



# TÜRKİYE’NİN ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞME VİZYONU

KÜRESEL EĞİLİMLER, ULUSAL STRATEJİLER VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ



# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ŞEKİLLER TABLOSU .....                                                                                  | 2  |
| KISALTMALAR .....                                                                                       | 3  |
| ÖZET .....                                                                                              | 4  |
| 1.GİRİŞ .....                                                                                           | 5  |
| 2. KÜRESEL PERSPEKTİFTEN ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM.....                                         | 8  |
| 2.1. KÜRESEL ENERJİ SİSTEMLERİNDE DİJİTALLEŞMENİN DİNAMİKLERİ .....                                     | 8  |
| 2.2. ULUSLARARASI ENTEGRE YAKLAŞIMLAR: ALMANYA, GÜNEY KORE, HOLLANDA VE DİĞER BAŞARILI UYGULAMALAR      | 10 |
| 2.3. TÜRKİYE’NİN GENEL DİJİTALLEŞME DÜZEY VE ULUSLARARASI KONUMLANDIRILMASI .....                       | 13 |
| 3. TÜRKİYE’DE ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞMENİN GENEL GÖRÜNÜMÜ.....                                     | 15 |
| 3.1. POLİTİKALAR, KURUMSAL VE STRATEJİK YAPILAR.....                                                    | 15 |
| 3.2. TEKNOLOJİK YATIRIMLARIN YAYGINLIĞI VE ALTYAPI DAĞILIMI .....                                       | 16 |
| 4. TÜRKİYE’NİN DİJİTAL ENERJİ EKOSİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ.....                    | 22 |
| 4.1. DİJİTAL TEKNOLOJİLERİN SINIFLANDIRILMASI VE UYGULAMA ALANLARI .....                                | 22 |
| 4.1.1. Yenilenebilir Enerji ve Depolama Sistemlerinin Dijital Entegrasyonu .....                        | 22 |
| 4.1.2. Tüketici Odaklı Uygulamalar ve Blok zincir Temelli Enerji Ticareti.....                          | 26 |
| 4.2. OPERASYON VE BAKIM SÜREÇLERİNDE DİJİTALLEŞME .....                                                 | 29 |
| 5. DİJİTALLEŞMENİN YÖNETİŞİMSSEL, REGÜLASYONEL VE HUKUKİ BOYUTU.....                                    | 34 |
| 5.1. MEVZUAT UYUMU VE REGÜLASYONLARIN DİJİTAL TEKNOLOJİLERE ENTEGRASYONU .....                          | 34 |
| 5.2.VERİ GÜVENLİĞİ VE GİZLİLİĞİ .....                                                                   | 36 |
| 5.3 ULUSAL VE ULUSLARARASI UYUM .....                                                                   | 36 |
| 6. DİJİTALLEŞMEYİ DESTEKLEYEN POLİTİKA ARAÇLARI VE FİNANSAL MEKANİZMALAR                                | 38 |
| 6.1. Teşvik POLİTİKALARI VE KAMU DESTEKLERİ .....                                                       | 38 |
| 6.2. TÜRKİYE’DE BANKALAR BAZINDA DİJİTAL ENERJİ FİNANSMANI .....                                        | 43 |
| 6.3. TÜRKİYE’DE FİNANSMAN KURULUŞLARI VE ÖZEL SEKTÖR ŞİRKETLERİ BAZINDA DİJİTAL ENERJİ FİNANSMANI ..... | 44 |
| 6.4. DÜNYADA BANKALAR BAZINDA DİJİTAL ENERJİ FİNANSMANI .....                                           | 45 |
| 6.5. DÜNYADA FİNANSMAN KURULUŞLARI VE ÖZEL SEKTÖR ŞİRKETLERİ BAZINDA DİJİTAL ENERJİ FİNANSMANI .....    | 45 |
| 7. SONUÇLAR.....                                                                                        | 49 |
| 8. KAYNAKÇA .....                                                                                       | 52 |





