde bulundurulması gereken en derin ve can alıcı nokta ulusal verilerin oluşumu, envanteri ve bu verilerin ulusal bir kaynak veya veri tabanından saklanması, muhafaza edilmesi ve sürdürülebilir olarak geliştirilmesinin sağlanmasıdır.



8. Dirençli Şehirler ve Topluluklar İçin Dijital Altyapılar

Giriş

İklim krizi, kentleşme baskısı, dijital eşitsizlik ve artan afet riskleri; şehirlerin yalnızca fiziksel altyapılarla değil, aynı zamanda dijital kabiliyetlerle de dirençli hale gelmesini zorunlu kılmaktadır. Kentler, hem nüfus yoğunluğu hem de ekonomik faaliyetlerin merkezinde yer almaları nedeniyle çevresel tehditlere karşı en savunmasız yapılar arasında bulunmaktadır. Bu bağlamda, şehirlerin ve toplumların sürdürülebilirliği için dijital dönüşüm süreçlerinin afet risk azaltımı, iklim değişikliğine uyum, kaynak verimliliği ve sosyal kapsayıcılık hedefleriyle entegre edilmesi gerekmektedir.

"Dirençli Şehirler ve Topluluklar İçin Dijital Altyapılar" başlığı altında sunulan bu belge, Türkiye'nin kentleşme politikaları, yerel yönetim sorumluluk alanları ve uluslararası yükümlülükleri çerçevesinde dijital altyapı yatırımlarının stratejik önemini ortaya koymaktadır. Bu belge aynı zamanda Avrupa Yeşil Mutabakatı, Sendai Afet Risklerinin Azaltılması Çerçevesi (2015–2030) ve Paris Anlaşması gibi küresel yönelimlerle uyumlu, yerel düzeyde uygulanabilir çözüm önerileri geliştirmeyi hedeflemektedir.

Hazırlanan politika çerçevesi, şehirlerin dijital ikiz uygulamaları, afet erken uyarı sistemleri, doğa temelli çözümlerle desteklenen risk modelleme araçları, dijital eşitsizlikleri gözetken veri altyapıları ve e-verimlilik odaklı yönetim modelleri gibi unsurlar üzerinden bütüncül bir dayanıklılık yaklaşımını ortaya koymaktadır.

8.1 Akıllı ulaşım sistemleri, afet riski azaltımı ve kent altyapısı

8.1.1 Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Tanımı ve Bileşenleri

Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım altyapısı, araçlar ve kullanıcılar arasında senkronize biçimde entegre edilmesini sağlayan sistemler bütünüdür. AUS uygulamaları; trafik yoğunluğunu azaltmak, yol güvenliğini artırmak, çevresel etkileri en aza indirmek ve ulaşımında kaynak verimliliğini sağlamak amacıyla geliştirilen teknolojik çözümleri içerir.

Bu sistemler; gerçek zamanlı veri toplama, analiz, karar destek ve otomasyon bileşenlerini kullanarak kent içi ulaşımın hem etkinliğini hem de sürdürülebilirliğini artırır. Afet anlarında tahliye planlarının uygulanabilirliğinden, günlük yaşamda trafik akışının optimizasyonuna kadar geniş bir etki alanına sahiptir.

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin temel bileşenleri şunlardır:

Gerçek Zamanlı Trafik İzleme ve Yönlendirme Sistemleri: Karayolları ve şehir içi arterlerde trafik yoğunluğunu anlık izleyerek alternatif güzergâh önerileri sunar.

Akıllı Kavşak ve Sinyalizasyon Sistemleri: Yoğunluk verisine göre sinyal sürelerini otomatik olarak optimize eder.

Toplu Taşıma Bilgilendirme Sistemleri: Durak ekranları, mobil uygulamalar ve sesli yönlendirme sistemleriyle entegre çalışır; erişilebilir ulaşımı destekler.

Ulaşımında Mobilite Yönetimi (MaaS): Toplu taşıma, bisiklet, scooter ve araç paylaşım sistemlerini tek bir platformda entegre eder.

Afet Durumu Yönlendirme ve Önceliklendirme Modülleri: Erken uyarı sistemleriyle entegre çalışarak afet sırasında acil müdahale ve tahliye senaryolarını devreye alır.

Veri Paylaşım ve Açık Veri Platformları: Kamusal ve özel sektörün ortaklaşa kullanabileceği, ulaşım verilerini analiz etmeye olanak tanıyan platformlardır.

Bu bileşenler, kentlerin sürdürülebilir ulaşım planlarına ve iklim uyum stratejilerine entegrasyonu açısından stratejik öneme sahiptir. Ayrıca, Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Stratejisi ve Eylem Planı (2020–2023) kapsamında yerel yönetimlerin AUS projeleri geliştirmesi ve merkezî veri platformlarına entegre olması teşvik edilmektedir.

8.1.2 Kent Altyapısına Entegrasyon

Akıllı Ulaşım Sistemleri'nin (AUS) etkinliğinin artırılması, yalnızca ulaşım koridorlarında değil; tüm kentsel altyapı bileşenleriyle bütüncül bir planlama anlayışıyla mümkündür. AUS'nin kent altyapısına entegrasyonu, ulaşım

sistemlerinin; enerji, haberleşme, su ve kanalizasyon, çevresel izleme ve afet yönetimi altyapılarıyla eşgüdüm içinde çalışmasını sağlar. Bu bütüncül yaklaşım, şehirlerin hem günlük işleyişte hem de kriz anlarında daha dirençli ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasına olanak tanır.

AUS'nin kent altyapısına entegrasyonu kapsamında ön plana çıkan başlıca entegrasyon alanları şunlardır:

Afet Yönetim Altyapısı ile Entegrasyon: AUS verileri, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) başta olmak üzere ilgili kurumların dijital erken uyarı sistemleriyle eşleştirildiğinde, riskli bölgelerde trafik yönlendirme, tahliye planlaması ve acil servislerin ulaşım önceliği sağlanabilir.

Enerji Altyapısıyla Entegrasyon: Elektrikli araç şarj altyapısı, enerji talep yönetimi sistemleriyle birlikte planlanarak ulaşım kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar. Aynı zamanda akıllı aydınlatma sistemleriyle trafik güvenliği ve enerji verimliliği artırılabilir.

Çevresel İzleme Sistemleriyle Entegrasyon: Hava kalitesi sensörleri, karbon ayak izi izleme sistemleri ve kentsel ısı adası ölçüm cihazları ile AUS platformlarının entegre edilmesi, çevresel verilerin ulaşım kararlarında kullanılmasını sağlar.

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Sayısal İkiz Teknolojileri: AUS uygulamaları, kentlerin dijital ikiz altyapılarıyla entegre edildiğinde, ulaşım senaryoları 3D ortamda simüle edilerek afet direnci artırılabilir. Bu sayede planlama süreçlerinde veri temelli karar alma güçlenir.

Kent Bilgi Sistemleri ve E-Belediye Hizmetleriyle Uyum: AUS'den elde edilen veriler, e-belediye uygulamalarıyla senkronize edildiğinde, trafik cezaları, park alanı yönetimi, bisiklet yolu planlaması ve toplu taşıma taleplerine ilişkin karar süreçleri şeffaflaşır.

Mevzuat açısından, 3194 sayılı İmar Kanunu, 6360 sayılı Büyükşehir Belediyesi Yasası, Ulusal AUS Stratejisi ve Eylem Planı ve Akıllı Şehirler Stratejisi (2020–2023) gibi belgeler, AUS'nin altyapı planlamasına entegre biçimde dahil edilmesini desteklemektedir. Yerel yönetimlerin yatırım planlarına AUS odaklı CBS entegrasyonu ve afet-ulaşım senaryolarını içeren analizler dâhil etmesi, hem sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlar hem de kaynak kullanımında etkinlik sunar.

8.1.3 Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

Akıllı ulaşım sistemlerinin kent altyapılarına entegre edilmesi, yalnızca trafik yönetimi veya mobilite konularında değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve iklim hedefleri doğrultusunda da kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle karbon ayak izinin azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi çevresel hedefler, AUS yatırımlarıyla doğrudan ilişkilidir.

AUS'nin çevresel etkileri üç ana boyutta değerlendirilmektedir:

1. **Emisyon Azaltımı:** Gerçek zamanlı trafik yönetimi, araç yoğunluğunu düşürerek yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltır. Ayrıca elektrikli ve otonom araçlara entegrasyon, fosil yakıt kullanımını azaltarak karbon emisyonlarını düşürür.

2. **Hava Kalitesi ve Gürültü Yönetimi:** Trafik sıkışıklığını azaltan çözümlerle birlikte partikül madde (PM) ve NOx gibi kirleticilerin yoğunluğu düşerken, kentsel gürültü seviyeleri de kontrol altına alınabilir. Akıllı kavşaklar, sessiz yol teknolojileri ve düşük emisyon bölgeleri bu kapsamda önem arz eder.

3. **Kaynak Verimliliği ve Doğa ile Uyum:** AUS uygulamalarıyla toplu taşımanın cazibesinin artırılması, özel araç kullanımını azaltır. Bu durum hem enerji hem de arazi kullanımında sürdürülebilirliği teşvik eder. Ayrıca doğa temelli çözümlerle (örneğin yeşil koridorlar, ekolojik ulaşım rotaları) entegre AUS planlamaları, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetleriyle uyumlu kent içi hareketliliği destekler.

Türkiye'nin uluslararası çevre taahhütleri doğrultusunda, AUS çözümlerinin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi, Sıfır Atık Eylem Planı, Ulaşım Ana Planları ve SECAP gibi yerel planlara entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu entegrasyon, hem izleme ve raporlama yükümlülüklerini kolaylaştırmakta hem de sürdürülebilirlik göstergeleri bakımından şehirlerin performansını ölçülebilir kılmaktadır.

Ayrıca, AUS kapsamında çevresel verilerin dijital risk modellemelerine dahil edilmesi; örneğin kentsel ısı adası etkisinin ulaşım planlamasına yansıtılması veya su baskını riskli bölgelerde ulaşım senaryolarının test edilmesi gibi uygulamalar, dayanıklı ve çevreyle uyumlu şehirler için stratejik fayda sağlar.

8.1.4 Afet Yönetiminde Akıllı Ulaşımın Rolü

Afet risklerinin arttığı günümüzde, kentlerin yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda dijital altyapılarla da desteklenmiş çok katmanlı bir direnç yapısına kavuşması gereklidir. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), afet öncesi, afet anı ve afet sonrası dönemlerde kentlerin müdahale kapasitesini ve toplumsal dayanıklılığını artıran hayati bir araçtır.

AUS teknolojileri, afet yönetimi döngüsünün tüm aşamalarında etkili roller üstlenmektedir:

Afet Öncesi Dönem (Risk Azaltımı ve Hazırlık)

Kritik altyapıların önceliklendirilmesi: AUS, kentteki yoğunluk verileriyle birlikte riskli bölgelerdeki yolların haritalanmasını sağlar. Böylece hangi yolların afet anında öncelikli tahliye güzergâhı veya acil müdahale rotası olacağı belirlenebilir.

Senaryo modelleme ve tatbikat simülasyonları: Akıllı ulaşım verileriyle entegre edilen sayısal ikiz uygulamaları, farklı afet türlerine yönelik tahliye senaryolarının test edilmesini mümkün kılar.

Erken uyarı entegrasyonu: Meteorolojik, jeolojik ve hidrometeorolojik erken uyarı sistemleriyle entegre çalışan AUS altyapısı, vatandaşlara anlık bildirim gönderilmesini sağlar (örneğin mobil uygulamalarla "öncelikli yol" veya "tehlikeli bölge" bildirimleri).

Afet Anı (Acil Müdahale)

Acil servis önceliklendirme algoritmaları: Ambulans, itfaiye ve arama kurtarma araçları için trafik ışıklarının otomatik olarak açılması, zaman kaybının önüne geçer.

Gerçek zamanlı trafik yönetimi: AUS, kapalı yollar, çökme riski olan güzergâhlar ya da aşırı yoğunluk yaşanan alanlar hakkında kriz merkezine sürekli veri aktararak müdahale koordinasyonunun başarısını artırır.

Drone ve mobil kamera entegrasyonu: AUS ile entegre çalışan insansız hava araçları, afet bölgesindeki ulaşım yollarının durumu hakkında yüksek çözünürlüklü veri sağlar.

Afet Sonrası Dönem (Toparlanma ve İyileştirme)

Yol durum haritaları ve güzergâh optimizasyonu: Enkaz kaldırma, lojistik destek ve yeniden yapılanma süreçlerinde AUS verileri, kaynakların etkili planlanmasına katkı sunar.

Toplu taşıma adaptasyonu: Afet sonrası ulaşım sistemleri, yeni yoğunluk bölgeleri ve geçici yerleşim alanlarına göre dinamik biçimde yeniden yönlendirilir.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) başta olmak üzere yerel yönetimlerin AUS sistemlerini afet senaryolarıyla entegre etmesi, hem Sendai Afet Risklerinin Azaltılması Çerçevesi (2015–2030) hem de Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi (2020–2023) ile tam uyum içindedir. Ayrıca İmar Kanunu, Afet Yönetimi Yönetmeliği ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Mevzuatı da bu entegrasyonu destekleyecek çerçeveleri tanımlar.

8.1.5 Uygulama Örnekleri ve Başarı Hikayeleri

Akıllı ulaşım sistemlerinin afet yönetimi ve dirençli kent altyapılarına entegrasyonu, dünya genelinde pek çok şehirde başarılı sonuçlar vermiştir. Bu örnekler, yalnızca teknolojik entegrasyonun değil; aynı zamanda yönetim, vatandaş katılımı ve veri paylaşımı kültürünün de ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Uluslararası Başarı Örnekleri

Tokyo, Japonya – Afet Odaklı Trafik Yönetimi:
Tokyo'da akıllı trafik sistemleri, deprem ve tsunami gibi afetler sırasında önceden belirlenmiş tahliye koridorlarını otomatik olarak açmakta ve acil servis araçlarının geçiş önceliğini sağlamaktadır. Gerçek zamanlı sensörler ve halkı bilgilendiren mobil uygulamalar entegre şekilde çalışmaktadır.

Helsinki, Finlandiya – Mobility-as-a-Service (MaaS):
Helsinki, tüm ulaşım modlarını bir araya getiren "Whim" uygulamasıyla afet durumlarında ulaşım sisteminin hızlı yeniden yapılandırılmasını sağlıyor. Bu sistem, hava koşullarına bağlı risk uyarılarını toplu taşıma planlamasına entegre ediyor.

Los Angeles, ABD – Açık Veri ve Afet Planlaması:
LA Belediyesi, AUS verilerini açık veri portalları üzerinden hem kamu kurumları hem de sivil toplumla paylaşıyor. Bu yaklaşım, afet senaryolarının daha şeffaf ve katılımcı biçimde planlanmasına katkı sunuyor.

Türkiye'den Uygulama Örnekleri

İstanbul – Trafik Yoğunluğu İzleme ve Afet Uyumlu Kavşaklar:
İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), 3 binden fazla akıllı kamera ve sensörle trafik verilerini izlemekte; bu veriler afet senaryolarında tahliye planlaması için kullanılmaktadır. İBB, AUS altyapılarını Afet Koordinasyon Merkezi (AKOM) ile entegre etmiştir.

Konya – Elektrikli Ulaşım ve Akıllı Kavşak Sistemleri:
Konya'da kurulan dinamik sinyalizasyon sistemleri ve elektrikli otobüs hatları, karbon salımını azaltırken afet durumlarında özel rotalarla yönlendirme yapılmasını mümkün kılmaktadır. Şehirde dijital trafik panelleri, vatandaşlara erken uyarı amaçlı kullanılmaktadır.

Gaziantep – Ulaşım ve Dijital Erişilebilirlik:
Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, AUS uygulamaları kapsamında hem engelli bireyler için erişilebilir güzergâh planlaması yapmış hem de toplu taşıma uygulamasını çok dilli hale getirerek kriz anlarında bilgiye erişimi kolaylaştırmıştır.

Bu örnekler, AUS'nin tek başına bir teknoloji yatırımı olmadığını; sosyal adalet, afet yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve veri paylaşımı kültürüyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Türkiye'de yerel yönetimlerin, AUS yatırımlarını İklim Uyum Eylem Planları, Ulaşım Ana Planları ve SECAP belgeleriyle uyumlu hale getirmesi, hem ulusal hedeflere hem de Avrupa Yeşil Mutabakatı'na entegrasyonu güçlendirecektir.

8.1.6 Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), kentlerin daha dirençli, verimli ve çevreci hale gelmesinde önemli bir rol oynasa da; bu sistemlerin hayata geçirilmesinde çeşitli yapısal, yönetsel ve teknik engellerle karşılaşılmaktadır. Özellikle afet yönetimiyle entegre AUS sistemleri kurmak isteyen şehirlerde aşağıdaki temel zorluklar öne çıkmaktadır:

Karşılaşılan Zorluklar

Veri Paylaşımı ve Entegrasyon Eksikliği: AUS'nin afet yönetimi, çevresel izleme ve enerji altyapılarıyla birlikte çalışabilmesi için çok paydaşlı veri paylaşımı gereklidir. Ancak Türkiye'de veri güvenliği endişeleri, mükerrer sistemler ve kurumsal koordinasyon eksikliği bu paylaşımı zorlaştırmaktadır.

Finansman ve Kaynak Yetersizliği: AUS yatırımları, özellikle orta ve küçük ölçekli belediyeler için yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle uygulanabilirliğini kaybetmektedir. Proje tabanlı hibeler ve kamu-özel iş birliği modelleri yeterince etkin kullanılmamaktadır.

Nitelikli İnsan Kaynağı Eksikliği: AUS'nin işletimi, bakımı ve analitiği için hem teknik hem de yönetsel kapasitenin artırılması gereklidir. Ancak yerel yönetimlerde bu konuda uzman personel sayısı sınırlıdır.

Yasal ve Mevzuat Uyumsuzlukları: Akıllı şehircilik ve afet yönetimi konusunda mevzuatların bütüncül bir yaklaşımla güncellenmemiş olması, AUS uygulamalarının yasal dayanağını zayıflatmakta, bazı çözümlerin yaygınlaştırılmasını engellemektedir.

Gelecek Perspektifleri

Ulusal AUS Yatırım Rehberi: Yerel yönetimlerin stratejik planlama süreçlerinde kullanabilecekleri, afet yönetimiyle entegre AUS yatırımlarını kapsayan bir "Ulusal AUS Yatırım Rehberi" hazırlanmalıdır. Bu rehber, aynı zamanda SECAP ve İDEP uyumluluğunu da gözeterek şekilde kurgulanmalıdır.

Yapay Zekâ Tabanlı Tahmin Sistemleri: Gelecekte AUS'nin sadece mevcut durumu yönetmekle kalmayıp, afet öncesi senaryoları tahmin eden yapay zekâ destekli analiz sistemleri ile desteklenmesi hedeflenmelidir.

Veri Egemenliği ve Açık Veri Yaklaşımı: Belediyelerin kendi verilerine sahip çıkmaları ve açık veri altyapıları kurarak kriz yönetiminde çok aktörlü işbirliğine zemin hazırlamaları gereklidir. Bu yaklaşım, afet dayanıklılığının kolektif bir sorumluluk olduğunu da vurgular.

İklim Uyumlu AUS Mevzuatı: AUS'nin iklim değişikliğiyle mücadelede aktif rol üstlenebilmesi için, enerji verimliliği, elektrikli ulaşım ve karbon ayak izi izleme gibi konularda mevzuat desteği sağlanmalıdır.

Bu perspektif doğrultusunda, AUS'nin afet yönetimi sistemleriyle birlikte planlanması; Türkiye'nin hem Sendai Çerçevesi, hem Avrupa Yeşil Mutabakatı, hem de Paris Anlaşması kapsamındaki NDC hedefleriyle daha uyumlu hale gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca, Kentlerin Dirençliliği 2030 (MCR2030) gibi girişimlere katılım da AUS politikalarının yönünü belirlemede önemli bir fırsattır.

8.2 Doğa temelli çözümler ile dijital risk modellemesi

8.2.1 Dijital Risk Modellemesi

Dijital risk modellemesi, kentlerin karşı karşıya olduğu afet, iklim ve çevresel risklerin coğrafi, fiziksel ve sosyoekonomik veriler ışığında dijital ortamda analiz edilmesi, görselleştirilmesi ve senaryolar aracılığıyla yönetilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, karar vericilere olası kriz senaryolarına karşı önceden planlama yapma ve kaynaklarını etkin kullanma imkânı sunar.

Temel Bileşenler

Dijital risk modellemesi, aşağıdaki teknolojik bileşenlerin entegre çalışmasıyla uygulanır:

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS): Mekânsal verilerin toplanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesiyle kentteki risklerin haritalanmasına olanak tanır. Örneğin, heyelan, taşkın, sıcaklık dalgası gibi riskler coğrafi katmanlar üzerinde modellenabilir.

Uzaktan Algılama ve Uydu Verileri: Yüzey sıcaklığı, su seviyesi değişimi, orman örtüsü tahribatı gibi çevresel değişkenlerin uzaktan izlenmesiyle risk eğilimleri tespit edilir.

Sayısal İkiz Teknolojisi: Şehirlerin dijital kopyası üzerinde senaryolar test edilerek kritik altyapıların (köprüler, yollar, su sistemleri) afetlere karşı dayanıklılığı analiz edilir.

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi: Tarihsel afet verileri ile meteorolojik, hidrolojik ve kentsel büyüme verilerinden yola çıkarak, risklerin nerede yoğunlaştığını ve hangi alanlarda önlem alınması gerektiğini öngörebilir.

Uygulama Alanları

Taşkın ve Sel Riski Analizi: Yağış yoğunluğu, eğim, drenaj kapasitesi ve altyapı yoğunluğu dikkate alınarak su baskını risk bölgeleri modellenebilir.

Kentsel Isı Adası Etkisi: Beton yoğunluğu, yeşil alan eksikliği ve trafik verileri ile sıcaklık dalgalarının etkilediği alanlar belirlenerek bu alanlara yönelik yeşillendirme önlemleri planlanabilir.

Afet Erken Uyarı Senaryoları: Meteorolojik verilerin analizine dayalı olarak ulaşım ve enerji altyapılarının en fazla etkileneceği bölgeler belirlenip, tahliye rotaları dijital olarak planlanabilir.

Politika Bağlantısı

Dijital risk modellemesi, hem Sendai Afet Risk Azaltım Çerçevesi, hem de AB İklim Uyum Stratejisi ile tam uyumludur. Türkiye’de ise Türkiye Ulusal Risk Kalkanı Modeli, İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Planları kapsamında dijital modelleme kabiliyetlerinin artırılması hedeflenmektedir. Yerel yönetimlerin bu kapsamdaki planlamalarında, modelleme sonuçlarını İklim Uyum Eylem Planları (SECAP), İl Risk Azaltım Planları (İRAP) ve Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) süreçleriyle entegre etmeleri önerilmektedir.

8.2.2 Doğa Temelli Çözümler (DoCS)

Doğa Temelli Çözümler (DoCS), ekosistem hizmetlerinden yararlanarak çevresel, sosyal ve ekonomik sorunlara sürdürülebilir çözümler üreten bir yaklaşımdır. Bu çözümler, hem insan refahını artırmayı hem de doğanın kendini yenileme kapasitesini korumayı hedefler. DoCS uygulamaları, iklim değişikliğiyle mücadele, afet risklerinin azaltılması, biyolojik çeşitliliğin korunması ve kentlerin sürdürülebilir kalkınması açısından kilit öneme sahiptir.

DoCS Temel Yaklaşımı

Uluslararası Doğa Koruma Birliği (IUCN) tarafından çerçevesi çizilen Doğa Temelli Çözümler; doğal ya da yarı-doğal sistemlerin, iklim adaptasyonu, afet dayanıklılığı ve kentsel yaşanabilirliğe katkı sağlayacak biçimde planlanmasını kapsar.

Kentleşmenin hızla arttığı günümüzde, mühendislik tabanlı gri altyapıların yanında, doğa temelli yeşil ve mavi altyapı çözümleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Uygulama Alanları

Yeşil Alanlar ve Kent Ormanları: Karbon yutağı olarak işlev gören bu alanlar, kentsel ısı adası etkisini azaltırken, taşkın riski olan bölgelerde suyun yeraltına sızmasını kolaylaştırarak sel riskini düşürür.

Yağmur Bahçeleri ve Geçirgen Yüzeyler: Kentsel su baskınlarını önlemeye yönelik altyapılar, yağmur suyunun doğal yollarla filtrelenmesini ve yüzey akışının kontrol edilmesini sağlar.

Kıyı ve Nehir Ekosistemlerinin Restorasyonu: Deniz seviyesi yükselmesi ve taşkınlara karşı doğal tampon görevi gören sulak alanlar ve kıyı kumulları, altyapı yatırımlarını destekleyen ekolojik savunma hatlarıdır.

Doğal Afetlere Karşı Ekosistem Temelli Önlemler: Orman sınırlandırmaları, heyelan riskini azaltmakta; çayır alanları ve vadiler, fırtına ve sel sırasında suyun kontrollü şekilde yönlendirilmesine olanak tanımaktadır.

DoCS ve Kent Planlama İlişkisi

DoCS, mekânsal planlama, imar uygulamaları ve kentsel dönüşüm politikalarıyla entegre şekilde ele alındığında, dirençli şehir vizyonuna doğrudan katkı sunar. Özellikle İklim Uyum Planları (SECAP), Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları (SUMP) ve İl Risk Azaltım Planları (İRAP) kapsamında doğa temelli müdahalelerin önceliklendirilmesi, çevresel risklerin azaltılmasında düşük maliyetli ve uzun vadeli çözümler sunar.

Mevzuat ve Strateji Bağlantısı

DoCS yaklaşımı, Avrupa Yeşil Mutabakatı, AB Biyoçeşitlilik Stratejisi, Paris Anlaşması ve BM 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile uyumludur. Türkiye’de ise Ulusal Biyoçeşitlilik Stratejisi, İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve

Eylem Planı, Mekânsal Strateji Planı (2024-2053) ve Sıfır Atık Eylem Planı gibi belgeler bu çözümlerin planlama süreçlerine entegre edilmesini teşvik etmektedir.

Dijital Risk Modellemesi ile Doğa Temelli Çözümlerin Entegrasyonu

Dijital risk modellemesi ve doğa temelli çözümler (DoCS), birbirini tamamlayan iki temel yaklaşım olarak, kentlerin dirençlilik kapasitesini artırmak için bütüncül bir çerçevede değerlendirilmelidir. Bu entegrasyon sayesinde, yalnızca afetlere karşı daha etkin önlemler alınmakla kalmaz; aynı zamanda iklim değişikliğine uyum, biyolojik çeşitlilik korunumu ve yeşil altyapı planlaması gibi hedeflere de sistematik katkı sağlanır.

Entegrasyonun Stratejik Değeri

Veriye Dayalı DoCS Planlaması: Dijital risk modelleri sayesinde sel, sıcaklık dalgaları, kuraklık ve toprak kayması gibi riskler coğrafi olarak hassas bölgelerde tespit edilebilir. Bu veriler, doğa temelli çözümlerin (yağmur bahçeleri, yeşil koridorlar, geçirgen yüzeyler vb.) hangi bölgelere nasıl uygulanacağına dair karar alma süreçlerini destekler.

Dinamik Senaryo Testleri: Sayısal ikiz ve CBS tabanlı modellemeler ile, doğa temelli altyapıların (örneğin ağaçlandırma veya sulak alan restorasyonu) afet riskini ne ölçüde azalttığı test edilebilir. Bu yaklaşım, planlamayı sadece teorik değil, ölçülebilir kılar.

İklim ve Afet Eylem Planlarının Entegrasyonu: Dijital modelleme araçlarıyla elde edilen risk analizleri, DoCS uygulamalarını içeren SECAP, İRAP, İDEP ve SUMP belgelerine doğrudan entegre edilebilir. Böylece planlama, veri destekli ve çok sektörlü hale gelir.

Yapay Zekâ ile Önceliklendirme: Makine öğrenmesi ve yapay zekâ algoritmaları, farklı DoCS senaryolarının etkinliğini değerlendirerek belediyelere uygulanabilirlik, maliyet ve etki düzeyi açısından öneriler sunabilir.

Teknik Uygulama Araçları

Katmanlı Risk Haritaları: Kentsel ısı adası, taşkın, hava kirliliği gibi farklı risklerin mekânsal örtüşmeleri analiz edilerek, doğa temelli müdahale alanları önceliklendirilebilir.

Ekosistem Hizmetleri Modelleme Araçları: InVEST, ARIES, i-Tree gibi uluslararası araçlar ile yeşil altyapının sağlayacağı faydalar (karbon tutumu, su yönetimi, serinletme etkisi) dijital ortamda hesaplanabilir.

Açık Kaynak Platformlar ile Entegrasyon: DoCS ve dijital modellemeler, QGIS, GeoNode, UrbanACT gibi açık kaynak çözümler üzerinden yerel yönetimlerin karar destek sistemlerine entegre edilebilir.

Politika ve Mevzuat Bağlantısı

Bu entegrasyon yaklaşımı, Avrupa Komisyonu'nun "Nature-Based Solutions for Disaster Risk Reduction" çerçevesi, BM Making Cities Resilient 2030 (MCR2030) girişimi ve AB Horizon Europe Programı kapsamındaki proje çağrılarıyla doğrudan uyumludur. Türkiye'de ise İklim Değişikliği Başkanlığı ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen Ulusal Risk Kalkanı Modeli, Mekânsal Strateji Planı (2024–2053) ve Doğa Temelli Çözümler Yol Haritası entegrasyonu desteklemektedir.

8.2.3 Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Dijital risk modellemesi ile doğa temelli çözümlerin entegrasyonu, şehirlerin dirençlilik stratejilerinde çığır açıcı bir potansiyele sahip olsa da, bu bütüncül yaklaşımın hayata geçirilmesinde çeşitli teknik, yönetsel ve yapısal zorluklarla karşılaşmaktadır. Söz konusu entegrasyonun etkili biçimde uygulanabilmesi için bu zorlukların aşılması ve geleceğe yönelik sistematik stratejilerin geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Karşılaşılan Zorluklar

Veri Uyuşmazlıkları ve Ölçek Sorunları: Dijital modelleme sistemleri çoğunlukla yüksek çözünürlüklü, güncel ve coğrafi olarak hassas veri setlerine ihtiyaç duyar. Ancak DoCS uygulamaları genellikle daha geniş ölçekte ve uzun vadeli etki prensibiyle çalıştığından, bu iki sistemin uyumlaştırılması teknik açıdan zordur.

Kurumsal Koordinasyon Eksikliği: Risk modellemesi genellikle afet ve altyapı birimlerinin kontrolünde yürütülürken, doğa temelli çözümler çoğunlukla çevre veya peyzaj birimlerinin gündemindedir. Bu durum, entegrasyon sürecinde kurumlar arası eşgüdüm eksikliği yaratmaktadır.

Yönetişim Kapasitesi ve Teknik Yetersizlik: Sayısal ikiz, AI tabanlı analizler, CBS destekli karar araçları gibi teknolojiler, yerel yönetimlerin insan kaynağı ve dijital kapasite düzeyleri açısından her zaman erişilebilir olmayabilir.

Politika ve Mevzuat Uyuşmazlığı: Doğa temelli çözümler henüz birçok kentsel mevzuatta tanımlı değildir. Ayrıca risk modellemesi çıktılarının planlama süreçlerine bağlanmasına dair yönetmeliksel bir çerçeve eksikliği bulunmaktadır.

Gelecek Perspektifleri

DoCS'yi Taniyan Kentsel Planlama Mevzuatı: İmar planları, çevresel etki değerlendirmesi ve afet eylem planları gibi düzenleyici belgelerde doğa temelli çözümlerin tanımlanması ve teşvik edilmesi kritik bir adımdır.

Veri Standartlarının ve Açık Platformların Geliştirilmesi: Risk modelleme sistemlerinin DoCS ile entegre çalışabilmesi için mekânsal veri yönetimi standartlarının oluşturulması ve açık veri altyapılarının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Ulusal Yol Haritaları ve Fon Mekanizmaları: Türkiye'de DoCS ve dijital risk modellemesi entegrasyonunu teşvik edecek şekilde, merkezi yönetim düzeyinde ulusal yol haritalarının hazırlanması ve bu entegrasyonu destekleyen fon mekanizmalarının (örneğin SECAP uyum fonları) kurulması önerilmektedir.

Uluslararası İşbirliği ve Kapasite Artırımı: Horizon Europe, LIFE, IPA III gibi programlar üzerinden hem teknik kapasite artırımı hem de örnek proje üretimi desteklenmelidir. Yerel yönetimlerin uluslararası iyi uygulamalara erişimi artırılmalıdır.

Bu perspektif doğrultusunda, dijitalleşme ve doğa temelli çözüm yaklaşımlarının bir arada ele alınması; Türkiye'nin hem iklim uyumu stratejilerine, hem de afete dirençli şehirleşme hedeflerine ulaşmasında dönüştürücü bir rol oynayacaktır.

8.3 Kentsel risk haritalama, dijital eşitsizlik ve kapsayıcı veri altyapısı

8.3.1 Kentsel Risk Haritalamanın Teknik Temelleri

Kentsel risk haritalama, şehirlerin doğal ve insan kaynaklı tehditlere karşı maruz kalma düzeylerinin mekânsal olarak analiz edilmesi ve görselleştirilmesi sürecidir. Bu süreç, planlama, afet yönetimi ve iklim uyumu açısından temel teşkil eder. Teknik olarak güçlü, güncel ve çok katmanlı risk haritaları; yerel yönetimlerin kaynak tahsisi, önceliklendirme ve müdahale planlarını şekillendirmede kritik bir rol oynar.

Ana Teknolojik Bileşenler

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS): Mekânsal veri toplama, analiz ve görselleştirme için temel teknolojidir. Kentsel alanlara ilişkin demografik, altyapı, çevresel ve sosyoekonomik veriler; katmanlar hâlinde modellenir.

Uzaktan Algılama ve Dron Tabanlı Veri Toplama: Uydu görüntüleri, termal kameralar, LIDAR ve insansız hava araçları (İHA) kullanılarak güncel ve yüksek çözünürlüklü yüzey verileri elde edilir.

Sayısal Yükseklik ve Eğik Fotoğraf Modelleri: Sel ve heyelan gibi afet risklerinin mekânsal analizinde topografik verilerden faydalanılır.

Veri Entegrasyon Altyapıları: Jeoportall sistemleri, açık veri platformları ve şehir veri merkezleri üzerinden farklı kurumlardan gelen veriler bir araya getirilerek tek bir karar destek sistemine entegre edilir.

Teknik Uygulamalara Örnekler

Afet Tehlike Haritaları: Deprem, sel, fırtına, heyelan gibi doğa kaynaklı tehlikeler için mikro bölgeleme çalışmaları ile haritalar oluşturulur.

Kırılganlık ve Maruziyet Haritaları: Yaşlı nüfus, engellilik oranı, bina stoku, alt yapı erişimi gibi değişkenler mekânsal olarak analiz edilerek sosyal kırılganlık alanları belirlenir.

Kümülatif Risk Haritaları: Farklı tehlike ve kırılganlık katmanlarının üst üste bindirilmesiyle kentsel alanların toplam risk skorları çıkarılır. Bu haritalar, öncelikli müdahale ve yatırım bölgelerini belirlemekte kullanılır.

Stratejik Bağlantı

Kentsel risk haritalamanın teknik olarak güçlendirilmesi, Ulusal Risk Kalkanı Modeli, İRAP, SECAP ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları gibi stratejik planların uygulanabilirliğini artırır. Ayrıca AB'nin "Disaster Risk Management Knowledge Centre" ve "INSPIRE" direktifleri çerçevesinde de bu haritalar, dijital şehir planlamasının temel veri setleri arasında yer alır.

8.3.2 Dijital Eşitsizlik ve Etkileri

Dijital eşitsizlik, bireyler ve topluluklar arasında bilgi ve iletişim teknolojilerine erişim, kullanım ve faydalanma kapasiteleri açısından ortaya çıkan farkları ifade eder. Bu eşitsizlik, yalnızca teknolojik bir erişim sorunu değil; aynı zamanda sosyal adalet, afet dayanıklılığı, iklim uyumu ve katılımcı planlama açısından ciddi yapısal bir zorluktur.

Dijital Eşitsizliğin Boyutları

Erişim Eşitsizliği: Genişbant internet, dijital cihazlar ve teknik altyapıya erişim; özellikle kırsal alanlarda, düşük gelir gruplarında ve yaşlı nüfusta sınırlıdır.

Dijital Okuryazarlık Farklılıkları: Teknolojiye erişimi olan bireyler dahi, dijital hizmetleri kullanmakta zorlanabilir. Bu durum, özellikle afet uyarı sistemleri, kentsel dijital haritalar veya çevrim içi kamu hizmetlerinden faydalanmada ciddi ayrımlar yaratır.

Veri Temsil Adaletsizliği: Veri üretimi ve paylaşımı süreçlerinde bazı topluluklar (örneğin göçmenler, gecekondü bölgeleri, engelli bireyler) yeterince temsil edilmediğinde; kentsel risk haritaları ve müdahale planları bu grupların ihtiyaçlarını göz ardı edebilir.

Dijital Eşitsizliğin Kentsel Risk Yönetimine Etkileri

Afet Anında Bilgiye Erişim Eksikliği: Erken uyarı sistemleri veya kriz haritaları yalnızca dijital kanallar üzerinden sunulduğunda, dijital dışlanmış gruplar hayati bilgiye ulaşamaz.

Planlama Süreçlerinde Katılım Sorunu: Coğrafi bilgi sistemleri veya dijital anketler gibi katılım araçları kullanıldığında, dijital okuryazarlığı düşük bireylerin sürece dahil olma oranı azalır. Bu da veri temelli kararların temsiliyetini zayıflatır.

Kentsel Müdahale Eşitsizliği: Veri eksikliği nedeniyle kırılgan grupların yaşadığı bölgeler risk haritalarında yeterince görünür olmaz, bu da müdahale kaynaklarının adaletsiz dağılmasına neden olabilir.

Politika ve Strateji Gereklilikleri

Kapsayıcı Veri Politikaları: Kent bilgi sistemlerinin, sosyoekonomik farklılıkları gözetenek eksik verileri tamamlaması ve temsil adaletini sağlaması gerekir.

Hibrit Ulaşım ve Bilgilendirme Yöntemleri: Dijital olmayan yöntemlerle (radyo, kamu ilanları, yüz yüze bilgilendirme) dijital dışlanmış bireylere ulaşılması sağlanmalıdır.

Dijital Okuryazarlık Programları: Belediyeler, afet yönetimi ve çevresel planlama konularında vatandaşlara yönelik dijital kapasite geliştirme eğitimleri sunmalıdır.

Erişilebilirlik Standartları: Mobil uygulamalar, haritalar ve bilgi sistemleri; engelli bireylerin ve yaşlı nüfusun kullanımına uygun, sade ve çok dilli tasarımlarla geliştirilmelidir.

8.3.3 Veri Adaleti (Data Justice) İlkeleri

Veri adaleti (data justice), dijital teknolojilerin ve veri temelli karar mekanizmalarının bireyler, topluluklar ve çevre üzerindeki etkilerini etik, sosyal ve yönetim perspektifinden ele alan bir ilkeler bütünüdür. Bu yaklaşım, veri üretimi, işlenmesi ve kullanımı süreçlerinde adalet, şeffaflık ve kapsayıcılık gibi değerleri önceler. Dirençli şehirler

inşa etmek için kullanılan dijital sistemlerde, özellikle afet riski yönetimi ve çevresel planlamada veri adaletinin gözetilmesi kritik önem taşır.

Veri Adaleti Neye Savunur?

Temsiliyet: Toplanan verilerin, toplumun tüm kesimlerini adil ve eksiksiz şekilde temsil etmesini amaçlar. Özellikle dijitalleşmeden dışlanan, göçmen, engelli, yaşlı veya düşük gelirli grupların veri setlerinde görünür kılınması esastır.

Katılım: Veri toplama ve analiz süreçlerine toplumsal katılımın sağlanması, karar alma süreçlerinde demokratikleşme sağlar. Kırılgan grupların görüşlerinin alınması, veriye dayalı çözümlerin kapsayıcılığını artırır.

Şeffaflık: Veri nasıl toplanıyor, kim tarafından işleniyor ve hangi amaçlarla kullanılıyor gibi sorulara kamuoyunun erişimi olmalıdır. Özellikle yapay zekâ algoritmalarının karar mekanizmaları şeffaf hale getirilmelidir.

Sorumluluk ve Hesap Verebilirlik: Kamusal veri altyapılarında sorumluluk alan kurumların açıkça tanımlanması, veri hatalarından kaynaklanan olumsuz sonuçların telafisini mümkün kılar.

Adil Dağıtım: Veriye dayalı hizmetlerin (afet uyarı sistemleri, erken müdahale, yeşil altyapı yatırımları vb.) tüm kesimlere eşit erişim sağlaması hedeflenmelidir.

Uygulama Örnekleri

New York City – Data Equity Framework: NYC, veri setlerinin demografik eşitliğe göre değerlendirilmesi için bir denetim sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, kamusal kararların sosyoekonomik temsiliyete göre yeniden şekillendirilmesini sağlar.

Barselona – Dijital Haklar Şartı: Kentin dijital altyapılarında bireysel verilerin korunması, şeffaf veri işleme ve kapsayıcı algoritma kullanımı yasal güvence altına alınmıştır.

Amsterdam – Şehir Veri İlkeleri: Her yeni veri tabanlı hizmet, "İnsan Odaklı, Açık, Katılımcı ve Hesap Verebilir" ilkelere göre değerlendirilmektedir.

Türkiye İçin Politika Önerileri

Veri Temsiliyeti İzleme Mekanizmaları: Yerel yönetimlerin CBS ve afet veri altyapılarında temsil eşitliğini ölçen göstergeler geliştirmesi gereklidir.

Açık Veri Politikaları ve Anonimlik: Kamu verilerinin açık erişime sunulması, kişisel mahremiyet ve anonimlik çerçevesinde şeffaf veri paylaşımını mümkün kılar.

Erişilebilirlik Standartları ve Çok Dilli Platformlar: Veri sunumlarında engelli bireyler ve farklı dil gruplarını kapsayan erişilebilirlik önlemleri uygulanmalıdır.

Politika ve Mevzuat Bağlantısı

Veri adaleti ilkeleri; AB Dijital Hizmetler Yasası, Açık Hükümet Ortaklığı (OGP), BM Dijital Haklar Rehberi, OECD Veri Yönetişimi İlkeleri ve AB Yapay Zekâ Etik İlkeleri gibi çok sayıda uluslararası çerçeveye doğrudan ilişkilidir. Türkiye'de ise Kişisel Verileri Koruma Kanunu (KVKK), Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi (2021-2025) ve Dijital Türkiye Vizyonu belgeleri, veri adaletinin yönetim mekanizmalarına yansıtılması açısından temel referansları oluşturmaktadır.