## ŞEKİLLER TABLOSU

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 1.1: Türkiye’de dijital olgunluk: sektörler göre küresel karşılaştırma (2023, DMI)            | 6   |
| Şekil 2.1: Sektörlere göre yapay zekâ teknolojilerini kullanan işletmeler, AB, 2024                 | 9   |
| Şekil 2.2: Avrupa 2024 yılı Akıllı Elektrik Sayacı Penetrasyonu İstatistikleri                      | 12  |
| Şekil 2.3:Avrupa 2025 Yılı Akıllı Elektrik Sayacı İstatistiği                                       | 12  |
| Şekil 3.1: Potansiyel Alt Proje İlleri                                                              | 12  |
| Şekil 3.2: Tahmini proje sayılarının illere göre dağılımı                                           | 12  |
| Şekil 3.3: Kaynaklara Göre Türkiye Gerçek Zamanlı Üretim                                            | 12  |
| Şekil 4.1: Türkiye Güneş Enerjisi Kurulu Gücü                                                       | 212 |
| Şekil 4.2: Türkiye'nin yıllara göre dijitalleşme yüzdeleri                                          | 27  |
| Şekil 4.3: Enerji Sektöründe Dijitalleşmenin Operasyon ve Bakım Süreçlerine Etkileri                | 28  |
| Şekil 4.4: 2018–2028 Döneminde İşletme ve Bakım Küresel Maliyetlerinin Dağılımı                     | 29  |
| Şekil 6.1: Avrupa Yatırım Bankası’nın (EIB) Yeşil, Sosyal ve Sürdürülebilir Tahvillerinin Yıllık D. | 36  |
| Şekil 6.2: Kaliforniya ve Avustralya’daki bir özel şirketin sanal enerji santralleri (VPP) artışı   | 42  |



## **KISALTMALAR**

**AB :** Avrupa Birliği

**ABD :** Amerika Birleşik Devletleri

**AFD :** Agence Française de Développement (Fransız Kalkınma Ajansı)

**AI :** Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)

**BNP :** Brüt Milli Hasıla

**CB :** Cumhurbaşkanlığı

**DMS :** Dağıtım Yönetim Sistemi

**EBRD :** Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası

**EMS :** Enerji Yönetim Sistemi (Energy Management System)

**ENR :** Engineering News-Record

**ESG :** Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (Environmental, Social, Governance)

**GIS :** Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System)

**IEA :** Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)

**IT :** Bilgi Teknolojileri (Information Technology)

**MAM :** TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi

**MW :** Megawatt

**OMFIF :** Official Monetary and Financial Institutions Forum

**SCADA :** Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition)

**TEİAŞ :** Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

**TKYB :** Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası

**TSKB :** Türkiye Sınai Kalkınma Bankası

**VPP :** Sanal Enerji Santrali (Virtual Power Plant)





# TÜRKİYE’NİN ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞME VİZYONU

KÜRESEL EĞİLİMLER, ULUSAL STRATEJİLER VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ

## ÖZET

Enerji sistemleri, iklim değişikliğiyle mücadele, arz güvenliği, maliyet etkinliği ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin giderek önemli olduğu bir dönemde, dijitalleşmenin sunduğu imkanlarla yeniden şekillenmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bir yenilik süreci değil; aynı zamanda enerji sektörlerinin işleyişinde yapısal bir değişimi temsil etmektedir. Türkiye, bu küresel geçişin içinde yerini alarak dijital teknolojilerle şekillenen yeni enerji düzenine uyum sağlama yönünde kararlı adımlar atmaktadır.

Bu rapor, Türkiye’nin enerji sektöründe dijital dönüşüm sürecini çok boyutlu biçimde analiz etmekte ve söz konusu sürecin teknolojik uygulamalar, yönetim mekanizmaları, insan kaynağı, yasal altyapı ve finansman modelleri üzerinden nasıl kurgulandığını ortaya koymaktadır. Yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT), dijital ikiz uygulamaları ve blok zincir tabanlı enerji ticareti çözümleri; Türkiye’nin enerji sistemine entegre edilen öncü dijital teknolojiler arasında yer almakta ve sistem verimliliğini, esnekliğini ve öngörülebilirliğini artırmaktadır. Bu çerçevede Türkiye, enerji sektöründe dijitalleşmeyi sadece teknolojik entegrasyonla sınırlı görmeyip, aynı zamanda politika üretiminden regülasyon uyumuna, finansal sürdürülebilirlikten beşerî kapasite gelişimine kadar çok katmanlı bir kalkınma vizyonunun parçası olarak ele almaktadır. Raporda sunulan analizler, Türkiye’nin dijital enerji dönüşümüne ilişkin mevcut durumunu, güçlü yönlerini ve öncelikli gelişim alanlarını bütüncül bir yaklaşımla ortaya koyarken; aynı zamanda uluslararası iş birliği, teknoloji transferi ve yatırım stratejileri için somut öneriler geliştirilmesine de zemin hazırlamaktadır.