8.3.4 Entegrasyon Örnekleri ve Uygulamalar

Kentsel risk haritalama, dijital eşitsizlik ve kapsayıcı veri altyapısı ilkelerinin birlikte ele alınması; yerel yönetimlerin afet riskine karşı daha dirençli, adil ve katılımcı şehirler tasarlamasını mümkün kılmaktadır. Bu bütüncül yaklaşımın farklı ülkelerde, bölgelerde ve Türkiye'de çeşitli entegrasyon örnekleri ile başarılı uygulamaları mevcuttur.

Uluslararası Uygulama Örnekleri

Amsterdam (Hollanda) – Şehir Veri Platformu: Amsterdam, şehir genelinde kullanılan verileri dijital eşitsizlikleri azaltacak şekilde yeniden kategorize etmiş ve bu verileri açık kaynak olarak tüm vatandaşlara sunmuştur. Uygulama, enerji yoksunluğu haritalarından yeşil alan eşitsizliğine kadar birçok başlıkta görsel ve erişilebilir içerik üretmektedir.

Kopenhag (Danimarka) – Kentsel Isı Haritalama Sistemi: CBS ve yapay zekâ destekli modellemelerle oluşturulan bu sistem, ısı adası etkilerinin yoğun olduğu bölgeleri belirlemekte ve bu alanlarda doğa temelli çözümlere öncelik tanımaktadır. Elde edilen veriler, kapsayıcı planlama kararlarını yönlendirmektedir.

New York City (ABD) – Equity NYC Dashboard: Kentteki sağlık, eğitim, ulaşım ve afet dayanıklılığı verileri; toplumsal gruplar özelinde analiz edilerek açık veri portalı üzerinden yayınlanmaktadır. Bu sayede karar alıcılar, yatırım ve müdahale süreçlerinde kapsayıcı veri altyapısını temel alabilmektedir.

TR Türkiye'den İyi Uygulama Örnekleri

Ankara – Dijital Afet Risk Haritası Pilot Projesi: İlçe belediyeleriyle birlikte yürütülen bu projede, yerel risk verileri (deprem, sel, heyelan) katmanlı harita üzerinde gösterilmiş ve açık erişime sunulmuştur. Dijital dışlanmış kesimlere yönelik mobil bilgilendirme uygulamaları da geliştirilmiştir.

İstanbul – Veri Temelli Sosyal Kırılganlık Haritası: Sosyal yardımların mekânsal dağılımına yönelik veri toplayan bu sistemde, demografik eşitsizlikler ile afet riski katmanları üst üste bindirilmiş ve mahalle ölçeğinde kırılganlık analizleri yapılmıştır.

İzmir – Katılımcı Haritalama Uygulamaları: Özellikle kentsel dönüşüm ve iklim uyumu projelerinde, yurttaşların çevrim içi platformlar üzerinden kendi gözlemlerini işaretleyebildikleri katılımcı haritalama sistemi devreye alınmıştır.

Ortak Başarı Kriterleri

Veri temelli planlamanın katılımcı ve şeffaf hale getirilmesi

Kırılgan grupların görünür kılınması

Doğa temelli çözümlerle veri analizinin entegre edilmesi

Mobil, erişilebilir ve çok dilli platformların hayata geçirilmesi

Politika ve Finansman Bağlantısı

Bu uygulamaların yaygınlaştırılması için; AB Horizon Europe, LIFE Programı, IPA III, EBRD Green Cities, UNDRR MCR2030 ve OECD Inclusive Data Charter gibi kaynak ve iş birliği platformlarından faydalanılabilir. Türkiye’de ise TÜBİTAK 1001, İklim Uyum Stratejisi ve Eylem Planı ve Mekânsal Strateji Planı bu tür projelere yön gösterici belgeler arasında yer almaktadır.

8.3.5. Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Kentsel risk haritalama, dijital eşitsizlik ve kapsayıcı veri altyapısının entegrasyonu; dirençli şehirler vizyonunun hayata geçirilmesinde büyük potansiyel sunmaktadır. Ancak bu bütüncül yaklaşım, uygulamada bazı teknik, yönetişimsel ve yapısal zorluklarla karşı karşıyadır. Gelecek perspektifi, bu zorlukları aşacak stratejilerin geliştirilmesiyle şekillenecektir.

Karşılaşılan Zorluklar

Veri Uyuşmazlığı ve Dağınıklığı: Farklı kurumlar arasında standartlaştırılmamış veri formatları ve tutarsız güncelleme periyotları, kent düzeyinde entegre risk analizlerinin yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Dijital Dışlanma Riski: Özellikle yaşlı bireyler, göçmenler, düşük gelirli gruplar ve kırsal bölgelerde yaşayanlar dijital araçlara erişimde zorluk yaşamakta; bu da kapsayıcı planlamayı sekteye uğratmaktadır.

Yetersiz İnsan Kaynağı ve Kurumsal Kapasite: Yerel yönetimlerde CBS, açık veri yönetimi ve yapay zekâ tabanlı analiz gibi uzmanlık gerektiren alanlarda personel eksikliği sık görülmektedir.

Veri Güvenliği ve Mahremiyet: Kapsamlı veri kullanımı, kişisel bilgilerin gizliliği ve kamu verisinin kötüye kullanımına ilişkin riskleri de beraberinde getirmektedir.

Gelecek Perspektifleri

Veri Standartlarının Ulusal Düzeyde Belirlenmesi: Mekânsal veri altyapısının entegre çalışabilmesi için ulusal çapta veri formatı, paylaşım protokolleri ve açık veri politikalarının tanımlanması gereklidir.

Yurttaş Odaklı Veri Sistemleri: Katılımcı haritalama, topluluk temelli veri toplama ve mobil erişimli platformlar aracılığıyla halkın veri süreçlerine aktif katılımı teşvik edilmelidir.

Dijital Okuryazarlık ve Erişim Programları: Teknolojiye erişimi olmayan veya kullanma kapasitesi düşük gruplar için, yerel düzeyde dijital kapsayıcılık programları oluşturulmalı; belediyeler bu konuda sosyal hizmet yaklaşımı geliştirmelidir.

Yönetişim Reformları ve Mevzuat Uyumu: Açık veri, veri paylaşımı ve algoritmik şeffaflık gibi konuların yasal çerçevesi netleştirilmeli; etik veri yönetimi ilkeleri kamu kurumları tarafından benimsenmelidir.

Uluslararası Fonlar ve Ortaklıklar: Kapsayıcı ve dirençli veri altyapılarının geliştirilmesinde AB, BM ve OECD tarafından sağlanan teknik yardım ve finansman mekanizmalarına daha aktif erişim sağlanmalıdır.

Politika Bağlantısı

Bu zorluk ve yönelimler, Türkiye'nin Dijital Türkiye Stratejisi, Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi (2021-2025), İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı ve Ulusal Risk Kalkanı Modeli ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, AB'nin "Digital Decade 2030" hedefleri ve "Data Governance Act" çerçevesiyle uyumlu ulusal politikalar geliştirilmesi önem arz etmektedir.

8.4 İDEP ve SECAP uyumlu eylem planlarında e-verimliliğin rolü

8.4.1 İDEP ve SECAP: Temel Yapılar ve Amaçlar

İklim değişikliği ile mücadele ve uyum politikalarının yerelleştirilmesi sürecinde, İklim Değişikliği Eylem Planları (İDEP) ve Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planları (SECAP), belediyelerin stratejik yol haritalarını belirleyen iki temel planlama aracıdır. Her iki planlama aracı da kentlerin sera gazı salımlarını azaltma, enerji verimliliğini artırma ve iklim kaynaklı risklere karşı dayanıklılığını güçlendirme hedefleriyle örtüşmektedir.

İDEP – İklim Değişikliği Eylem Planı

İDEP, Türkiye'de yerel yönetimlerin iklim değişikliğine uyum ve sera gazı azaltımı çerçevesinde hazırladığı eylem planıdır. Plan, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (IDESP) ile uyumlu olacak şekilde yapılandırılır.

Temel Bileşenleri:

Kent ölçeğinde iklim risklerinin analizi

Sera gazı envanter çalışmaları

Sektörel eylemler (enerji, atık, ulaşım, su, tarım vb.)

Uyum ve azaltım hedefleri

Performans izleme ve raporlama sistemi

Yasal Bağ: 2021 yılında yürürlüğe giren İklim Kanunu Taslağı ve 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi doğrultusunda yerel yönetimlerin İDEP hazırlamaları teşvik edilmektedir.

SECAP – Sustainable Energy and Climate Action Plan

SECAP, Avrupa Komisyonu'nun Covenant of Mayors (Belediye Başkanları Sözleşmesi) girişimi kapsamında tanımlanan, hem sera gazı azaltımı hem de iklim uyumu hedeflerini içeren bütünsel bir planlama aracıdır. AB tarafından teknik destek ve finansman desteği almak isteyen belediyelerin SECAP hazırlamaları beklenmektedir.

Temel Bileşenleri:

Başlangıç salım envanteri (BEI)

Risk ve kırılganlık değerlendirmesi (RVA)

Uyum ve azaltım hedefleri (2030/2050)

Eylem planı ve uygulama takvimi

İzleme ve değerlendirme sistemi (Monitoring Framework)

Finansal Bağ: SECAP, LIFE, Horizon Europe ve IPA III gibi programlara başvuru ön koşulu olarak kabul edilmektedir.

Ortak Noktalar ve Stratejik Önemi

İDEP ve SECAP belgeleri, farklı ölçeklerde hazırlanmakla birlikte aşağıdaki yönleriyle benzer:

Her ikisi de karbon ayak izinin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, iklim risklerine uyum ve katılımcı yönetim ilkelerine dayanır.

Her iki plan da veriye dayalı, sektörel bazlı ve gelişmiş izleme sistemleri içeren teknik yapılarla donatılmıştır.

Belediyeler arası tecrübe paylaşımı, açık veri kullanımı ve ulusal-uluslararası fonlara erişim açısından stratejik değerdedir.

8.4.2. E-Verimlilik Kavramı ve Dijital Teknolojilerin Rolü

E-verimlilik, dijital teknolojilerin kullanımı yoluyla kamu hizmetlerinde enerji, zaman, kaynak ve operasyonel maliyetlerin azaltılması; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanması anlamına gelir. Bu kavram, kentlerin hem iklim eylemi hedeflerine ulaşmalarını kolaylaştırmakta hem de hizmet kalitesini artırmaktadır.

E-Verimlilik Neyi Kapsar?

E-verimlilik, yalnızca enerji tüketiminin azaltılması değil; aynı zamanda dijital çözümlerle süreçlerin daha yalın, hızlı, az kaynak tüketen ve düşük karbon ayak izi oluşturan hale getirilmesidir. Özellikle SECAP ve İDEP gibi eylem planlarında dijitalleşme şu açılardan önemlidir:

Enerji verimliliği sağlayan akıllı kamu binaları

Veriye dayalı atık, su ve ulaşım yönetimi

Dijital iklim izleme ve raporlama sistemleri

Mobil ve çevrim içi katılım araçlarıyla daha etkin yurttaş etkileşimi

Dijital Teknolojilerin Rolü

E-verimliliği sağlayan temel dijital teknolojiler şunlardır:

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS): Risk alanlarının ve emisyon kaynaklarının haritalanması

Sayısal İkiz (Digital Twin): Kentin dijital kopyası üzerinde simülasyonlar yapılarak enerji, trafik ve çevresel senaryolar test edilebilir

Yapay Zekâ ve Veri Analitiği: Enerji tüketim eğilimlerinin analiz edilmesi, tahmin sistemleri ve otomasyon

Akıllı Sayaçlar ve IoT: Elektrik, su ve gaz gibi tüketimlerin gerçek zamanlı izlenmesi ve optimize edilmesi

E-dönüşüm platformları: E-devlet, e-imar, e-izin sistemleri gibi dijital çözümlerle kağıt tüketimi ve bürokratik karbon ayak izi azaltılır

İklim Planlarıyla Entegrasyonu

SECAP ve İDEP belgelerinde, e-verimlilik uygulamaları doğrudan azaltım eylemleri kapsamında ele alınır. Örneğin:

Ulaşım dijitalleştirme → Akıllı trafik yönetimi ve rota optimizasyonu ile emisyon azaltımı

Kentsel hizmetlerde otomasyon → Enerji tüketimini düşüren sokak aydınlatma sistemleri

Çevrim içi halk katılım araçları → Katılım süreçlerinde ofis içi enerji ve belge tüketiminin azaltılması

Politika ve Finansman Bağlantısı

E-verimlilik, AB Yeşil Mutabakatı, Dijital Avrupa Programı, Akıllı Şehirler Stratejileri, OECD e-Government rehberleri ile doğrudan ilişkilidir. Türkiye özelinde Dijital Türkiye Stratejisi, Kamuda Enerji Verimliliği Uygulama Rehberi (2022-2030) ve Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi (2020-2023) belgeleri; e-verimliliği yönlendirici politika araçlarıdır.

8.4.3. İDEP ve SECAP Planlarında E-Verimlilik Entegrasyonu

İDEP ve SECAP belgeleri, yerel yönetimlerin iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum çabalarını sistematik hale getiren stratejik yol haritalarıdır. Bu planların başarısı, yalnızca hedef belirlemekle değil; aynı zamanda bu hedeflere ulaşmak için kaynakların nasıl kullanıldığıyla da doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda e-verimlilik, hem azaltım hem de uyum odaklı eylemlerin daha etkin, düşük maliyetli ve sürdürülebilir şekilde hayata geçirilmesini mümkün kılan kilit bir unsur hâline gelmektedir.

Entegrasyon Alanları

Enerji Verimli Kamusal Binalar:

SECAP'ta yer alan "Kamu binalarında enerji tüketiminin azaltılması" hedefi doğrultusunda, bina otomasyon sistemleri, akıllı sayaçlar, sensör destekli aydınlatma gibi dijital çözümler entegre edilerek enerji tasarrufu sağlanabilir.

İDEP kapsamında, kamu binalarının karbon ayak izinin azaltılması için e-verimlilik modülleri kullanılabilir.

Akıllı Ulaşım Sistemleri:

Toplu taşıma optimizasyonu, gerçek zamanlı rota yönetimi ve mobil yolcu bilgilendirme sistemleri; SECAP eylemlerinde azaltım etkisi olan e-verimlilik uygulamalarıdır.

İDEP'te, ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılmasında dijital çözümlerin etkin kullanımı teşvik edilir.

Dijital İzleme ve Raporlama Sistemleri:

Her iki planda da performans izleme ve raporlama bölümleri bulunmaktadır. Bu alanlarda CBS tabanlı gösterge panelleri, API destekli veri toplama altyapıları ve otomatik rapor sistemleri devreye alınabilir.

E-verimlilik bu süreçlerde veri bütünlüğü ve operasyonel hız kazandırır.

Atık ve Su Yönetiminde Dijitalleştirme:

Atık toplama rotalarının dijital olarak optimize edilmesi, su şebekelerinde kaçak tespiti gibi uygulamalar hem kaynak kullanımını azaltmakta hem de sera gazı salımını düşürmektedir.

Stratejik Kazanımlar

Maliyet Etkinliği: Dijital çözümler, manuel ve dağınık süreçlerin yerine entegre sistemler kullanarak kamu kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlar.

İzlenebilirlik ve Hesap Verebilirlik: E-verimlilik araçları, performans takibini şeffaflaştırarak planların uygulanabilirliğini güçlendirir.

Fon Kaynaklarına Erişim: LIFE, Horizon Europe, EBRD Green Cities gibi finansman programlarında e-verimlilik göstergeleri pozitif değerlendirme kriteri olarak kabul edilmektedir.

Uyumlu Ulusal ve Uluslararası Belgeler

Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023)

Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı (2020-2023)

AB SECAP Rehberleri (JRC SECAP Guidelines, 2021)

ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Standardı

8.4.4. Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Önerileri

İDEP ve SECAP planlarında e-verimliliğin entegrasyonu, yerel yönetimlerin dijital dönüşüm yetkinlikleri, veri altyapısı, insan kaynağı ve yönetim kapasiteleri ile doğrudan ilişkilidir. Türkiye'de e-verimlilik uygulamaları hızla yaygınlaşsa da, bu sürece özgü bir dizi zorlukla karşılaşılmaktadır. Bu zorlukların sistematik biçimde ele alınması ve çözüm önerileriyle desteklenmesi, planların sürdürülebilirliğini güçlendirecektir.

Başlıca Karşılaşılan Zorluklar

Kurumsal Kapasite Eksiklikleri: Belediyelerde enerji yöneticisi, CBS uzmanı, veri analisti gibi dijital dönüşümde kritik görevleri üstlenecek teknik personel sayısı yetersizdir.

Veri Standardizasyon Sorunları: Farklı müdürlüklerden gelen enerji, ulaşım ve çevre verileri farklı formatlarda ve güncellik düzeylerinde olduğu için bütünsel analiz zorlaşmaktadır.

Yetersiz Bütçe ve Finansal Kaynaklar: E-verimlilik yatırımları için gerekli olan altyapı maliyetleri (örneğin akıllı sayaç sistemleri, dijital bina otomasyonu vb.) birçok belediye için yüksek olabilir.

Yasal ve Yönetimsel Belirsizlikler: Planlara dijital çözümlerin entegre edilmesi konusunda mevcut mevzuat açık yönlendirmeler sunmamaktadır. Ayrıca e-verimlilik çıktılarının izlenmesi ve raporlanmasına dair standartlar eksiktir.

Dijital Eşitsizlik: Kırsal belediyeler ve büyükşehir belediyeleri arasında dijital altyapı ve insan kaynağı açısından büyük farklılıklar bulunmaktadır.

Çözüm Önerileri

Kurumsal Kapasite Geliştirme:

Belediyelerde "E-Verimlilik Koordinasyon Birimi" kurulmalı.

Ulusal düzeyde e-verimlilik odaklı teknik eğitim programları başlatılmalı.

İDEP ve SECAP yazım ekiplerine dijital sistem uzmanları dâhil edilmeli.

Veri Standartları ve Entegrasyon:

Çevre, enerji ve ulaşım verileri için ulusal düzeyde açık veri şablonları tanımlanmalı.

Yerel yönetim bilgi sistemleri, merkezi dijital iklim raporlama platformlarına entegre olmalı.

Finansman Araçlarının Geliştirilmesi:

E-verimlilik projeleri için "yeşil bütçeleme" uygulamaları yaygınlaştırılmalı.

Kamu-özel sektör iş birliğiyle dijital altyapı yatırımları desteklenmeli.

AB fonlarına erişim için rehberlik mekanizmaları (mentorluk, eşleştirme) kurulmalı.

Mevzuat ve İzleme Mekanizmalarının Güçlendirilmesi:

E-verimlilik uygulamalarını tanımlayan ve planlara entegre edilmesini teşvik eden düzenlemeler hazırlanmalı.

Performans göstergeleri, SECAP ve İDEP planlarında dijital izlenebilir formatlarla raporlanmalı.

Dijital Kapsayıcılığın Sağlanması:

Küçük ölçekli belediyelere teknik destek sağlanmalı.

E-devlet hizmetlerine erişim kısıtlı gruplar için çevrimdışı çözümler de planlara entegre edilmeli.

8.5 Sonuç ve Öneriler

8.5.1 Entegrasyonun Önemi: Fiziksel ve Dijital Altyapının Uyumu

Dirençli şehirler ve toplumlar inşa etmenin temel unsurlarından biri, fiziksel altyapılarla dijital altyapıların entegre biçimde tasarlanması ve yönetilmesidir. İklim değişikliği, doğal afetler ve kaynak kıtlığı gibi karmaşık sorunlarla mücadelede, sadece betonarme çözümler yeterli olmamakta; aynı zamanda veri odaklı, hızlı tepki verebilen ve öngörü kabiliyeti yüksek dijital sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Neden Entegrasyon Şart?

Fiziksel altyapılar (yol, kanalizasyon, enerji hattı, su şebekesi vb.), doğru şekilde dijital olarak izlenmediğinde, riskli bölgelerde meydana gelen arızalar, can ve mal kaybına neden olabilmektedir.

Dijital sistemler (CBS, yapay zekâ, sensör ağları, erken uyarı sistemleri) ise gerçek zamanlı veriyle beslendiğinde, fiziksel altyapıların kırılgan noktalarını önceden tespit edebilir, müdahale süresini kısaltabilir.

Bu entegrasyon, yerel yönetimlerin karar alma süreçlerinde doğruluğu artırmakta, kaynak kullanımını optimize etmekte ve karbon ayak izini azaltarak iklim hedeflerine katkı sunmaktadır.

Uyumun Anahtar Alanları

Kentsel Ulaşım: Trafik sıkışıklığını azaltmak, toplu taşımayı teşvik etmek ve emisyonları düşürmek için fiziksel ulaşım altyapısı ile akıllı ulaşım sistemlerinin birlikte çalışması gerekir.

Afet Yönetimi: Fiziksel tahliye yolları, toplanma alanları ve barınma merkezleri ile dijital erken uyarı sistemleri, afet senaryolarında eşgüdüm içinde tasarlanmalıdır.

Su ve Enerji Şebekeleri: Akıllı sayaçlar ve sensör destekli denetim mekanizmaları, su ve enerji kayıplarını en aza indirirken altyapı sürdürülebilirliğini artırır.

Yeşil Altyapılar: Parklar, dere yatakları, geçirgen yüzeyler gibi doğa temelli çözümler; dijital risk modellemesi ile entegre edildiğinde, kentlerin iklim uyumu kapasitesini artırır.

Politika Perspektifi

Fiziksel ve dijital altyapıların entegre yönetimi, AB'nin Akıllı Şehirler ve Topluluklar Girişimi, OECD Dijital Dönüşüm İlkeleri, UNDRR MCR2030 ve Dijital Avrupa Programı gibi küresel çerçevelerde stratejik öncelik olarak tanımlanmıştır. Türkiye'de ise Ulusal Mekânsal Strateji Planı, Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı (2020–2023) ve Ulusal Risk Kalkanı Modeli, bu bütüncül yaklaşımın dayanağını oluşturmaktadır.

8.5.2 Politika Yapıcılara, Belediyelere ve Teknoloji Sağlayıcılara Öneriler

Dirençli şehirler ve toplumlar için dijital altyapının geliştirilmesi, sadece teknik bir dönüşüm değil; aynı zamanda yönetim, mevzuat ve finansman modellerini de kapsayan çok boyutlu bir dönüşüm sürecidir. Bu sürecin başarıya ulaşabilmesi, politika yapıcılar, yerel yönetimler ve özel sektör teknoloji sağlayıcılarının ortak ve senkronize çabalarıyla mümkündür. Aşağıda, üç ana paydaş grubuna yönelik öneriler yapılandırılmış şekilde sunulmuştur:

Politika Yapıcılara Yönelik Öneriler

Ulusal Veri Standartlarının Belirlenmesi: CBS, enerji, ulaşım ve afet yönetimi verilerine yönelik açık, erişilebilir ve birlikte çalışabilir veri formatları tanımlanmalıdır.

Yasal Düzenlemelerle Dijital Altyapının Desteklenmesi: Akıllı sistemlerin planlama belgelerine entegrasyonu için zorunlu ve yönlendirici mevzuatlar geliştirilmelidir.

Fon ve Teşvik Mekanizmalarının Geliştirilmesi: Belediyelerin dijital altyapı yatırımlarını artırması için hibe, kredi, eş finansman ve kamu-özel ortaklığı (KÖÖ) mekanizmaları güçlendirilmelidir.

Ulusal E-Verimlilik İzleme Platformu Kurulmalı: İDEP ve SECAP gibi planlardaki dijitalleşme adımlarını izlemek ve karşılaştırmak üzere merkezi bir gösterge tablosu oluşturulmalıdır.

Yerel Yönetimlere (Belediyelere) Yönelik Öneriler

Kurumsal Kapasitenin Geliştirilmesi: CBS uzmanı, veri yöneticisi, enerji yöneticisi, dijital dönüşüm uzmanı gibi alanlarda teknik kadrolar oluşturulmalı, bu personel için sürekli mesleki gelişim programları düzenlenmelidir.

Veriye Dayalı Karar Destek Sistemleri Kurulmalı: Gerçek zamanlı analiz, performans izleme ve senaryo üretimi yapabilen, açık veriyle beslenen dijital iklim platformları belediye bünyesinde hayata geçirilmelidir.

Katılımcı Dijital Araçların Kullanımı Artırılmalı: Yurttaşların karar alma süreçlerine aktif olarak katılabildiği çevrim içi sistemler geliştirilmelidir. Bu sistemler, özellikle kırılgan grupların erişimine uygun tasarlanmalıdır.

Planlara E-Verimlilik Unsurları Dâhil Edilmeli: Hazırlanacak her İDEP veya SECAP belgesinde; dijital çözümlerin maliyet-etkinliği, enerji tasarrufu ve çevresel katkılarına özel alt bölümler ayrılmalıdır.

Teknoloji Sağlayıcılara Yönelik Öneriler

Kamu Odaklı Çözümler Geliştirilmeli: Yerel yönetimlerin sınırlı bütçelerine ve personel altyapısına uygun, modüler ve kolay entegre edilebilir sistemler sunulmalıdır.

Açık Kaynak ve Uyumlu Altyapılar Tercih Edilmeli: Geliştirilen sistemlerin açık veri standartlarıyla uyumlu olması ve farklı kurum sistemleriyle entegrasyonu kolaylaştırılmalıdır.

Etki Temelli Raporlama Mekanizmaları Eklenmeli: Yazılımlar ve platformlar, çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin izlenebileceği gösterge panelleri içermelidir.

Kamu-Özel İş Birliklerine Açık Modeller Sunulmalı: Özellikle küçük belediyelere yönelik düşük maliyetli, ölçeklenebilir pilot uygulamalar teklif edilerek yaygınlaştırma stratejileri oluşturulmalıdır.

8.5.3 Gelecekteki Araştırma Alanları ve Dijital Kent Planlamasında Fırsatlar

Dijital altyapıların kent planlama süreçlerine entegrasyonu, yalnızca mevcut sorunlara çözümler sunmakla kalmaz; aynı zamanda geleceğin şehirlerini daha akıllı, sürdürülebilir ve kapsayıcı biçimde inşa etme yolunda benzersiz fırsatlar doğurur. Bu alanda yapılacak yeni nesil araştırmalar, politika geliştirme süreçlerine bilgi temelli katkı sunarken, teknoloji ve toplumu bir araya getiren yenilikçi kent modellerinin önünü açacaktır.

Gelecekteki Araştırma Alanları

Dijital İkiz Tabanlı Kent Senaryoları:

Şehirlerin dijital kopyaları üzerinden iklim, ulaşım, afet ve enerji senaryolarının gerçek zamanlı simülasyonlarla test edilmesi.

Yapay Zekâ Destekli Kent Yönetimi:

Enerji yönetimi, trafik akışı, atık toplama ve afet müdahale gibi alanlarda otonom karar destek sistemlerinin geliştirilmesi.

İklim Risklerinin Uzamsal ve Zamansal Modellemesi:

Kent ölçeğinde ani hava olayları, su baskını, ısı adası etkisi gibi tehditlerin erken uyarı mekanizmalarıyla haritalanması.

Veri Etiği ve Mahremiyet Çalışmaları:

Açık veri ve topluluk temelli veri toplama süreçlerinde etik, güvenlik ve şeffaflık ilkelerinin dijital yönetimle ilişkilendirilmesi.

Dijital Eşitsizlik Haritalama Teknikleri:

Gelir, yaş, cinsiyet, dijital erişim ve teknolojik donanım gibi değişkenlerin mekânsal analizle sosyal kırılganlık haritalarına dönüştürülmesi.

Dijital Kent Planlamasında Yükselen Fırsatlar

İklim Pozitif Şehir Modeli:

Dijital altyapıların doğru kullanımıyla yalnızca nötr değil, karbon pozitif şehirler tasarlanabilir (örn. dijitalleştirilmiş yeşil altyapı, IoT destekli binalar).

Katılımcı Dijital Planlama Araçları:

Coğrafi katılım platformları, açık veri panoları ve mobil uygulamalarla yurttaşların doğrudan karar süreçlerine dâhil edilmesi.

Dijital Dönüşüm Odaklı Uluslararası İş Birlikleri:

Twinning, Horizon Europe, URBACT, LIFE gibi programlar kapsamında dijital altyapı alanında ortak araştırma ve uygulama projeleri geliştirilmesi.

Siber Dayanıklılık Planlaması:

Afet senaryolarına yalnızca fiziksel değil; siber saldırı, iletişim kesintisi ve veri kaybı gibi dijital riskler de dâhil edilerek bütüncül direnç stratejilerinin oluşturulması.

Yeşil Dijital Göstergelerle İzleme:

E-verimlilik, enerji dönüşümü ve iklim uyumu için dijital performans göstergeleri geliştirilerek SECAP ve İDEP planlarının etkisi daha etkin izlenebilir.

KAYNAKÇA

1. **Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC).** (2021). *SECAP Guidebook – How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP)*. Publications Office of the European Union.
2. **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.** (2021). *Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı (2020–2023)*. Ankara.
3. **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.** (2022). *İklim Değişikliği Eylem Planları (İDEP) Rehberi*. Ankara.
4. **Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi.** (2021). *Dijital Türkiye Yol Haritası*. Ankara.
5. **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2017). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017–2023)*. Ankara.
6. **European Environment Agency (EEA).** (2022). *Urban Adaptation Support Tool (UAST)*. Erişim adresi: <https://climate-adapt.eea.europa.eu>
7. **OECD.** (2020). *Digital Government Index: 2020 Results*. OECD Publishing.
8. **Open & Agile Smart Cities (OASC).** (2023). *Minimal Interoperability Mechanisms (MIMs)*. Erişim adresi: <https://oascities.org>
9. **Türkiye Belediyeler Birliği (TBB).** (2023). *Belediyeler İçin SECAP Hazırlama Rehberi*. Ankara.
10. **Türkiye Bilişim Derneği (TBD).** (2024). *Kamuda E-Verimlilik ve Dijitalleşme Raporu*.
11. **UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction).** (2021). *Making Cities Resilient 2030 (MCR2030): A Global Initiative for Resilient Cities*.
12. **United Nations (UN).** (2019). *UN-Habitat's Strategic Plan 2020–2023*.
13. **World Bank.** (2021). *Smart Cities: Digital Solutions for a More Livable Future*. World Bank Group.



8.6 Organize Sanayi Bölgelerinde Yeşil Dönüşüm

8.6.1 Dünyada Sanayi Bölgeleri

Sanayi bölgeleri kavramı, 19. yüzyılda sanayi devrimi ile başlayan sanayileşme süreci ile birlikte gelişen yüksek ticaret hacmi yaratmak, işletmeler arası iş birliğini sağlamak, çalışanların yeteneklerini geliştirmek amacıyla oluşturulan yapıların adıdır.

Bu yapıların ilk uygulamaları 1897 yılında İngiltere'nin Manchester kentinde kurulan Trafford Park'ta kurulmuş ve daha sonraları gelişmiş ülkelerin tamamına yayılmıştır. Bu bölgelere Amerika'da Silikon Vadisi'nde, İngiltere'de Londra ve Bristol arasındaki bölgede, Fransa'da Grenoble'da rastlamak mümkündür.

Sanayi bölgelerinin bir ülkenin ekonomik, sanayi ve kentsel gelişiminin sağlanması için önemli işlevler üstlendiği bilinmektedir. Bu işlevleri nedeniyle de sanayi bölgeleri, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin pek çoğunda kamu yatırımları olarak desteklenmiş ve üretilmiştir.

Sanayi bölgeleri; sosyal, ekonomik, rekabete ve iş birliğine dayanan küçük ve büyük işletmelerin bir arada bulunduğu üretim ortamları olarak ele alınmaktadır. Başka bir ifadeyle firma topluluklarının altyapı ve üstyapı ihtiyaçlarının karşılanabildiği yoğunlaşmış ve şehre yakın üretim yerleri olarak da adlandırılmaktadır.

8.6.2 Türkiye'de Sanayi Bölgeleri

Türkiye'de sanayileşme çabaları Cumhuriyetle birlikte yoğunluk kazanarak ekonomik kalkınmanın ve yeni kazanılan siyasi bağımsızlığın temeli olarak görülmüştür. Sanayileşme Cumhuriyetin ilk yıllarında özel kesimin girişimlerine bırakılmış ancak gerek mali gücünün yetersizliği gerekse deneyim yoksunluğu nedeniyle özel kesim bu görevi beklenen şekilde yerine getirememiştir.

İlk sanayileşme çabalarına müteakiben 1931 yılında uygulamaya konulan "I. Beş Yıllık Sanayi Planı" çerçevesinde sanayi alt yapısının oluşturulması çalışmalarına başlanmıştır. I. Sanayi Planı döneminde bütünüyle kamu girişimciliği ön planda tutulmuş; Sümerbank, Etibank, Denizcilik Bankası gibi kuruluşlar faaliyete geçmiştir.

OSB Uygulamalarında bugün geline nokta; 1960 yılında başlayan planlı kalkınma döneminde ise sanayinin "lokomotif" sektör olduğu açıklıkla belirtilmiş, ekonomik dengenin kurulması, ekonomik ve toplumsal kalkınmanın birlikte gerçekleştirilmesi, belli bir hızda büyüme ve sanayileşmeye önem verilmesi gibi uzun vadeli hedefler belirlenmiştir.

Belirlenen hedefler doğrultusunda; ülkede sanayinin geliştirilmesi amacıyla uygulamaya konulan pek çok teşvik tedbirlerinden biri olan OSB uygulamalarına, ilk olarak 1962 yılında Bursa'da bir OSB kurulmasıyla başlanmıştır.

8.7 Osb'lerin Genel Tanımı

Organize Sanayi Bölgeleri (OSB)

- Sanayinin uygun görülen alanlarda yapılanmasını sağlamak,
- Çarpık sanayileşme ve çevre sorunlarını önlemek,
- Kentleşmeyi yönlendirmek,

- Kaynakları rasyonel kullanmak,
 - Bilgi ve bilişim teknolojilerinden yararlanmak,
 - Sanayi türlerinin belirli bir plan dâhilinde yerleştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla,
- Sınırları tasdik edilmiş arazi parçalarının imar planlarındaki oranlar dâhilinde, gerekli ortak kullanım alanları,
 - Hizmet ve destek alanları ve teknoloji geliştirme bölgeleri ile donatılıp planlı bir şekilde ve belirli sistemler dâhilinde sanayi için tahsis edilmesiyle oluşturulan ve ilgili Kanun hükümlerine göre kurulan, planlanan ve işletilen, kaynak kullanımında verimliliği hedefleyen mal ve hizmet üretim bölgeleridir.

8.7.1 OSB'lerin Temel Hedefleri:

- Sanayinin disipline edilmesi,
- Şehrin planlı gelişmesine katkıda bulunulması,
- Birbirini tamamlayıcı ve birbirinin yan ürününü teşvik eden sanayicilerin bir arada ve bir program dahilinde üretim yapmalarıyla, üretimde verimliliğin ve kar artışının sağlanması,
- Sanayinin az gelişmiş bölgelerde yaygınlaştırılması,
- Tarım alanlarının sanayide kullanılmasının disipline edilmesi,
- Sağlıklı, ucuz, güvenilir bir altyapı ve ortak sosyal tesisler kurulması,
- Müşterek arıtma tesisleri ile çevre kirliliğinin önlenmesi,
- Bölgelerin devlet gözetiminde, kendi organlarıncı yönetiminin sağlanması olarak belirlenmiştir.

8.7.2 OSB Kuruluş ve İşleyiş Matrisi

Türkiye’de sanayi bölgeleri olarak ifade edilebilen organize sanayi bölgeleri, OSB Mevzuatına göre kurulabilmektedir. İlgili mevzuat OSB’lerin nasıl ve nerede kurulabileceğine ilişkin usul ve esasları belirlemektedir. OSB’lerin uygun yerlere kurulabilmesi Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı’nın onayına tabidir.

Organize sanayi bölgeleri özel hukuk tüzel kişiliği olan sanayi bölgesi vasfına sahiptir. Organize sanayi bölgeleri karma, ihtisas ve özel olmak üzere sektörel ve tüzel kişilik bazında üç başlık altında toplanmıştır.

Organize sanayi bölgelerinin kuruluş süreçlerine Belediye, İl Özel İdaresi, Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı, Mesleki kuruluşlarında katılımı söz konusu olmaktadır. Bu kuruluşlar OSB’nin tüzel kişiliğini oluşturan organları da belirlemektedir. Bu organlar, müteşebbis heyet[†] (kurulduktan sonra genel kurul), yönetim kurulu, denetim kurulu ve bölge müdürlüğünden oluşmaktadır.

Organize sanayi bölgeleri Türkiye’nin son 60 yıllık kentleşme ve sanayileşme politikaları bağlamında sistematik olarak desteklenmiş uygulamalardır. Bu uygulamaların katma değeri ve istihdama olan etkileri söz konusudur. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından düşük faizli, uzun vadeli krediler verilmektedir.

Organize sanayi bölgeleri, Türkiye’nin sanayileşmesini sağlamak, girişimcilere ve sanayicilere yer desteği vermek, özel sektör yatırımlarını belirli bölgelere ve belirli mekanlara yönlendirmek gibi önemli bir işlevi yerine getirmiştir.

Türkiye'nin sanayileşme ve kentleşme sorunlarının çözümü ve planlı bir şekilde gelişimi için OSB'ler politika araçlarından birisi olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede sanayi için uygun yer seçimini ve sanayinin sorunlarının çözümü için bir araç olarak kullanılmışlardır.

8.7.3 Güncel Durum

Bugün itibarıyla ülkemizde 414 adet OSB kurulmuş olup; Bunlardan 369'u Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na, 45'i Tarım ve Orman Bakanlığı'nın uhdesinde faaliyet göstermektedir.

Toplam 414 OSB'nin hali hazırda 288'i tamamlanarak sanayicilerin hizmetine sunulmuştur. Diğer OSB'lerde ise yer seçimi, kamulaştırma, planlama ve altyapı inşaat süreçleri devam etmektedir.

Türkiye'nin sanayi üretiminde lokomotiflik rolünü sürdüren OSB'lerde 68 binden fazla işletme faaliyet göstermektedir. OSB'ler Türkiye'nin sanayi üretiminin yüzde 45'ini gerçekleştirmektedir. Ülkemizde sanayide toplam 5 milyon çalışanın yarısı organize sanayi bölgelerinde istihdam edilmektedir.

8.7.4 Türkiye Organize Sanayi Bölgelerinde Mevcut Durum

8.7.4.1 OSB'lerin Yapısı ve Genel Profili

Organize Sanayi Bölgeleri (OSB), sanayi tesislerinin belirli bir düzen içinde faaliyet gösterdiği, altyapısı devlet tarafından planlanmış ve sunulmuş sanayi bölgeleridir. OSB'ler, sanayi kuruluşlarını çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan daha verimli kılmak amacıyla tasarlanmıştır. Türkiye'deki OSB'ler, sanayileşmenin planlı bir şekilde yapılmasını sağlarken, bölgesel kalkınmaya da önemli katkılarda bulunur. OSB'lerin yapısı, yönetim modeli ve genel profili, sanayiciler için birçok avantaj sağlar.

8.7.5 OSB'lerin Yapısı

8.7.5.1 Yönetim ve Organizasyon

OSB'ler, genellikle sanayicilerin oluşturduğu bir yönetim kurulu tarafından yönetilir. Bu yönetim modeli, bölgedeki sanayi kuruluşlarının ihtiyaçlarına hızlı yanıt vermek ve yönetimi daha etkin hale getirmek amacıyla geliştirilmiştir. OSB yönetiminde sanayiciler, yerel idareler ve ilgili kamu kurumlarının temsilcileri yer alabilir.

8.7.5.2 Altyapı Hizmetleri

OSB'ler, sanayicilere altyapı hizmetleri açısından büyük avantajlar sunar. OSB'lerin sunduğu altyapı hizmetleri arasında şunlar bulunur:

- Enerji (elektrik, doğalgaz)
- Su ve atık su yönetimi
- Yol, haberleşme altyapısı
- Atık yönetimi ve çevre hizmetleri
- Lojistik altyapı Bu hizmetlerin organize bir şekilde sunulması, sanayicilerin daha düşük maliyetle ve daha verimli bir şekilde faaliyet göstermelerine olanak tanır.

8.7.5.3 Sanayi Parselleri

OSB'lerde işletmeler, tahsis edilen sanayi parselleri üzerinde üretim yapar. Parseller, farklı büyüklüklerde olup, sanayicilerin ihtiyaçlarına göre belirlenir. OSB'lerde parsel tahsisi sırasında, sanayicilere altyapı hizmetlerinin sunulmuş olduğu, hazır sanayi alanları sağlanır.

8.7.5.4 Çevresel Planlama

OSB'ler, çevreye duyarlı bir sanayi üretimi için tasarlanmıştır. Bu bağlamda atık yönetimi, su arıtma tesisleri, gürültü kontrolü ve hava kalitesinin korunması gibi çevre dostu altyapılar OSB'lerin yapısına entegre edilmiştir. Aynı zamanda yeşil alanlar ve sosyal tesisler de OSB'lerde bulunur, bu da çevreyi ve iş gücünün yaşam kalitesini koruma amacını taşır.

8.7.5.5 OSB'lerin Genel Profili

8.7.5.5.4 Sanayi Türleri ve Sektörel Dağılım

Türkiye'deki OSB'lerde çok çeşitli sanayi dalları faaliyet göstermektedir. OSB'lerdeki sanayi kuruluşları, genellikle şu sektörlerden oluşur:

- Makine ve Metal İşleme Sanayi
- Gıda Sanayi
- Otomotiv ve Yan Sanayi
- Tekstil ve Hazır Giyim
- Kimya Sanayi
- İnşaat Malzemeleri
- Elektrik-Elektronik OSB'lerdeki işletmeler, genellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerden (KOBİ) oluşmakla birlikte, büyük sanayi kuruluşları da bu bölgelerde yer alabilir.

8.7.5.6 Teknolojik Gelişim ve İnovasyon

OSB'lerde faaliyet gösteren işletmeler, teknolojik gelişimi ve inovasyonu teşvik eden bir yapıya sahiptir. Son yıllarda Türkiye'deki birçok OSB, teknoparklar ve Ar-Ge merkezleri kurarak sanayi üretiminde teknolojik yeniliklerin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bölgeler, Türkiye'nin yerli üretim kapasitesini artırırken, aynı zamanda teknoloji odaklı sanayi politikalarının geliştirilmesine de olanak tanır.

8.7.5.7 İstihdam ve Eğitim

OSB'ler, yoğun istihdam alanlarıdır. Bu bölgeler, sanayinin ihtiyacı olan kalifiye iş gücünü yetiştiren eğitim programlarıyla iş gücü piyasasına önemli katkılar sağlar. Birçok OSB, içerisinde meslek liseleri, teknik okullar ve eğitim merkezleri kurarak sanayinin ihtiyaç duyduğu teknik bilgiyi sağlayan personellerin yetişmesine olanak tanır.