# 1.GİRİŞ

Enerji sektörü hem teknolojik ilerlemeler hem de dijitalleşmenin etkisiyle dünya genelinde köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Gelişen teknolojiler, enerji altyapılarının modernleşmesini ve yeni nesil çözümlerin hayata geçirilmesini sağlarken; dijitalleşme, üretimden iletme, dağıtımdan tüketime kadar tüm süreçlerde verimliliği artırmakta, şeffaflığı güçlendirmekte ve sürdürülebilirliği desteklemektedir (CB Dijital Dönüşüm Ofisi, 2021). Bu küresel dönüşüme paralel olarak Türkiye, enerji sektöründe hem ileri teknolojilerin entegrasyonunu hem de dijital uygulamaların yaygınlaştırılmasını önceliklendirerek, sektörel rekabet gücünü artırmayı ve iklim değişikliği ile mücadelede daha etkin bir rol üstlenmeyi hedeflemektedir. Türkiye'nin dijital enerji vizyonu, operasyonel kazanımlarının yanı sıra sürdürülebilirlik, arz güvenliği, finansal şeffaflık ve bölgesel entegrasyon hedefleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir.

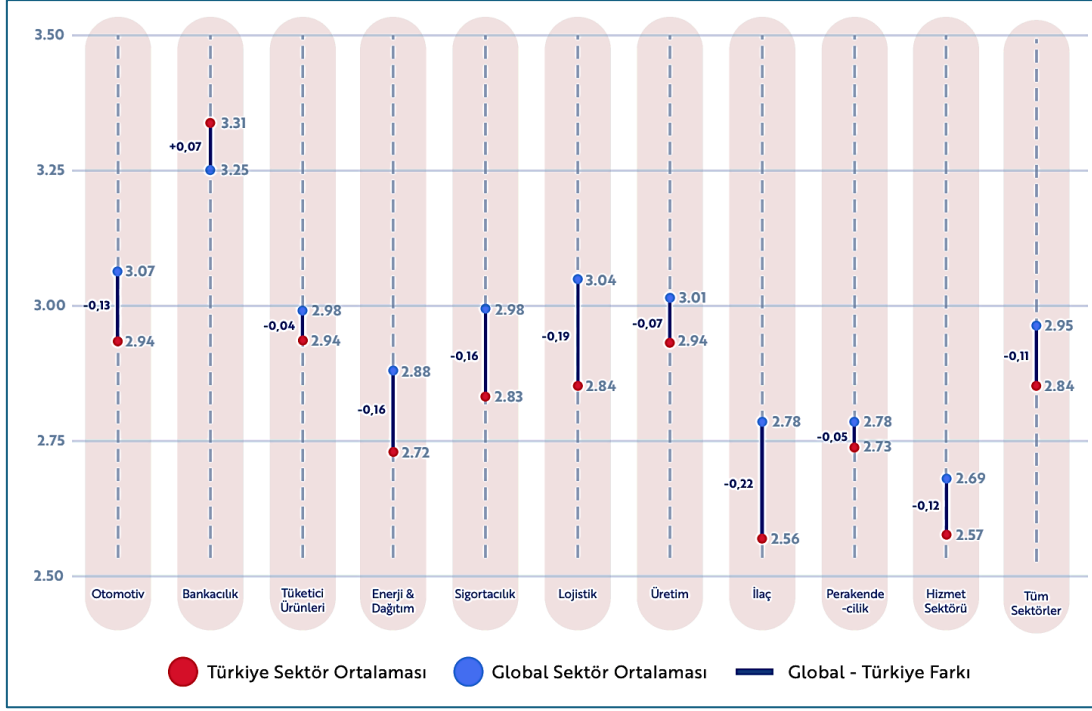
Akıllı şebeke uygulamaları ve ileri düzey enerji veri analitiği sayesinde tüketim eğilimleri daha doğru ve bütüncül bir biçimde analiz edilebilmekte, kaynakların daha etkin yönetimine olanak tanınmaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ ve makine öğrenmesine dayalı algoritmalar aracılığıyla üretim ve arz planlaması daha öngörülebilir, verimli ve esnek bir yapı oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji santrallerinde dijital altyapıların yaygın biçimde benimsenmesi, özellikle üretimdeki değişkenliğin daha sağlıklı kontrol edilmesini sağlamakta; enerji depolama sistemlerinin dijital entegrasyonu ise şebeke esnekliğini ve arz güvenliğini artırmaktadır.