8.7.5.8 İhracata Yönelik Üretim

OSB'lerdeki üretimin büyük bir kısmı, ihracata yönelik olarak yapılmaktadır. Türkiye'nin dış ticaret hacmine önemli katkılar sağlayan OSB'ler, ihracata dayalı büyüme stratejilerinin bir parçası olarak faaliyet gösterir. Bu bölgelerde, özellikle katma değeri yüksek ve teknolojik ürünlerin üretimi teşvik edilmektedir.

8.7.5.9 Yatırım Cazibesi

OSB'ler, yatırımcılar için çeşitli teşvikler sunan cazip bölgeler olarak dikkat çeker. Vergi muafiyetleri, düşük maliyetli arazi ve altyapı hizmetleri, yatırımcıların OSB'leri tercih etmelerinde önemli faktörlerdir. Ayrıca devlet teşvikleri ve kredi destekleri ile yatırımcıların bu bölgelere yönlendirilmesi sağlanmaktadır.

8.7.5.10 Çevresel ve Sosyal Sorumluluk

Türkiye'deki OSB'ler, sanayi üretiminde çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı hedefler. Birçok OSB, çevresel düzenlemelere uygun atık yönetimi ve geri dönüşüm sistemleri kurmuş olup, çevreye duyarlı üretim süreçlerini destekler. Aynı zamanda bu bölgeler, sosyal sorumluluk projelerine de önem vererek yerel halkla ve çevredeki topluluklarla uyumlu bir şekilde çalışır.

Türkiye'deki OSB'ler, modern altyapıları, yatırım teşvikleri, sanayi çeşitliliği ve çevre dostu yapıları ile sanayiciler için önemli avantajlar sunan organize alanlardır. Bu bölgeler, hem yerli hem de yabancı yatırımcılar için çekici yatırım ortamı sağlarken, Türkiye'nin sanayi üretim kapasitesini artırarak ekonomiye önemli katkılar sağlamaktadır. OSB'lerin yapısı, planlı sanayileşme, sürdürülebilirlik ve verimli üretim odaklı bir model sunarak Türkiye'nin ekonomik büyüme stratejilerinde önemli bir rol oynamaktadır.

8.7.6 OSB'lerin Türkiye Ekonomisindeki Rolü ve Önemi

8.7.6.1 Sanayileşmenin Teşviki ve Üretim Üssü

OSB'ler, Türkiye'nin sanayileşme sürecini hızlandırarak üretim kapasitesini artıran merkezlerdir. Bu bölgeler, modern altyapıları ve düşük maliyetli üretim avantajları sayesinde sanayicilere büyük kolaylıklar sağlar. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) üretim yapabileceği uygun ortamlar sunar, böylece yerli üretimi destekler ve dışa bağımlılığı azaltır.

8.7.6.2 İstihdam Yaratma

OSB'ler, istihdam yaratma açısından önemli katkılar sağlar. Sanayi bölgelerinde kurulan fabrikalar, çevre illerden ve şehirlerden iş gücü talebini artırır ve istihdam sağlar. Bu, işsizlik oranının düşmesine katkı yaparken, nitelikli iş gücünün artmasını da teşvik eder. Aynı zamanda bu bölgelerde eğitim kurumları ile işbirlikleri yapılarak iş gücünün mesleki gelişimi desteklenir.

8.7.6.3 Bölgesel Kalkınmaya Katkı

Türkiye'nin farklı bölgelerinde kurulan OSB'ler, sanayinin belli merkezlerde yoğunlaşmasının önüne geçerek bölgesel kalkınmayı dengeli hale getirir. Özellikle gelişmemiş ya da az gelişmiş bölgelerde sanayi yatırımlarını teşvik ederek bölgesel eşitsizliklerin azaltılmasına katkı sağlar. Bu, aynı zamanda iç göçü azaltarak yerel ekonomilerin gelişimini destekler.

8.7.6.4 Yatırım Teşvikleri ve Vergi Avantajları

OSB'ler, yatırımcılar için çeşitli teşvikler sunar. Vergi avantajları, altyapı hizmetlerinin düşük maliyetle sunulması ve yer tahsisinde kolaylıklar gibi faktörler, sanayicileri OSB'lerde yatırım yapmaya teşvik eder. Bu da sermaye yatırımlarının artmasını ve yeni üretim tesislerinin kurulmasını sağlar. Özellikle stratejik sektörlerde verilen teşvikler, Türkiye'nin sanayi üretiminde daha rekabetçi hale gelmesine yardımcı olur.

8.7.6.5 Dış Ticaret ve İhracata Katkı

OSB'ler, ihracat odaklı üretim yapısı ile Türkiye'nin dış ticaret dengesine önemli katkılar sağlar. Organize sanayi bölgelerinde yer alan firmalar, ürünlerini yurt dışı pazarlara ihraç ederek Türkiye'nin ihracat hacmini artırır ve dış ticaret açığının kapanmasına yardımcı olur. Özellikle, teknolojik üretim ve katma değerli ürünlerin üretildiği OSB'ler, Türkiye'nin küresel ticaretteki rekabet gücünü artırır.

8.7.6.6 Çevre Dostu Üretim ve Sürdürülebilirlik

Son yıllarda OSB'lerde çevre dostu üretim ve sürdürülebilirlik ön plana çıkmıştır. OSB'ler, çevreye duyarlı sanayi üretimini teşvik eden ve organize atık yönetimi, su arıtma, enerji verimliliği gibi sürdürülebilir uygulamalar geliştiren altyapılar sunar. Bu durum, sanayinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirirken, Türkiye'nin yeşil dönüşüm hedeflerine katkı sağlar.

8.7.6.7 Altyapı ve Lojistik Avantajlar

OSB'ler, sanayi işletmelerine modern ve gelişmiş altyapı sunarak üretim maliyetlerini düşürür. Elektrik, su, doğal gaz, haberleşme ve lojistik altyapılarının hazır olduğu bu bölgelerde üreticiler, tesis kurma ve işletme süreçlerinde zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar elde eder. Ayrıca, OSB'lerin stratejik olarak limanlara, havaalanlarına ve büyük şehirlere yakın bölgelerde kurulması, ürünlerin iç ve dış pazarlara hızlı ve maliyetsiz ulaşımını sağlar.

Türkiye'de Organize Sanayi Bölgeleri, sanayinin planlı bir şekilde gelişmesini sağlayan, yatırımları teşvik eden, bölgesel kalkınmayı destekleyen ve ihracat kapasitesini artıran önemli ekonomik yapılardır. OSB'ler, Türkiye'nin sanayi üretiminde verimliliği artırırken, sürdürülebilir büyüme ve çevreye duyarlı üretim süreçleriyle ülkenin kalkınma hedeflerine önemli katkılar sağlar. Hem yerli hem de yabancı yatırımcılar için cazip bölgeler sunan OSB'ler, Türkiye'nin küresel ticaret ve sanayi ağında rekabet gücünü artırmakta kritik bir rol oynamaktadır.

8.8 Yeşil Dönüşüm Nedir?

Yeşil Dönüşüm, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyümeyi bir arada ele alan bir kavramdır. Amacı, doğal kaynakları koruyarak ve çevreye zarar vermeden ekonomik faaliyetleri sürdürebilmektir. Bu dönüşüm, karbon salınımını azaltma, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanma, atıkları azaltma ve geri dönüşüm gibi çevre dostu uygulamaları teşvik eder. Yeşil Dönüşüm, sanayi, tarım, ulaşım ve enerji sektörlerinde geleneksel yöntemlerin yerini daha sürdürülebilir, düşük karbonlu teknolojilerle değiştirerek ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmeyi hedefler.

Bu süreç, iklim değişikliği ile mücadele etmeyi ve ekonomiyi çevreye duyarlı bir şekilde dönüştürmeyi amaçlayan küresel bir hareket olarak da tanımlanabilir.

8.9 Küresel Bağlam: İklim Krizi ve Sürdürülebilirlik

İklim Krizi ve Sürdürülebilirlik küresel düzeyde birbiriyle yakından bağlantılı iki önemli kavramdır.

İklim Krizi:

İklim krizi, insan faaliyetlerinin sonucu olarak atmosfere yayılan sera gazlarının neden olduğu küresel ısınmanın ve bununla bağlantılı çevresel bozulmaların acil ve ciddi bir tehdit haline gelmesi durumunu tanımlar. Küresel sıcaklıkların artışı, buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, aşırı hava olaylarının (kasırgalar, seller, kuraklıklar) artışı ve ekosistemlerin tahrip olması gibi sonuçları içeren iklim krizi, biyolojik çeşitlilik kaybı, tarımsal verimlilikte düşüş ve toplumsal eşitsizliklerin derinleşmesi gibi geniş kapsamlı etkilere sahiptir. Bilim insanları, sıcaklık artışının 1,5°C ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmekte, aksi takdirde geri dönülemez çevresel hasarların yaşanacağı konusunda uyarılar yapmaktadır.

Sürdürülebilirlik:

Sürdürülebilirlik, bugünkü kaynakları tüketirken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneğine zarar vermeden ekonomik, sosyal ve çevresel dengeleri korumayı amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu kavram, doğa ile uyum içinde yaşanabilecek bir geleceğin inşası için doğal kaynakların sorumlu kullanılması gerektiğini vurgular. Sürdürülebilirlik üç ana boyuttan oluşur:

1. **Çevresel Sürdürülebilirlik:** Doğal kaynakların korunması, ekosistemlerin bozulmasının engellenmesi ve biyolojik çeşitliliğin devam ettirilmesi.
2. **Ekonomik Sürdürülebilirlik:** Uzun vadede ekonomik büyümenin sağlanırken kaynakların verimli ve eşit bir şekilde kullanılması.
3. **Sosyal Sürdürülebilirlik:** Toplumsal refahı artıran, eşitsizlikleri azaltan ve insanların temel ihtiyaçlarını karşılayan adil bir sistem oluşturulması.

Küresel bağlamda, iklim krizi sürdürülebilir kalkınma hedeflerini doğrudan tehdit etmektedir. Bu yüzden, ülkeler arası iş birliği ve uzun vadeli stratejilerle iklim değişikliğiyle mücadele, yeşil enerjiye geçiş, kaynakların verimli kullanımı ve daha az atık üreten bir ekonomi yaratma, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında temel unsurlar olarak kabul edilmektedir.

8.10 Türkiye’de Sürdürülebilirlik ve Yeşil Dönüşüm Gündemi

Türkiye’de Sürdürülebilirlik ve Yeşil Dönüşüm Gündemi, ülkenin iklim değişikliğiyle mücadele, doğal kaynakların korunması, sürdürülebilir ekonomik büyüme ve çevre dostu teknolojilere geçiş hedeflerini kapsayan politikalar ve uygulamalar dizisidir. Türkiye, bu bağlamda küresel sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlama ve yeşil ekonomiye geçişi hızlandırma amacıyla önemli adımlar atmaktadır.

8.10.1 İklim Değişikliği ile Mücadele

Türkiye, iklim kriziyle mücadelede 2015 Paris İklim Anlaşması'nı 2021 yılında onaylayarak 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefini benimsemiştir. Bu kapsamda karbon salınımını azaltmak için enerji, ulaşım, tarım ve sanayi gibi farklı sektörlerde çeşitli yeşil dönüşüm uygulamaları devreye sokulmaktadır.

8.10.2 Yenilenebilir Enerji ve Temiz Teknolojiler

Türkiye'nin enerji politikalarının temelinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması yer almaktadır. Türkiye, son yıllarda rüzgar, güneş, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük yatırımlar yapmıştır. Bu, hem enerji arz güvenliğini sağlama hem de karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca enerji verimliliği çalışmaları da bu sürecin önemli bir parçasıdır.

8.10.3 Sıfır Atık Projesi

Cumhurbaşkanı Erdoğan'ın eşi Emine Erdoğan'ın öncülüğünde başlatılan Sıfır Atık Projesi, Türkiye'de atık yönetimi konusunda önemli bir sürdürülebilirlik adımıdır. Proje, atıkların kaynağında ayrıştırılması, geri dönüşüm oranlarının artırılması ve çevresel kirliliğin azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu proje, Türkiye'nin döngüsel ekonomiye geçiş sürecini hızlandırma açısından önemli bir adımdır.

8.10.4 Yeşil Mutabakat ve Yeşil Ekonomi

Avrupa Birliği'nin 2019'da başlattığı Avrupa Yeşil Mutabakatı (Green Deal), Türkiye'yi de doğrudan etkileyen önemli bir gelişmedir. Türkiye, Avrupa Birliği ile yoğun ticaret yapan bir ülke olarak, bu yeni yeşil ekonomi düzenine uyum sağlamak zorundadır. Bu bağlamda Türkiye, Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planını hayata geçirmiştir. Eylem planı, ihracat yapan Türk şirketlerinin karbon ayak izini azaltması, sanayide yeşil dönüşümün hızlandırılması ve yeşil finansman modellerinin teşvik edilmesini kapsamaktadır.

8.10.5 Enerji Kullanımı ve Emisyonlar

Organize Sanayi Bölgeleri (OSB), yoğun sanayi üretimi nedeniyle enerji tüketiminin yüksek olduğu yerlerdir. Bu nedenle enerji kullanımı ve emisyonların kontrolü, OSB'lerin çevresel sürdürülebilirliği sağlama konusunda en önemli unsurlarından biridir. Türkiye'de OSB'lerde enerji verimliliği ve düşük karbon salınımı konuları giderek daha fazla önem kazanmakta, bu doğrultuda çeşitli uygulamalar hayata geçirilmektedir.

8.11 OSB'lerde Enerji Kullanımı

8.11.1 Yoğun Enerji Tüketimi

OSB'ler, yüksek enerji talebine sahip sanayi kuruluşlarını barındırdığı için büyük miktarda enerji tüketirler. Bu enerji, elektrik, doğalgaz, kömür ve diğer fosil yakıtlardan sağlanır. Özellikle enerji-yoğun sektörler (demir-çelik, çimento, kimya gibi) OSB'lerde yaygın olduğu için enerji kullanımı oldukça yüksektir.

8.11.2 Yenilenebilir Enerji Kullanımı

Son yıllarda, OSB'lerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmektedir. Rüzgar, güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, OSB'lerin enerji tüketiminde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Bazı OSB'ler, kendi enerji ihtiyaçlarını güneş panelleri ve rüzgar türbinleri ile karşılamaya yönelik projeler geliştirmektedir. Bu sayede, hem enerji maliyetleri düşürülmekte hem de karbon ayak izi azaltılmaktadır.

8.11.3 Enerji Verimliliği Projeleri

Enerji verimliliği, OSB'lerin enerji kullanımını optimize etmeleri ve kaynakların israfını önlemeleri açısından kritik bir konudur. Türkiye'deki birçok OSB, enerji verimliliği projelerini hayata geçirmiştir. Bu projeler kapsamında enerji izleme ve yönetim sistemleri kurulmakta, enerji yoğun proseslerde optimizasyon yapılmakta ve atık enerjinin geri kazanımı sağlanmaktadır. Enerji verimliliği hem çevre dostu üretimi destekler hem de sanayicilere maliyet avantajı sunar.

8.11.4 Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemleri

Bazı OSB'ler, enerji üretiminde verimliliği artırmak için **kojenerasyon** (birleşik ısı ve elektrik üretimi) ve **trijenerasyon** (elektrik, ısı ve soğutma üretimi) sistemlerini kullanmaktadır. Bu sistemler, tek bir enerji kaynağından birden fazla enerji türü üreterek enerji kaybını minimuma indirir ve sanayicilere daha düşük maliyetle enerji sağlar.

8.12 Organize Sanayi Bölgelerinde Yeşil Dönüşüm

8.12.1 Giriş

Sanayi üretimi, ekonomik büyüme ve istihdam açısından kritik bir rol oynarken, çevresel etkileri de büyümektedir. Türkiye'de OSB'ler, enerji tüketimi, karbon salınımı ve atık yönetimi açısından stratejik öneme sahiptir. Yeşil dönüşüm, bu bölgelerde çevresel etkilerin azaltılması, enerji ve kaynak verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir üretimin sağlanması amacıyla yürütülen sistematik bir süreçtir.

8.12.2 Yeşil Dönüşüm Kavramı ve Küresel Perspektif

8.12.2.1 Kavramsal Tanım

- Sanayi süreçlerinde enerji, su ve atık yönetiminin optimize edilmesi
- İnovasyon ve dijitalleşme ile düşük karbonlu üretim
- Çevresel etkilerin sürekli izlenmesi ve iyileştirilmesi

8.12.2.2 Küresel Trendler

- **Avrupa Birliği:** Yeşil Mutabakat ve karbon nötr OSB'ler
- **Çin:** Pilot yeşil OSB projeleri, enerji ve su verimliliği
- **ABD:** Akıllı OSB'ler ve çevre sertifikalı sanayi parkları

8.12.2.3 Türkiye’de OSB’lerde Yeşil Dönüşüm Mevzuatı ve Politikalar

8.12.2.3.4 Ulusal Mevzuat

- Çevre Kanunu (2872)
- Enerji Verimliliği Kanunu (5627)
- Yeşil OSB Yönetmeliği

8.12.2.3.5 Teşvik ve Destekler

- KOSGEB ve TÜBİTAK destekleri
- AB Yeşil Mutabakat hibeleri
- Çevre yatırımlarına vergi avantajları

8.12.3 Devlet Stratejileri

- 2023-2030 Türkiye Enerji Verimliliği Stratejisi
- Karbon nötr OSB hedefi
- Sıfır atık uygulamalarının yaygınlaştırılması

8.12.4 Yeşil Dönüşüm Uygulamaları OSB’lerde

8.12.4.1 Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji

- Güneş ve rüzgar enerjisi santralleri
- Biyogaz ve atık ısı geri kazanım sistemleri
- LED aydınlatma ve enerji tasarruflu ekipman
- Akıllı enerji yönetim sistemleri

8.12.4.2 Atık Yönetimi ve Su Kullanımı

- Atık su arıtma ve ileri arıtma tesisleri
- Endüstriyel atık geri dönüşümü
- Yağmur suyu toplama ve yeniden kullanım
- Sıfır atık politikaları

8.12.4.3 Çevre Dostu Altyapı ve Binalar

- Yeşil bina sertifikaları (LEED, BREEAM)
- Karbon tutucu peyzaj ve yeşil alanlar
- Elektrikli araç altyapısı
- Sürdürülebilir malzeme kullanımı

8.12.4.4 4Dijitalleşme ve Akıllı OSB Uygulamaları

- Endüstri 4.0 ile enerji ve üretim optimizasyonu
- IoT sensörleri ile çevresel performans ölçümü
- Veri odaklı yönetim ve raporlama

8.12.5 Türkiye’de Örnek Yeşil OSB Projeleri

OSB	Örnek Uygulamalar	Başarılar
Gebze OSB	Güneş enerjisi santrali, ileri arıtma tesisi	Karbon ayak izinde %20 azalma
TOSB	Enerji verimliliği projeleri, geri dönüşüm	Atık su %100 geri kazanımı
İzmir Kemalpaşa OSB	Sıfır atık programları, yeşil binalar	Su ve enerji maliyetlerinde düşüş
Bursa Nilüfer OSB	Akıllı enerji yönetim sistemi	Enerji tüketiminde %15 tasarruf

8.12.6 Ekonomik ve Sosyal Etkiler

- **Ekonomik:** Enerji ve hammadde maliyetlerinde azalma, rekabet gücü artışı
- **Çevresel:** Karbon salınımı ve atık yönetiminde iyileşme
- **Sosyal:** Çalışan sağlığı ve toplum yaşam kalitesi

8.12.7 Karşılaşılan Zorluklar

- Yatırım maliyetlerinin yüksekliği
- KOBİ’lerin adaptasyon kapasitesi sınırlı
- Mevzuat ve denetim uyumsuzlukları
- Bilgi ve insan kaynağı eksikliği

8.12.8 Gelecek Perspektifi ve Öneriler

- Teşvik ve hibelerin artırılması
- Dijitalleşme ve akıllı enerji yönetimi yaygınlaştırılmalı
- Firmalar arası işbirliği desteklenmeli
- Küresel çevre sertifikasyonları uygulanmalı



8.12.9 Sonuç

Yeşil dönüşüm, çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar sağlayarak Türkiye’de OSB’lerin sürdürülebilir sanayi hedeflerine ulaşmasını ve uluslararası rekabet gücünü artırmasını sağlayacaktır.



9. İletişim, Farkındalık Ve Toplumsal Etki

9.1 Dijital Farkındalık Kampanyaları ve İklim Okuryazarlığı

İklim değişikliği, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda toplumsal ve ekonomik boyutlarıyla tüm dünyayı etkileyen küresel bir krizdir. Bu nedenle toplumun geniş kesimlerinin farkındalık düzeyinin artırılması kritik önemdedir. Günümüzde dijital teknolojiler, bu farkındalığı güçlendirmek ve bireyleri harekete geçirmek için en etkili araçlar arasında yer almaktadır. Dijital dönüşüm, yalnızca iş süreçlerini dönüştürmekle kalmamakta; bilgiye erişim, eleştirel değerlendirme ve güvenli paylaşım becerilerini kapsayan dijital okuryazarlık ile doğrudan ilişkilidir.

İklim okuryazarlığı ise çevreyi anlamak, çevresel sorunların neden-sonuç ilişkilerini kavrayabilmek ve çözüm odaklı davranışlar geliştirmek için bireylere gerekli bilgi ve becerileri kazandırmaktadır.

Bu bağlamda, iklim bilincini artırmaya yönelik dijital farkındalık kampanyaları, yalnızca bilgi aktarmayı değil, toplumun farklı kesimlerinin sürece aktif katılımını da hedeflemektedir. Oyunlaştırma, yapay zeka destekli kişiselleştirilmiş bilgi akışı ve sosyal medya tabanlı etkileşim mekanizmaları, bireylerin konuya ilgisini artırmakta ve davranış değişikliğini teşvik etmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı sürecinde de görüldüğü üzere, dijitalleşme ve yeşil dönüşüm birlikte ele alınmakta; yapay zeka uygulamaları hem sürdürülebilir pazarlama hem de toplumsal farkındalık açısından dönüştürücü bir rol oynamaktadır.

Raporun bu bölümü, toplumun farklı kesimlerine yönelik özelleştirilmiş iletişim stratejilerinin önemini vurgulamaktadır. Gençlerden kırılgan gruplara, özel sektörden politika yapıcılara kadar her kesimin ihtiyacına uygun yaklaşımlar geliştirilmesi, iklim krizi ile mücadelede kolektif bilinci güçlendirecek ve sürdürülebilir bir gelecek için gerekli toplumsal zemini oluşturacaktır.

9.1.1 Hedef Kitleye Yönelik Özelleştirilmiş Stratejiler

İklim değişikliği ile mücadele, sadece bilimsel bir mesele olmaktan öte, toplumun tüm kesimlerinin sürece aktif olarak dahil edilmesini gerektiren çok boyutlu bir konudur. Bu çerçevede, genel ve tek tip iletişim mesajları yerine, belirli hedef kitlelerin sosyo-kültürel yapısını, bilgi düzeyini ve motivasyon kaynaklarını dikkate alan özelleştirilmiş stratejiler geliştirmek büyük önem taşımaktadır. Etkin bir iletişim stratejisi, sadece bilgiyi aktarmakla kalmaz, aynı zamanda bireyleri ve kurumları davranış değişikliğine yönlendirerek somut eylemlerin hayata geçirilmesini sağlar. Bu bölümde, iklim değişikliği iletişiminde farklı hedef kitlelere yönelik geliştirilen stratejiler ayrıntılı bir şekilde ele alınmaktadır.

Gençler, Çocuklar ve Eğitim Kurumları

Geleceğin karar alıcıları ve iklim değişikliğinin etkilerini en uzun süre deneyimleyecek olan gruplar gençler ve çocuklardır. Bu nedenle, onların iklim okuryazarlığını artırmaya yönelik stratejiler, bu alandaki en öncelikli konular arasında yer almaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayımladığı raporlar, toplumun tüm kesimlerinin sürece dahil edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Özellikle eğitim sistemine entegre edilecek iklim bilinci eğitimleri, bu kitleye ulaşmada en temel adımdır.

Bu doğrultuda, Millî Eğitim Bakanlığı tarafından hazırlanan "*Çevre ve İklim Değişikliği Okuryazarlığı Becerileri Etkinlik Kitabı*", öğrencilerin iklim değişikliğini anlamalarını ve bu konuda harekete geçmelerini sağlamak amacıyla somut bir örnek teşkil etmektedir. Kitap, öğrencilere iklim değişikliğinin nedenleri, sonuçları ve çözüm yolları hakkında interaktif etkinliklerle bilgi vermektedir. Bu tür materyallerin yaygınlaştırılması, sadece bilgi akışını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda gençlerin problem çözme ve eleştirel düşünme becerilerini de geliştirmektedir.

Bu yaş grubuna yönelik stratejilerde, karmaşık bilimsel konuları daha ilgi çekici hale getirecek yöntemler benimsenmelidir. Bu noktada, eğlence medyası, iklim bilincini artırmak için etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bilimsel verilerin eğlence unsurlarıyla harmanlanması, gençlerin konuya karşı duyarlılığını artırabilir. Ayrıca, oyunlaştırma (gamification) mekanizmalarının kullanılması, öğrenme sürecini daha interaktif ve keyifli bir hale getirmektedir. Bu dijital araçlar, oyunlaştırma yöntemleri ve eğlence medyası gibi kanallar gençlerin ilgisini artırmak için etkili olmaktadır. Akpınar'ın (2025) vurguladığı gibi, dijital okuryazarlık yalnızca bilgiye erişim değil, bilgiyi doğru değerlendirme ve güvenli paylaşım becerilerini de kapsar. Bu becerilerin gençlerde gelişmesi, iklim bilinciyle bağlantılı davranış değişikliğini kolaylaştırmaktadır.

Kırılgan Gruplar ve Toplumsal Katılım

İklim değişikliğinin olumsuz etkileri, sosyo-ekonomik açıdan dezavantajlı ve kırılgan grupları daha fazla etkilemektedir. Bu nedenle, engelli, yaşlı, çocuk ve yoksulluk riski altındaki bireyler gibi hassasiyetleri olan kesimlerin iklim değişikliğine uyum ve dayanıklılık süreçlerine entegrasyonu büyük bir önceliktir. "*İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı*" raporunda da belirtildiği üzere, bu grupların süreçlere katılımını sağlayacak platformlar ve mekanizmalar oluşturulmalıdır.

Bu kitleye yönelik iletişimde, özellikle afet risk azaltma konuları önceliklendirilmelidir. İklim değişikliğinin neden olduğu aşırı hava olayları, sel ve kuraklık gibi risklere karşı nasıl hazırlıklı olunması gerektiğini anlatan, basit ve anlaşılır dildeki bilgilendirme materyalleri hayati önem taşımaktadır. Bu süreçte sivil toplum kuruluşları, gönüllü gruplar ve yerel yönetimlerle kurulacak işbirlikleri, bu gruplara doğrudan ulaşılmasını ve onların ihtiyaçlarına uygun çözümlerin üretilmesini sağlayacaktır.

Özel Sektör ve İş Dünyası

İklim değişikliği ile mücadele, artık sadece bir çevresel sorumluluk değil, aynı zamanda şirketlerin finansal sürdürülebilirliği ve rekabet gücü açısından da stratejik bir konudur. Özel sektöre yönelik iletişim stratejileri, şirketlerin sadece çevresel faydaları değil, aynı zamanda yeşil ekonomiye geçişin sunduğu ekonomik fırsatları da görmelerini sağlamalıdır. Sürdürülebilir yeşil pazarlama stratejileri, şirketlerin dijital dönüşümden yararlanarak hem çevresel performanslarını artırmalarına hem de pazarda farklılaşmalarına olanak tanımaktadır.

Bu alanda, yapay zeka (AI) ve büyük veri analizleri kilit bir rol oynamaktadır. AI destekli sistemler, tüketicilerin çevre duyarlılıklarını, satın alma alışkanlıklarını ve tercihlerini analiz ederek şirketlerin bu taleplere yönelik kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetler sunmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, şirketlerin çevresel hedeflere ulaşmasına yardımcı olurken aynı zamanda tüketici sadakatini ve marka itibarını güçlendirebilmektedir. Ayrıca, şirketlerin kurumsal iletişiminde şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleri ön planda tutulmalı, çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) raporlamalarının önemi vurgulanmalıdır.

Kamu Kurumları ve Politika Yapıcılar

Politika yapıcılar ve kamu kurumları, ulusal iklim politikalarının belirlenmesinde ve uygulanmasında temel aktörlerdir. Bu kitleye yönelik iletişim, bilimsel verilere, kanıtlara ve politika önerilerine odaklanan, resmi ve güvenilir bir dil kullanmalıdır. İklim Değişikliği Başkanlığı'nın ulusal ve uluslararası düzeyde politika ve stratejileri belirleme, müzakere süreçlerini yürütme ve kurumlar arası koordinasyonu sağlama sorumluluğu bu bağlamda büyük önem taşımaktadır.

Bu kitleye ulaşmak için raporlar, teknik rehberler ve çalıştaylar gibi bilimsel formatlar tercih edilmelidir. Ayrıca, sektörel işbirliklerinin geliştirilmesi ve tüm paydaşlar arasında ortak bir anlayışın oluşturulması kritiktir. Üniversiteler, araştırma merkezleri, sanayi ve sivil toplum kuruluşları gibi farklı aktörlerin karar alma süreçlerine dahil edilmesi, politikaların daha kapsayıcı ve uygulanabilir olmasını sağlamaktadır. Bir başka deyişle akademik çalışmaların ve teknik raporların politika yapıcılara ulaşması, kararların daha kapsayıcı ve uygulanabilir olmasına katkıda bulunur. Bu süreçte üniversiteler, araştırma merkezleri, özel sektör ve sivil toplum arasında kurulacak işbirlikleri ortak bir anlayış geliştirilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, iklim değişikliği ile mücadelede hedef kitleye yönelik özelleştirilmiş stratejiler, tek boyutlu bir iletişim anlayışını aşarak çok katmanlı bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Eğitim kurumlarından iş dünyasına, kırılgan gruplardan politika yapıcılara kadar farklı toplumsal kesimlerin sürece dahil edilmesi, yalnızca bilgi aktarımı değil, aynı zamanda davranış değişikliğinin sağlanması açısından kritik önemdedir. Bu bağlamda iklim okuryazarlığının

eğitim sistemine entegre edilmesi, genç kuşakların problem çözme ve eleştirel düşünme becerilerini güçlendirmekte ve uzun vadeli iklim direncinin temelini oluşturmaktadır.

Öte yandan, özel sektörün yeşil pazarlama ve dijital dönüşüm süreçlerinde sürdürülebilirlik ilkelerini benimsemesi, çevresel hedeflerin ekonomik fırsatlarla desteklenmesini mümkün kılmaktadır. Yapay zeka ve büyük veri analizleri, tüketici davranışlarını doğru değerlendirme ve çevreye duyarlı ürünler geliştirme açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu durum, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda şirketlerin marka değerinin ve rekabet gücünün artmasına da katkı sağlamaktadır.

Politika yapıcılarının ve kamu kurumlarının, bilimsel verilere dayalı stratejiler üretmesi ve tüm paydaşlarla işbirliği içinde hareket etmesi, ulusal düzeyde kapsayıcı ve uygulanabilir politikaların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Dijital okuryazarlığın yaygınlaşması ise bu sürecin tamamlayıcı unsuru olup, bireylerin bilgiye güvenilir biçimde erişmesini, bilgiyi değerlendirmesini ve doğru şekilde paylaşmasını sağlamaktadır.

Kısacası, iklim değişikliği ile mücadele, yalnızca teknik çözümler değil, aynı zamanda güçlü bir toplumsal farkındalık ve iletişim altyapısı gerektirmektedir. Özelleştirilmiş stratejiler dijital teknolojilerle birleştiğinde, toplumun kolektif bilincini yükseltmekte ve ortak hareket kapasitesini güçlendirmektedir. Bu durum, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında vazgeçilmez bir unsurdur.

9.1.2 Oyunlaştırma (Gamification) ve İklim Okuryazarlığı

Oyunlaştırma, oyunlara özgü düşünme biçimlerinin ve mekaniklerinin oyun dışı alanlara uyarlanmasıdır. Bu yaklaşım, kullanıcı motivasyonunu ve katılımını artırmayı hedefler. Puan kazanma, rozet toplama, seviye atlama veya liderlik tablolarında yükselme gibi ödül mekanizmaları, katılımcıları yalnızca pasif bilgi tüketicisi olmaktan çıkarıp aktif öğrenme ve eyleme yönlendirir. Bu nedenle oyunlaştırma, eğitimden pazarlamaya birçok alanda ilgi görmektedir.

İklim okuryazarlığı bağlamında oyunlaştırma, soyut ve karmaşık iklim verilerini daha anlaşılır, etkileşimli ve ilgi çekici hale getirmektedir. Geleneksel eğitim yöntemlerinden farklı olarak bireyleri aktif katılıma teşvik eden bu yaklaşım, küçük adımlarla başlayan davranış değişikliklerini uzun vadede sürdürülebilir alışkanlıklara dönüştürebilmektedir. Millî Eğitim Bakanlığı'nın hazırladığı Çevre ve İklim Değişikliği Okuryazarlığı Etkinlik Kitabı, öğrencilerin iklim değişikliği konularını interaktif etkinliklerle öğrenmesini sağlayarak bu sürece somut bir örnek sunmaktadır.

Oyunlaştırma uygulamaları farklı amaçlara hizmet edecek şekilde tasarlanabilir. Örneğin, bireylerin kendi karbon ayak izlerini hesaplamaları, enerji tasarrufu alışkanlıkları geliştirmeleri veya yerel çevre projelerine katılım

göstermeleri oyunlaştırılmış dijital platformlarla teşvik edilmektedir. Bu platformlar, kullanıcıların iklim değişikliğiyle mücadeledeki rollerini somutlaştırırken, aynı zamanda başarı hissi vererek motivasyonlarını artırmaktadır.

Dijital dönüşüm ve yapay zeka destekli kişiselleştirilmiş içerikler, oyunlaştırmayı daha da etkili kılmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı sürecinde de görüldüğü üzere, dijital sürdürülebilirlik stratejilerinde oyunlaştırma, bireylerin çevresel tercihlerine doğrudan etki edebilecek yenilikçi bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu tür uygulamalar yalnızca iklim bilincini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bireylerin dijital okuryazarlık becerilerini de geliştirmektedir. Kullanıcılar, oyunlaştırılmış platformlar aracılığıyla bilgiyi doğru değerlendirmeyi ve teknolojiyi sorumlu biçimde kullanmayı öğrenmektedir.

Somut Örnekler:

- Avrupa Birliği tarafından desteklenen "*Climate Challenge*" gibi dijital oyunlarda, oyuncular günlük yaşamda karbon salımlarını azaltmaya yönelik kararlar alarak farkındalık kazanmaktadır.
- Türkiye’de ise MEB etkinlik kitapları ve yerel yönetimlerce geliştirilen mobil uygulamalar, geri dönüşüm ve enerji tasarrufu gibi konuları öğrenciler için daha cazip hale getirmektedir.
- Dünya genelinde popülerleşen "*Eco*" ve "*Fate of the World*" gibi oyunlar, küresel ısınma senaryolarını simüle ederek oyunculara politika yapıcı rolü üstlenme imkânı sunmaktadır.

Sonuç olarak, oyunlaştırma iklim okuryazarlığını yalnızca bilgi aktarımına dayalı bir süreç olmaktan çıkarıp, katılımcıların deneyimle öğrenmesini sağlayan güçlü bir yöntemdir. Bu stratejiler, bireylerde çevreye duyarlı davranışların gelişmesini kolaylaştırmakta ve toplumsal düzeyde iklim bilincinin yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır.

9.1.3 Yapay Zeka Destekli Kişiselleştirilmiş İklim Bilgisi

Yapay zeka (YZ), büyük veri analizleri ve makine öğrenmesi yöntemleri aracılığıyla bireylerin ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş içerikler üretebilme kapasitesine sahiptir. Kişiselleştirilmiş bilgi akışı, kullanıcının davranışlarını, tercihlerini ve ihtiyaçlarını dikkate alarak, genel mesajlar yerine hedefe yönelik çözümler sunar. Bu durum, yalnızca bilgilendirme süreçlerini değil, aynı zamanda davranış değişikliğini de desteklemektedir.

İklim okuryazarlığı bağlamında yapay zeka, bireylerin çevresel farkındalık düzeylerine ve günlük alışkanlıklarına göre uyarlanmış bilgilendirme ve yönlendirme mekanizmaları geliştirmektedir. Örneğin, kullanıcıların karbon ayak izini ölçen ve buna göre enerji tasarrufu önerileri sunan mobil uygulamalar, kişiselleştirilmiş iklim bilgisine somut bir örnektir. Bu tür sistemler, yalnızca genel farkındalık yaratmakla kalmaz; kullanıcıya özel, uygulanabilir önerilerle doğrudan davranış değişikliğini teşvik eder.

Aydın, Nalbant ve Altuntaş’ın (2023) çalışmasında vurgulandığı üzere, yapay zeka tabanlı sürdürülebilir pazarlama ve iletişim stratejileri, tüketici davranışlarını analiz ederek çevreye duyarlı ürün ve hizmetlerin geliştirilmesine katkı

sağlamaktadır. Benzer şekilde, eğitim alanında kullanılan dijital araçlar, öğrencilerin öğrenme hızına ve ilgi alanlarına göre kişiselleştirilmiş içerikler sunarak iklim değişikliği konularında daha derin bir kavrayış geliştirmelerine imkân tanımaktadır.

Dijital dönüşümün bir parçası olarak yapay zeka, yalnızca bilgi aktarımını değil, aynı zamanda bireylerin teknoloji kullanım becerilerini ve dijital okuryazarlık düzeylerini de geliştirmektedir. Akpınar'ın (2025) belirttiği gibi, dijital okuryazarlık, bilgiye erişim kadar, bilgiyi eleştirel değerlendirme ve güvenilir biçimde paylaşma becerisini de kapsamaktadır. Bu bağlamda, yapay zeka destekli iklim bilgisi bireylerin yalnızca tüketici değil, aynı zamanda bilinçli karar verici olarak sürece katılımını kolaylaştırmaktadır.

Örneğin, Avrupa Birliği'nin Horizon projelerinde geliştirilen AI4Climate platformları, kullanıcıların enerji tüketim alışkanlıklarını analiz ederek kişiye özel tasarruf önerileri sunmaktadır. Benzer şekilde Türkiye'de geliştirilen mobil uygulamalar, bireylerin günlük su ve elektrik kullanım verilerini takip ederek çevreye duyarlı alışkanlıklar kazandırmayı amaçlamaktadır. Eğitim alanında kullanılan yapay zeka tabanlı öğrenme sistemleri ise öğrencilerin kavrama düzeyine uygun iklim değişikliği içerikleri sağlayarak öğrenme sürecini kişiselleştirmekte ve bu alanda etkileşimli bir öğrenme deneyimi sunmaktadır.

Sonuçta, yapay zeka destekli kişiselleştirilmiş iklim bilgisi, bireysel farkındalığı artırmanın yanı sıra, toplumsal ölçekte sürdürülebilir davranışların gelişmesini teşvik etmektedir. Bu yaklaşım, hem bireylerin günlük yaşamlarına uygulanabilir çözümler sunmakta hem de iklim değişikliğiyle mücadelede kolektif bilinci güçlendirmektedir.

9.2 Sanal İletişim Araçlarının Karbon Ayak İzi Üzerindeki Etkisi

Gelişen dijital iletişim araçları, fiziksel kaynak tüketimini azaltma potansiyeli taşıırken, aslında internet altyapısının enerji yoğun yapısı nedeniyle önemli bir karbon etkisi de yaratmaktadır. Veri merkezlerine, telekomünikasyon ağlarına ve kullanıcı cihazlarına enerji sağlanması, internetin küresel karbon salınımında ciddi bir payı olduğunu göstermektedir. Örneğin dünya genelinde internet, yıllık toplam elektrik tüketiminin önemli bir bölümünü kullanmakta ve küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %2'sinden sorumludur. Bu nedenle sanal iletişim araçlarının yaygınlaşması, karbon ayak izini azaltmak için fırsatlarla birlikte dikkatli stratejiler gerektirmektedir.

9.2.1 İletişimde Karbon Ayak İzini Azaltma Stratejileri

İçerik oluşturuculardan teknoloji yöneticilerine kadar dijital platform sahiplerinin karbon emisyonunu azaltmak için atabilecekleri somut adımlar vardır. Web sitelerinin karbon salınımını ölçmek, sürdürülebilirlik stratejilerinin ilk safhasıdır. "WebsiteCarbon.com" gibi araçlar, sayfa görüntüleme başına ne kadar CO₂ yayıldığını, yıllık ne kadar enerji tüketildiğini ve sitenin yenilenebilir enerji kullanan sunucularda barındırılıp barındırılmadığını gösterir. Ayrıca, sayfa ağırlığını düşürmek — örneğin görselleri sıkıştırmak, oyun video otomatik oynamayı kaldırmak,

gereksiz üçüncü parti kodlardan kaçınmak — hem kullanıcı deneyimini iyileştirir hem de enerji tüketimini ve dolayısıyla karbon ayak izini önemli ölçüde azaltır.

Dijital içeriğin optimize edilmesi, karbon ayak izini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Sayfa ağırlığının düşürülmesi, yani görsellerin sıkıştırılması, video ve animasyonların otomatik oynatılmasının kaldırılması gibi adımlar, hem kullanıcı deneyimini iyileştirir hem de veri transferini ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Wholegrain Digital gibi öncü firmaların da belirttiği gibi, arama motoru optimizasyonu (SEO) ve sade, amaca yönelik içerik sunumu, kullanıcıların aradıkları bilgiye daha az sayfada ulaşmasını sağlayarak veri tüketimini düşürmektedir. Ayrıca, daha az görsel ve sade metin kullanımı, sayfa yükleme sürelerini kısaltarak enerji verimliliğini artırır. Kodu sadeleştirmek, gereksiz JavaScript kullanımını minimumda tutmak ve PWA (Progressive Web Apps) gibi daha verimli teknolojileri tercih etmek, sürdürülebilir dijital yayıncılığın temelini oluşturur.

9.2.2 Uzaktan Çalışma ve Etkinliklerin Etkisi

Uzaktan çalışma ve sanal etkinlikler, fiziksel ulaşım ihtiyacını azaltarak karbon tasarrufu potansiyelini artırır. Ancak, bu dijital faaliyetler veri merkezlerine ve ağ altyapısına ek yük getirir. Dolayısıyla, uzaktan etkinliklerin karbon avantajını maksimize etmek için, kullanılan platformların enerji verimliliğine dikkat etmek gerekir. Önceki başlıklarda söz edilen internet enerji tüketimi örnekleri burada da geçerlidir. Sanal konferans platformlarının verimli kodlama, gerektiğinde sadece gerekli görselleri sunma, veri yükünü optimize etme gibi stratejileri uygulaması önemlidir. Ayrıca, katılımcı topluluğunun trafik verilerini analiz ederek gereksiz veri akışları engellenebilir ve enerji tüketimi sınırlandırılabilir.

9.2.3 Yeşil Bilişim Uygulamaları

Yeşil bilişim, dijital sistemlerde enerji verimliliğini temel alan bir yaklaşımdır. Dijital karbon ayak izini azaltmak için yapılan öneriler arasında, haber siteleri gibi içerik platformlarının yeşil hosting (*green web hosting*) sağlayan sunuculara geçmesi yer alır. Green Web Foundation gibi platformlardan mevcut sitenin yeşil barındırma kullanıp kullanmadığı öğrenilebilir. Diğer pratik öneriler arasında gereksiz e-posta gönderiminin azaltılması (örneğin okunmayan abonelik e-postalarının silinmesiyle büyük miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtiliyor), görsel kullanımının dikkatli seçilmesi, bir web sayfasındaki içerik ve veri yükünün optimize edilmesi gibi adımlar bulunmaktadır. Bu yöntemler hem bireysel kullanıcılara hem de kurumlara yönelik, somut uygulanabilir stratejiler sunar.

Sanal iletişim araçlarının karbon ayak izi, görünmez ama önemli bir etkidir. Ancak doğru stratejiler (veri ve içerik optimizasyonu, yeşil barındırma kullanımının yaygınlaşması, enerji verimliliğini esas alan kodlama ve tasarım,

gereksiz dijital atıkların azaltılması) ile bu etki önemli ölçüde azaltılabilir. Uzaktan çalışma ve sanal etkinliklerin avantajını sürdürmek için dijital altyapının sürdürülebilirliği de eş zamanlı olarak ele alınmalıdır.

9.3 Sosyal Etki Ölçümlemede Dijitalleşmenin Kullanımı

Dijitalleşme, sosyal etkiyi ölçme ve yönetme süreçlerini hızlandıran, maliyetleri düşüren ve şeffaflığı artıran bir kalıdır. Veri odaklı karar alma, kurumsal kapasiteyi güçlendirir; paydaş katılımını ve hesap verebilirliği destekler. Dijital dönüşümün toplumsal dönüşüme yansması, yeni ölçüm yetkinlikleri ve analitik araçlarla görünür hale gelir. Bu yönüyle dijitalleşme, sadece verimlilik artışı değil, aynı zamanda kurumların toplumsal değer üretimini kanıtlayabilmesi için bir gerekliliktir.

9.3.1 İklim Eylemlerinin Toplumsal Faydalarının Analizi

İklim eylemlerinin toplumsal faydalarını analiz etmek, projelerin sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyal getirilerini de anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu analizler, genellikle maliyet-fayda (CBA), maliyet-etkililik (CEA) ve çok ölçütlü karar analizi (MCDA)¹⁷⁹ gibi bilimsel yöntemlerle yürütülür. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) bu yöntemleri kullanarak, iklim politikalarının fayda-maliyet dengesi, veri ihtiyaçları ve belirsizlik yönetimi için yol haritaları sunmaktadır. Bu analizler, "hiçbir şey yapmama" senaryosuna karşı iklim eylemlerinin sağladığı kazanımları somutlaştırır.

Özellikle sağlık faydaları, bu ölçümlerin önemli bir bileşenidir. Temiz hava, aktif ulaşım ve sağlıklı beslenme gibi unsurlar, iklim eylemleriyle eş zamanlı olarak desteklenir. Güncel araştırmalar, iklim eylemlerinin sağlık eşitsizliklerini azaltma potansiyeline dikkat çekmekte ve bu eylemlerin adalet merceğiyle tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, sosyal etki göstergelerine sağlık çıktıları ve eşitlik göstergelerinin dahil edilmesi, analizin bütüncüllüğünü artırmaktadır. Dijital sistemler, bu verilerin toplanması ve analiz edilmesini kolaylaştırarak, etkilerin daha hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

9.3.2 Blokzincir ile Sosyal Etki Takibi

Blokzincir teknolojisi, sosyal etki ölçümüne değiştirilemez kayıt (*immutability*), izlenebilirlik (*traceability*) ve akıllı sözleşmelerle güvenilir ve şeffaf bir katman eklemektedir. Bu özellikler, özellikle fon akışlarının ve hibe

¹⁷⁹ *Maliyet-Fayda Analizi (CBA)*: Bir projenin veya politikanın hem maliyetlerini hem de faydalarını parasal değerler üzerinden karşılaştırarak en iyi kararı vermeyi amaçlayan yöntemdir. *Maliyet-Etkililik Analizi (CEA)*: Belirlenen bir hedefe ulaşmak için en düşük maliyetle en iyi sonucu hangi projenin veya eylemin sağlayacağını belirlemeyi amaçlayan yöntemdir. Faydalar parasal olarak ölçülmez, fiziksel birimlerle (örneğin, azalan emisyon miktarı) ifade edilir. *Çok Ölçütlü Karar Analizi (MCDA)*: Bir projenin değerlendirilmesi sırasında sadece ekonomik faktörleri değil, sosyal ve çevresel gibi birden fazla ölçütü aynı anda dikkate alan bir karar verme aracıdır.

ödemelerinin uçtan uca takip edilmesini sağlayarak, bağış ve yardım süreçlerinde güven tesis eder. İnsani yardım ve kalkınma alanındaki uygulamalar, blokzincirin bu süreçlerdeki şeffaflığı ve verimliliği artırdığını göstermektedir. Bu sayede, saha verileri (örneğin sensörlerden gelen enerji veya atık verileri) güvenilir bir şekilde zaman damgalanabilir ve doğrulama süreçleri kolaylaşır.

Güncel sektör analizleri, blokzincirin sosyal etki projeleri için bir "altyapı teknolojisi" olarak olgunlaştığını belirtmektedir. Bu durum, etki ölçümünde zincir üstü (on-chain) metriklerin ve bağımsız doğrulamaların daha erişilebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Akıllı sözleşmelerle performansa dayalı ödeme mekanizmaları oluşturulabilir; örneğin, doğrulanmış bir emisyon azaltımı başına ödeme yapılabilir. Bununla birlikte, veri gizliliği ve ölçeklenebilirlik gibi risklerin her projede ayrı ayrı yönetilmesi gerekmektedir.

9.3.3 STK'lar ile İşbirliği Modelleri

Sivil Toplum Kuruluşları (STK), dijital sosyal etki ölçümünde veri üretimi, yerel doğrulama ve paydaş katılımının merkezinde yer alır. Kurumlar ile STK'lar arasındaki işbirlikleri, dijital dönüşümün ve yetkinlik gelişiminin sağladığı olanaklarla yeni bir boyut kazanmaktadır. Bu işbirlikleri şu eksenlerde gelişmektedir:

Veri Ortaklığı ve Kapasite Geliştirme: STK'ların saha verilerini standart formatlarda (açık veri, API) toplaması ve bu verilerin kurumların analitik kapasitesiyle birleştirilmesi, etkilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlar.

Ortak Değerlendirme ve Politika Geri Beslemesi: STK'ların sağladığı yerel bilgiler, iklim eylemlerinin etkisini değerlendiren bilimsel çerçeveleri (CBA/CEA/MCDA) zenginleştirir. Bu sayede karar vericiler için "eylem yapılmazsa ortaya çıkacak maliyetler" daha görünür hale gelir.

Şeffaf Finansman ve Güven Tesis Etme: Blokzincir gibi teknolojiler, bağışların ve hibe akışlarının şeffaf bir şekilde izlenmesine olanak tanır. Bu model, kamuoyuna açık panolar aracılığıyla projenin etkisini ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Dijitalleşme, veri kalitesi, hız ve hesap verebilirlik alanlarında sağladığı iyileşmelerle iklim eylemlerinin toplumsal etkisini görünür kılmaktadır. Toplumun tüm paydaşları arasındaki güvenilir ve ölçüme dayalı işbirlikleri, sosyal etkinin sadece bir "hikaye anlatımı" olmaktan çıkıp, doğrulanabilir göstergelerle yönetilen somut bir değere dönüşmesini sağlamaktadır.

9.4 Kırılgan Grupların Dijital Çözümlerle İklim Dirençliliğine Entegrasyonu

Kırılgan topluluklar—yaşlılar, düşük gelirli bireyler, engelliler ve kırsal alan sakinleri gibi—iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı daha savunmasızdır. Dijital teknolojiler aracılığıyla geliştirilen çözümler, bu grupların iklim değişikliğine karşı direncini artırmak için hayati bir önem taşır.

9.4.1 Kapsayıcı Dijital İklim Çözümleri

Dijital dönüşümün toplumsal kapsayıcılığı desteklemesi, sağlanan teknolojilerin erişilebilir ve adil biçimde yayılmasıyla mümkündür. Pandemi sürecinde dijital eğitim, sağlık danışmanlığı ve kamu hizmetlerinin uzaktan erişime açılması, kapsayıcı dijital yönetişimin etkinliklerini göstermiştir. TOBB ETÜ'nün "Pandemiye Dijital Yönetim İttifakı" yaklaşımı, kriz anlarında devlet ve toplum arasında köprü kurarak kırılgan gruplara erişimde önemli bir model sunmaktadır.

OECD de bu bağlamda dijital ve çevreci dönüşümün bir arada planlanması gerektiğini vurgular. Buna göre teknoloji, sadece verimlilik değil, toplumun en savunmasız kesimlerine yönelik kapsayıcılıkla birlikte bir anlam kazanmaktadır. Bu yaklaşım, dijital stratejilerin insan merkezli ve adalet temelli olması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

9.4.2 Afet Yönetimi ve Dijitalleşme

İklim krizinin tetiklediği aşırı hava olayları, afet yönetiminde dijitalleşmeyi kaçınılmaz kılmaktadır. Dijital ikiz teknolojileri (digital twins)¹⁸⁰, afet senaryolarını önceden simüle ederek müdahale süreçlerinin planlanmasını ve ölçülmesini mümkün kılar. Afet anında gerçek zamanlı bilgilerin dijital platformlar aracılığıyla paylaşılması, kurtarma ve lojistik süreçlerinin hızlandırılmasına yardımcı olur. Dünya Bankası raporları da dijital altyapının iklim direncini artırmadaki rolünü vurgular. İletişim sistemlerinin sel ve şiddetli fırtına gibi iklim etkilerine karşı dayanıklı tasarlanması, kritik hizmetlerin kesintisiz sunulmasını sağlayarak kırılgan grupların kriz zamanlarında izole kalmasını önler.

9.4.3 Mobil Teknolojilerle İklim Bilinci Yayılımı

Mobil teknolojiler, internet erişimi olmayan veya fiziksel erişimde zorlanan gruplara iklim okuryazarlığını ulaştırmada güçlü bir araçtır. Kırsal alanlarda acil hava durumu uyarıları SMS, görsel ve sesli mesajlarla paylaşılabilir. Ayrıca, yerel dilde hazırlanan interaktif mesajlar ve mobil uygulamalarla, iklim hakkında pratik bilgiler, tasarruf

¹⁸⁰ Dijital İkiz (Digital Twin): Gerçek dünyadaki bir varlığın, sürecin veya sistemin sanal kopyasıdır. Sensörler aracılığıyla toplanan verilerle sürekli güncellenerek, fiziksel karşılığının mevcut durumunu ve performansını doğru bir şekilde yansıtır. Bu teknoloji, riskli durumları simüle etme, olası sorunları önceden tespit etme ve karar alma süreçlerini optimize etme olanağı sunar.

ipuçları ve dayanıklılık önerileri doğrudan günlük yaşama entegre edilebilir. Mobil çözümler, teknoloji ve iklimin kesişiminde kritik bir erişim ve farkındalık kanalı sunmaktadır.

Kapsayıcı dijital çözümler, hem afetlere dirençli iletişim altyapısı sağlar hem de iklim bilincini kırılgan gruplara ulaştırır. Dijital ikizler, kriz yönetimini güçlendirirken; mobil iletişim, yerelden küresele bilgi akışını mümkün kılar. Bu sayede iklim değişikliğinin etkileriyle mücadelede toplumsal eşitlik ve sürdürülebilir koruma alanı genişletilir. Dijital dönüşüm planları, koruyucu teknolojileri yalnızca erişilebilir değil, aynı zamanda insan odaklı ve kapsayıcı olacak şekilde tasarlamalıdır.

KAYNAKÇA

- Akın, F., & Özgün, F. (2024). İnternet kullanımının ekolojik ayak izi üzerindeki etkisi: Türkiye örneği. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 36, 186–206.
- Akpınar, M. E. (2025). Dijital dönüşüm ve dijital okuryazarlık: Teorik temeller, faydalar ve zararlar. *Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 81–104. <https://doi.org/10.31463/aicusbed.1530919>
- Alarco Carrier. (t.y.). Türkiye'nin iklim okuryazarlığı seviyesini ölçtü. *Ekoyapı Dergisi*. <https://www.ekoyapidergisi.org/alarco-carrier-turkiye-nin-iklim-okuryazarligi-seviyesini-olctu> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Atay, A. (2022, 3 Ağustos). İnterneti yeşillendirmek: Dijital karbon ayak izini azaltmak için neler yapılabilir? *NewsLab Turkey*. <https://www.newslabturkey.org/2022/08/03/interneti-yesillendirmek-dijital-karbon-ayak-izini-azaltmak-icin-neler-yapilabilir/> (Erişim tarihi: 19 Ağustos 2025)
- BİL-Kİ. (t.y.). Afetlerde yenilikçi yönetim: Dijital ikizler. <https://bil-ki.com/makale/AFETLERDE-YENILIKCI-YONETIM-DIJITAL-IKIZLER/1171> (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2025)
- CVVC. (t.y.). *Blockchain: A technology with social impact*. <https://www.cvvc.com/blogs/blockchain-a-technology-with-social-impact> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Dijital dönüşümün toplumsal dönüşüme etkisi... Buzdağının diğer tarafı! (t.y.). *HR Dergi*. <https://hrdergi.com/dijital-donusumun-toplumsal-donusume-etkisi> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- TOBB ETU. (t.y.). Pandemiye dijital yönetim ittifakı anlayışı. <https://www.etu.edu.tr/tr/bolum/bilgisayar-muhendisligi/haber/pandemiye-dijital-yonetim-ittifaki-anlayisi> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- European Environment Agency. (t.y.). *Assessing the costs and benefits of climate change adaptation measures*. <https://www.eea.europa.eu/publications/assessing-the-costs-and-benefits-of> (Erişim tarihi: 19 Ağustos 2025)

- Gökırmaklı, I. (2021, 10 Aralık). Medya iklim kriziyle nasıl başa çıkıyor? *NewsLab Turkey*. <https://www.newslabturkey.org/2021/12/10/medya-iklim-kriziyle-nasil-basa-cikiyor/> (Erişim tarihi: 19 Ağustos 2025)
- Greenwood, T. (2019, 23 Ekim). 20 ways to make your website more energy efficient. *Wholegrain Digital*. <https://www.wholegraindigital.com/blog/website-energy-efficiency/> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Greenwood, T. (2024, 16 Temmuz). Greening the Web: How we can create zero carbon websites. *Kinsta*. <https://kinsta.com/blog/zero-carbon-websites/> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Humanitarian Advisory Group. (t.y.). *Blockchain for social impact in aid and development*. <https://humanitarianadvisorygroup.org/blockchain-for-social-impact-in-aid-and-development/> (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2025)
- Karanfil, M., Uzma, O., Bektaş Dalgacı, B., & Erden Değirmenci, D. (2024). Dijitalleşme ve inovasyonun karbon ayak izine etkisi: Seçilmiş OECD ülkeleri için panel veri analizi. *Biga İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(3). <https://doi.org/10.70754/biibfd.1526606>
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2023). *Çevre ve iklim değişikliği okuryazarlığı beceri etkinlik kitabı*. Ankara.
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2023). *İklim değişikliği farkındalığının temel eğitime entegrasyonu çalıştay raporu*. Ankara.
- National Center for Biotechnology Information. (t.y.). The nonlinear effects of environmental innovation on energy sector-based carbon dioxide emissions in OECD countries. *PMC*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10852391/> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Netser. (t.y.). İklim değişikliği ve teknoloji. <https://www.netser.com.tr/tr/blog/iklim-degisikligi-ve-teknoloji> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- OECD. (t.y.). *Inclusive green and digital transformation*. <https://www.oecd.org/en/topics/inclusive-green-and-digital-transformation.html> (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025)
- Sezgin Büyükalaca, A. A., & Çömez, A. (2023). Medyada eğlence içeriğinde çevre sorunları: Eko-medya okuryazarlığı bağlamında örnek bir çözümleme. *İNİF E-Dergi*, 8(2), 52–75.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *İklim değişikliğine uyum stratejisi ve eylem planı (2024–2030)*. Ankara.
- TBD. (2024). *TBD karbon ayak izi çalıştay grubu raporu*. Ankara.
- Thomson Foundation. (t.y.). *Rethinking disinformation*. <https://www.thomsonfoundation.org> (Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025)
- Ufuk Avrupa. (t.y.). Hedef 4: Verimli, sürdürülebilir ve kapsayıcı enerji. <https://ufukavrupa.org.tr/tr/alanlar-kumeler/iklim-enerji-ve-mobilite/hedef-4-verimli-surdurulebilir-ve-kapsayici-enerji> (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2025)

World Bank. (2023, 29 Kasım). *Digital technologies fast-track climate solutions*. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/11/29/digital-technologies-fast-track-climate-solutions> (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2025)

Yıldırım, S., Nalbant, K. G., & Altuntaş, C. (2023). Dijital dönüşümde yapay zekâ ve Avrupa Yeşil Mutabakatı sürecinde sürdürülebilir yeşil pazarlama stratejileri. *İmgelem Dergisi*, 7(13), 467–492.

9.5. Kurumsal Sorumluluk ve Şeffaflık

9.5.1. Kurumsal Sorumluluk Anlayışının Gelişimi

Kurumsal sorumluluk (Kurumsal Sosyal Sorumluluk – KSS), yalnızca özel şirketlerin değil, kamu kurumlarının ve sivil toplum kuruluşlarının da toplum ve çevreye karşı hesap verebilirlik yükümlülüğünü ifade etmektedir. Geleneksel anlamda, bağış ve sponsorluk faaliyetleriyle sınırlı görülen KSS, günümüzde çok daha kapsamlı bir boyut kazanmıştır. Çevresel etkilerin azaltılması, insan haklarının korunması, çeşitlilik ve kapsayıcılığın artırılması, etik iş gücü politikalarının benimsenmesi bu kapsamda öne çıkan unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, kurumsal sorumluluk anlayışının yalnızca gönüllü bir sosyal katkı değil, aynı zamanda küresel sürdürülebilirlik gündemiyle bağlantılı stratejik bir zorunluluk haline gelmesine neden olmuştur (GRI, 2021).

Türkiye’de de bu dönüşüm son on yılda hız kazanmıştır. Özellikle 2020 sonrası dönemde şirketler, yalnızca finansal performanslarını değil, sosyal ve çevresel etkilerini de raporlamakla yükümlü hale gelmiştir. Örneğin, Koç Holding’in iklim krizi ve toplumsal eşitlik üzerine hazırladığı sürdürülebilirlik raporları, Türkiye’de KSS’nin yeni boyutunu yansıtmaktadır. Uluslararası alanda ise Unilever’in sürdürülebilir yaşam planı veya Patagonia’nın “Gezegen için %1” girişimi, kurumsal sorumluluğun küresel ölçekteki iyi örnekleri arasında gösterilebilir (UN Global Compact, 2022).

9.5.2. Şeffaflığın Yönetişimdeki Rolü

Şeffaflık, modern yönetim yaklaşımlarının temel dayanaklarından biri olarak görülmektedir. Karar alma süreçlerinin, uygulamaların ve sonuçların kamuya açık bir şekilde paylaşılması, paydaşların güvenini artırırken, kurumların ulusal ve uluslararası düzeyde daha güvenilir aktörler olarak konumlanmasını sağlar.

Türkiye’de Sermaye Piyasası Kurulu (SPK) tarafından yayımlanan **Sürdürülebilirlik İlkeleri Uyum Çerçevesi**, şirketlerin çevresel ve sosyal performanslarını raporlamasını zorunlu hale getirerek bu alanda şeffaflığı güçlendirmiştir (SPK, 2020). Dünya genelinde ise Avrupa Birliği’nin **Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (CSRD)** ve ABD’de Menkul Kıymetler ve Borsa Komisyonu (SEC) tarafından iklim risklerinin raporlanmasına yönelik düzenlemeler, şeffaflığın giderek zorunlu bir standart haline geldiğini göstermektedir (CSRD, 2022).

Türkiye’nin 2053 Net Sıfır hedefi doğrultusunda şeffaflık, yalnızca yasal bir uyum süreci değil, aynı zamanda finansmana erişim açısından stratejik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Yeşil tahviller ve sürdürülebilirlik bağlantılı krediler, şirketlerin şeffaf raporlama performanslarına göre şekillenmektedir. Bu nedenle şeffaflık, hem uluslararası fonlardan yararlanma hem de toplumsal güven inşa etme açısından kritik önemdedir (OECD, 2023).

9.5.3. Uluslararası Standartlar ve Uygulamalar

Kurumsal sorumluluk ve şeffaflığın küresel düzeyde benimsenmesi için çeşitli standartlar ve girişimler geliştirilmiştir. Bunların başında **Küresel Raporlama Girişimi (GRI)**, **Karbon Saydamlık Projesi (CDP)** ve **İklimle İlgili Finansal Beyanlar Görev Gücü (TCFD)** gelmektedir. Bu çerçeveler, kurumların çevresel, sosyal ve yönetim performanslarını sistematik, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir biçimde raporlamalarını sağlamaktadır (GRI, 2021; CDP, 2023; TCFD, 2017).

Avrupa Birliği'nin **Avrupa Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (ESRS)** ile uyumlu hale getirilen raporlama sistemleri, yalnızca büyük şirketleri değil, küçük ve orta ölçekli işletmeleri de kapsamaktadır. Bu durum, KOBİ'lerin (küçük ve orta ölçekli işletmeler) uluslararası tedarik zincirlerine entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve rekabet güçlerini artırmaktadır (CSRD, 2022).

Türkiye'de de Borsa İstanbul (BIST) bünyesinde geliştirilen sürdürülebilirlik endeksleri, şirketlerin performanslarını yatırımcılarla paylaşmasına olanak tanımakta ve uluslararası standartlarla uyumlu raporlama kültürünün yaygınlaşmasını teşvik etmektedir. TSKB'nin yeşil finansman modelleri ve Garanti BBVA'nın sürdürülebilir finans ürünleri, Türkiye'nin uluslararası standartlara uyum sağlayarak yatırımcı güvenini artırdığı örneklerdendir (TSKB, 2021; Garanti BBVA, 2022).

9.5.4. Türkiye'de Uygulamalar ve İyi Örnekler

Türkiye'de Borsa İstanbul (BIST) bünyesinde geliştirilen sürdürülebilirlik endeksleri, şirketlerin performanslarını ölçme ve yatırımcılarla paylaşma noktasında önemli bir araç olmuştur. Ayrıca Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) öncülüğünde geliştirilen yeşil finansman modelleri, şirketlerin çevresel performanslarını şeffaf bir şekilde raporlamalarını teşvik etmektedir. Bu uygulamalar, hem yerel hem de uluslararası yatırımcıların güvenini artırarak şirketlerin finansman kaynaklarına erişimini kolaylaştırmaktadır (TSKB, 2021).

9.5.5. Stratejik Önemi ve 2053 Net Sıfır Hedefi ile Bağlantı

Kurumsal sorumluluk ve şeffaflık, yalnızca etik bir gereklilik değil, aynı zamanda stratejik bir rekabet avantajıdır. Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Karbon hedefi doğrultusunda, şeffaf raporlama ve hesap verebilirlik uygulamaları, çevresel performansın izlenmesi kadar, toplumsal güvenin inşa edilmesi ve uluslararası fonlara erişim için de kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, kamu, özel sektör ve sivil toplum kuruluşlarının iş birliği içinde şeffaflık kültürünü yaygınlaştırması gerekmektedir (Avrupa Komisyonu, 2022).

9.6. ESG Raporlamasının Önemi

9.6.1. ESG Kavramının Kapsamı

ESG (Environmental, Social, Governance – Çevresel, Sosyal ve Yönetişim) kavramı, şirketlerin yalnızca finansal performansını değil, çevreye, topluma ve yönetim yapılarına olan etkilerini de ölçmeyi amaçlamaktadır. Çevresel boyut, karbon emisyonları, enerji verimliliği ve doğal kaynak yönetimini kapsarken; sosyal boyut, işçi hakları, çeşitlilik ve toplumsal katkılar üzerine odaklanmaktadır. Yönetişim boyutu ise şirketlerin karar alma mekanizmalarının şeffaflığını, hesap verebilirliğini ve etik standartlara uyumunu değerlendirmektedir (Kotsantonis et al., 2016).

9.6.2. Raporlamanın Küresel Standartları

Uluslararası düzeyde ESG raporlaması için Küresel Raporlama Girişimi (Global Reporting Initiative – GRI), Sürdürülebilirlik Muhasebesi Standartları Kurulu (Sustainability Accounting Standards Board – SASB) ve İklimle İlgili Finansal Beyanlar Görev Gücü (Task Force on Climate-related Financial Disclosures – TCFD) gibi standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlar, yatırımcıların karar süreçlerinde şeffaf bilgi akışını garanti altına almakta ve farklı sektörlerde karşılaştırılabilir veri sunmaktadır (GRI, 2021; SASB, 2020; TCFD, 2017).

9.6.3. Yatırımcılar ve Finansal Kuruluşlar Açısından Önemi

ESG raporlaması, yatırımcıların risk yönetimini güçlendirmekte ve uzun vadeli değer yaratma potansiyelini değerlendirmelerini sağlamaktadır. Özellikle yeşil tahviller ve sürdürülebilir finansman araçları, ESG raporlaması aracılığıyla güvence altına alınmaktadır. Türkiye’de de Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TKYB) gibi kurumlar, sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan projelere finansman desteği sunarken, bu projelerin şeffaf raporlamasını zorunlu tutmaktadır (TKYB, 2022).

9.6.4. Türkiye’de ESG Raporlama Uygulamaları

Türkiye’de Sermaye Piyasası Kurulu (SPK) tarafından yayımlanan Sürdürülebilirlik İlkeleri Uyum Çerçevesi, şirketlerin çevresel, sosyal ve yönetim performanslarını düzenli raporlamalarını öngörmektedir. Ayrıca Borsa İstanbul (BIST) bünyesinde oluşturulan Sürdürülebilirlik Endeksi, halka açık şirketlerin ESG performanslarını yatırımcılarla paylaşarak uluslararası piyasalarda rekabet güçlerini artırmaktadır. Bu uygulamalar, Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Karbon hedefleriyle de doğrudan bağlantılıdır (SPK, 2020; BIST, 2021).

9.6.5. Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi

ESG raporlaması, yalnızca uyum sağlama amacıyla değil, aynı zamanda stratejik planlamanın merkezinde yer alması gereken bir yönetim aracıdır. Şirketlerin iklim değişikliği, enerji verimliliği ve sosyal sorumluluk konularında attıkları adımları şeffaf biçimde paylaşmaları, hem toplumsal güveni hem de uluslararası fonlara erişimlerini güçlendirmektedir. Türkiye özelinde, Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı’na uyum ve sınırda karbon düzenlemeleri (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM) karşısında ESG raporlaması, rekabetçiliğin sürdürülmesi için kritik bir araçtır (Avrupa Komisyonu, 2022; OECD, 2023).

9.7. Karbon Ayak İzi Raporlama Standartları

9.7.1. Karbon Ayak İzi Kavramı

Karbon ayak izi, bir birey, kuruluş ya da ülkenin faaliyetleri sonucunda doğrudan veya dolaylı olarak atmosfere saldırdığı toplam sera gazı (greenhouse gases – GHG) miktarını ifade etmektedir. Bu emisyonlar, genellikle karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ölçülmekte ve enerji tüketimi, ulaşım, üretim süreçleri, tarım ve atık yönetimi gibi farklı kaynaklardan kaynaklanmaktadır. Karbon ayak izi raporlaması, kurumların çevresel etkilerini sayısallaştırarak şeffaf ve hesap verebilir hale getirmesi için temel bir araçtır (Wiedmann & Minx, 2008).

9.7.2. Küresel Standartlar ve Çerçeveler

Karbon ayak izi raporlaması, uluslararası düzeyde çeşitli standartlara dayandırılmaktadır. Bunların başında **Sera Gazı Protokolü (Greenhouse Gas Protocol – GHG Protocol)** gelmektedir. Dünya Kaynakları Enstitüsü (World Resources Institute – WRI) ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD) tarafından geliştirilen bu protokol, kurumlara üç kapsam (Scope 1: doğrudan emisyonlar, Scope 2: satın alınan enerji kaynaklı emisyonlar, Scope 3: değer zinciri emisyonları) üzerinden hesaplama ve raporlama imkânı sunmaktadır. Bunun yanında, **ISO 14064 standardı** ise sera gazı envanteri oluşturma, doğrulama ve raporlama süreçlerinde teknik bir çerçeve sağlamaktadır (WRI & WBCSD, 2004; ISO, 2018).

9.7.3. Avrupa Birliği ve Uluslararası Yönelimler

Avrupa Birliği'nde karbon ayak izi raporlaması, **Avrupa Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (European Sustainability Reporting Standards – ESRS)** ve **Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (Corporate Sustainability Reporting Directive – CSRD)** aracılığıyla zorunlu hale getirilmektedir. Bu çerçevede şirketler, emisyonlarını kapsamlı biçimde raporlamak ve azaltım stratejilerini kamuoyuyla paylaşmakla yükümlüdür. Ayrıca, Avrupa Birliği'nin **Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM)** kapsamında ithalatçı ülkelerden karbon ayak izi verilerinin talep edilmesi, karbon raporlamasını yalnızca Avrupa'daki değil, küresel düzeydeki şirketler için de zorunlu bir süreç haline getirmiştir (Avrupa Komisyonu, 2022).

9.7.4. Türkiye'de Uygulamalar

Türkiye'de karbon ayak izi raporlaması, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen **Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi, Raporlanması ve Doğrulanması (MRV)** sistemi aracılığıyla uygulanmaktadır. Bu sistem kapsamında, enerji, çimento, demir-çelik gibi yüksek emisyon yoğun sektörlerde faaliyet gösteren şirketlerin emisyonlarını düzenli olarak raporlamaları zorunludur. Ayrıca, Türkiye'nin **2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi** doğrultusunda, karbon ayak izi raporlaması yalnızca yasal bir yükümlülük değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik stratejilerinin temel bileşeni haline gelmiştir. Belediyeler için geliştirilen **Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planları (SECAP – Sustainable Energy and Climate Action Plans)** kapsamında da karbon ayak izi hesaplamaları yapılmakta ve azaltım senaryoları geliştirilmektedir (ÇŞİDB, 2022).

9.7.5. Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi

Karbon ayak izi raporlaması, şirketler ve kamu kurumları için yalnızca bir çevresel raporlama aracı değil, aynı zamanda stratejik karar alma süreçlerinin merkezinde yer alan bir yönetim aracıdır. Emisyonların doğru bir şekilde hesaplanması, şirketlerin enerji verimliliği yatırımlarını planlamalarını, tedarik zincirlerini düşük karbonlu hale getirmelerini ve finansmana erişimlerini kolaylaştırmaktadır. Türkiye'de, Avrupa Birliği ile ticari entegrasyonun sürdürülmesi için karbon ayak izi raporlaması, CBAM uyumu açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, dijital karbon takip yazılımları, IoT tabanlı sensörler ve blokzincir teknolojileri gibi yenilikçi araçların raporlama süreçlerine entegrasyonu, şeffaflık ve güvenilirliği artıracaktır (OECD, 2023; UNFCCC, 2022).

9.8. Toplumsal Kapasite ve İklim Adaptasyonu

9.8.1. Kavramsal Çerçeve

Toplumsal kapasite, toplumların iklim değişikliğine karşı direnç geliştirme, riskleri azaltma ve krizlere uyum sağlama yeteneğini ifade etmektedir. Bu kapasite, yalnızca teknik bilgi ve altyapıya değil; aynı zamanda sosyal

sermaye, eğitim düzeyi, yönetim mekanizmaları ve toplumsal dayanışma gibi unsurlara dayanmaktadır. İklim adaptasyonu ise iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmaya veya bu etkilerden doğan fırsatları değerlendirmeye yönelik süreçleri kapsamaktadır (IPCC, 2022).

9.8.2. Dünya Geneline Uygulamalar

Dünya genelinde iklim adaptasyonu stratejileri, farklı ölçeklerde uygulanmaktadır. Örneğin Hollanda, deniz seviyesinin yükselmesine karşı "Room for the River" programıyla yalnızca mühendislik çözümleri değil, doğa tabanlı çözümleri (örneğin sulak alanların yeniden kazanılması) de politika araçlarına entegre etmiştir. Bangladeş, sel ve siklonlara karşı yerel kapasiteyi artırmak için topluluk temelli erken uyarı sistemleri geliştirmiştir. Kenya'da ise tarımsal üretimde iklim adaptasyonu için akıllı sulama sistemleri ve iklim dostu tohum programları yürütülmektedir (UNDP, 2021).

9.8.3. Türkiye'de Toplumsal Kapasite ve Adaptasyon

Türkiye'de toplumsal kapasitenin artırılması, **Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi (2010–2023)**, **İklim Kanunu (2024, 7552 sayılı)** ve yerel düzeyde geliştirilen **Yerel İklim Değişikliği Uyum Planları (YİDEP)** gibi politika belgeleriyle desteklenmektedir. Belediyeler tarafından hazırlanan **Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planları (SECAP)**, toplumların enerji verimliliği ve emisyon azaltımına yönelik kapasitelerini güçlendirmektedir. Özellikle Hatay, İzmir ve Bursa gibi illerde, iklim afetlerine (sel, orman yangını, sıcak hava dalgaları) karşı toplumsal direnç geliştirmek amacıyla pilot projeler yürütülmektedir. Bu projeler, yerel halkın afet farkındalığını artırmak, eğitim programları düzenlemek ve yerel sivil toplum kuruluşlarını sürece dâhil etmek üzerine yoğunlaşmaktadır (ÇŞİDB, 2023).

9.8.4. Kamu, Özel Sektör ve Sivil Toplumun Rolü

Toplumsal kapasitenin geliştirilmesi çok aktörlü bir süreçtir. Kamu kurumları, stratejik planlama ve finansman sağlama görevini üstlenirken; özel sektör, yenilikçi teknolojiler ve düşük karbonlu iş modelleriyle uyum sürecine katkı vermektedir. Sivil toplum kuruluşları ise farkındalık artırma, eğitim, yerel bilgi aktarımı ve katılımcı yönetim mekanizmalarının kurulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin Türkiye'de **TEMA Vakfı**, yerel halkla birlikte yürüttüğü projelerle iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik doğa tabanlı çözümler üretmektedir. Özel sektör tarafında ise enerji şirketleri, dijital enerji verimliliği çözümleriyle toplumsal uyum kapasitesine katkı sağlamaktadır (OECD, 2022).

9.8.5. Dijitalleşme ve Toplumsal Kapasite

Dijital araçlar, toplumsal kapasitenin geliştirilmesinde yeni olanaklar sunmaktadır. Akıllı telefon uygulamalarıyla sel, orman yangını ve hava kirliliği gibi çevresel risklere yönelik erken uyarılar yaygınlaştırılmakta; IoT tabanlı sensörler aracılığıyla hava kalitesi, su seviyeleri ve sıcaklık değişimleri anlık olarak takip edilmektedir. Türkiye'de geliştirilen "Afet Risk Yönetimi Dijital Platformları" yerel yönetimlere risk haritalarını oluşturma ve halkı bilgilendirme konusunda destek sunmaktadır. Bu bağlamda dijitalleşme, yalnızca risk yönetimini hızlandırmakla kalmamakta, aynı zamanda toplulukların katılımını ve farkındalığını da artırmaktadır (UNFCCC, 2022).

9.8.6. Stratejik Önemi ve Gelecek Perspektifi

Toplumsal kapasitenin artırılması, yalnızca afet risklerini azaltmak için değil; aynı zamanda **2053 Net Sıfır Hedefi** gibi uzun vadeli stratejik amaçlara ulaşmak için de kritik önemdedir. Türkiye'de, iklim adaptasyonu ve toplumsal

kapasite geliştirme süreçlerinin, enerji dönüşümü, tarımsal sürdürülebilirlik ve kentsel dirençlilik politikalarıyla bütüncül bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Dünya örnekleri incelendiğinde, topluluk temelli adaptasyonun en başarılı sonuçları, kamu, özel sektör ve sivil toplum işbirliğiyle, dijital çözümler ve doğa tabanlı yaklaşımların birlikte uygulanmasıyla elde edilmektedir (World Bank, 2023).

9.8.7. Toplumsal Kapasite Gelişimi ve İklim Adaptasyonu

İklim değişikliği ile mücadele yalnızca teknolojik yatırımlar veya finansal mekanizmalarla sınırlı değildir. Toplulukların kapasitesini güçlendirmek, bireylerin, kurumların ve yerel yönetimlerin iklim risklerine karşı daha dirençli hale gelmesini sağlamak da aynı derecede önemlidir. Bu kapsamda toplumsal kapasite gelişimi; işbirliği projeleri, farkındalık çalışmaları ve özellikle gençlerin iklim hareketine katılımıyla desteklenmektedir. Küresel deneyimler ve Türkiye’de yürütülen çalışmalar, bu sürecin çok boyutlu ve kapsayıcı bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini göstermektedir (IPCC, 2022).

9.8.7.1 Yerel Yönetimlerle İşbirliği Projeleri

Yerel yönetimler, iklim adaptasyonu politikalarının sahadaki en güçlü uygulayıcılarıdır. Çünkü altyapı yatırımları, enerji verimliliği projeleri, ulaşım ve atık yönetimi gibi kritik alanlarda doğrudan karar alma yetkisine sahiptirler. Avrupa Birliği’nin “Covenant of Mayors” girişimi kapsamında, 10 binden fazla belediye iklim eylem planı hazırlamış ve karbon azaltım taahhüdünde bulunmuştur. Bu örnek, yerel yönetimlerin küresel düzeyde nasıl bir ağ oluşturarak etkili olabileceğini göstermektedir.

Türkiye’de de Bursa, İzmir, Gaziantep ve İstanbul gibi şehirler, Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planları (SECAP) hazırlayarak Avrupa’daki iyi uygulamalara uyum sağlamaktadır. Bursa Büyükşehir Belediyesi’nin “Yeşil Şehir” girişimi, şehir içi ulaşımında elektrikli otobüs kullanımını yaygınlaştırırken; İzmir’in “İklim Dostu Kent” stratejisi, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji projelerini ön plana çıkarmaktadır. Bu tür projeler, hem yerel halkın katılımıyla güçlenmekte hem de belediyelerin iklim risklerine karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır (Covenant of Mayors, 2023; TBB, 2024).

9.8.7.2. Sektörler Arası Farkındalık Projeleri

İklim değişikliği yalnızca çevre alanında değil; tarım, enerji, sanayi, turizm ve sağlık sektörlerinde de ciddi etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, farklı sektörlerin birlikte çalışması ve ortak çözümler geliştirmesi büyük önem taşır. Hollanda’da tarım ve şehircilik politikalarının birlikte planlanması, taşkın risklerinin azaltılmasında başarılı sonuçlar doğurmuştur. Almanya’da sanayi tesislerinde uygulanan döngüsel ekonomi projeleri, atıkların geri kazanımını ve karbon azaltımını desteklemiştir.

Türkiye’de de farklı sektörlerde benzer adımlar atılmaktadır. Tarım ve Orman Bakanlığı’nın yürüttüğü “Akıllı Sulama Projeleri”, tarımda su tasarrufu sağlayarak kuraklık riskini azaltmayı hedeflemektedir. Sanayi alanında, Organize Sanayi Bölgeleri’nde (OSB) atık yönetimi projeleri hem çevresel riskleri azaltmakta hem de işletmeler için maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Turizm sektöründe, Antalya ve Muğla gibi bölgelerde “Yeşil Otel” sertifikasyon programları, sürdürülebilir turizm uygulamalarını yaygınlaştırmaktadır. Bu tür girişimler, sektörler arası sinerjiyi artırarak iklim adaptasyonunun daha güçlü bir şekilde uygulanmasına katkı sunmaktadır (OECD, 2021; FAO, 2023).

9.8.7.3. Gençlerin İklim Eylemlerine Katılımı

Gençler, iklim hareketinin en önemli paydaşları ve geleceğin karar alıcılarıdır. Greta Thunberg'in başlattığı "Fridays for Future" hareketi, milyonlarca genci sokağa çıkararak iklim krizine yönelik güçlü bir farkındalık yaratmıştır. Bu örnek, gençlerin toplumsal kapasiteyi artırmadaki dönüştürücü gücünü açıkça göstermektedir.

Türkiye'de ise gençlerin iklim eylemlerine katılımı giderek artmaktadır. Üniversitelerde kurulan iklim toplulukları, öğrenci kongreleri ve çevre zirveleri aracılığıyla gençler iklim konularında bilinçlenmekte ve aktif rol almaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın desteklediği "İklim Gençlik Elçileri Programı" ile gençler, yerel projelere doğrudan katkı sunmakta ve karar alma mekanizmalarına dâhil olmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de genç girişimcilerin kurduğu sosyal girişimler, plastik atıkların geri dönüşümü, karbon ayak izi ölçümü ve yenilenebilir enerji girişimleri gibi alanlarda önemli başarılar elde etmektedir. Bu tür katılımlar, yalnızca farkındalık yaratmakla kalmayıp, gençlerin liderlik becerilerini geliştirmekte ve toplumun genelinde iklim adaptasyonu kültürünü güçlendirmektedir (UNDP, 2023; ÇŞİDB, 2024).

9.8.7.4. Sonuç ve Değerlendirme

Toplumsal kapasite gelişimi ve iklim adaptasyonu, yalnızca devlet politikalarıyla değil, yerel yönetimler, özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve bireylerin ortak çabalarıyla mümkün olmaktadır. Yerel yönetimlerin işbirliği projeleri, sektörler arası farkındalık çalışmalarının artırılması ve gençlerin iklim eylemlerine katılımı, adaptasyon kapasitesini artırmakta ve toplumun iklim krizine karşı daha dirençli hale gelmesini sağlamaktadır.

Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedefleri doğrultusunda, bu alanların birlikte ve uyum içinde geliştirilmesi, iklim değişikliğiyle mücadelede başarının anahtarıdır. Dünya örnekleri, bütüncül yaklaşımların uzun vadede ekonomik, sosyal ve çevresel faydalar sağladığını ortaya koymaktadır. Türkiye de hem yerel hem de ulusal düzeyde benzer politikaları güçlendirerek, toplumsal kapasiteyi artırabilir ve iklim uyumunu hızlandırabilir (Türkiye İklim Kanunu, 2023).