Öte yandan, blok zincir (blockchain) temelli enerji ticareti platformları, piyasa işlemlerinin daha şeffaf ve güvenilir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sunarken; tüketici odaklı dijital çözümler, enerji kullanıcılarının daha bilinçli, etkileşimli ve sürdürülebilir enerji davranışları geliştirmelerini teşvik etmektedir. Akıllı şebekeler, büyük veri analitiği, yapay zekâ temelli öngörü sistemleri, blok zincir tabanlı enerji ticareti, dijital ikiz uygulamaları ve nesnelerin interneti (IoT) gibi ileri dijital teknolojiler; Türkiye enerji sistemine çok katmanlı olarak entegre edilmekte, karar destek mekanizmalarından tüketici deneyimine kadar tüm süreçleri dönüştürmektedir.

Türkiye'nin dijital enerji dönüşüm süreci, yalnızca teknolojik uygulamaların entegrasyonu ile sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yasal düzenlemeler, finansal yenilikler, insan kaynağı kapasitesi ve veri yönetimi gibi çok boyutlu unsurlar üzerinden şekillenmektedir (IEA, 2023).

Bu kapsamda, Türkiye'nin mevcut dijital olgunluk seviyesinin sektörel bazda küresel ortamlarla kıyaslanması, dönüşüm sürecindeki güçlü yönlerin ve gelişim alanlarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Elde edilen veriler, dijitalleşme politikalarının etkinliğini değerlendirmek ve öncelikli yatırım alanlarını tespit etmek amacıyla görselleştirilerek Şekil 1.1'de sunulmuştur.



Şekil 1.1: Türkiye'de dijital olgunluk: sektörlere göre küresel karşılaştırma (2023, DMI)

Türkiye'nin dijital olgunluk seviyesi Şekil 1'de de görüldüğü üzere sektörden sektöre farklılık göstermekte olup bazı alanlarda küresel ortalamaya yakın bir performans sergilerken, bazı sektörlerde ise gelişim potansiyeli daha belirgindir. Bu durum, dijital dönüşümün hızlandırılması için politik ve yatırım önceliklerinin netleştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. (CB Dijital Dönüşüm Ofisi, 2021)

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023–2027 Stratejik Planı, Türkiye'nin dijital enerji politikalarının kurumsal temelini oluşturmakta olup, bu planda yapay zekâ destekli öngörü sistemleri, akıllı sayaçlar, gelişmiş SCADA mimarileri ve dijital şebeke altyapıları öncelikli yatırım alanları olarak tanımlanmıştır. EPİAŞ tarafından yürütülen “Şeffaflık Platformu”, piyasa verilerinin kamuya açık, izlenebilir ve güvenilir biçimde paylaşılmasını sağlarken; TEİAŞ'ın kısa ve orta vadeli yük tahmin sistemleri ve TEDAŞ'ın dağıtım otomasyon projeleri, dijitalleşmenin iletim ve dağıtım seviyelerindeki yansımaları göstermektedir. Finansal boyutta ise, Türkiye Sanayi Kalkınma Bankası (TSKB) ve Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası

(TKYB) gibi kurumlar tarafından yürütülen dijital ve yeşil finansman araçları, enerji yatırımlarının şeffaf, izlenebilir ve performansa dayalı bir yapıya kavuşturulmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda; blockchain tabanlı yeşil tahvil uygulamaları, karbon kredilendirme sistemleri ve dijital portföy izleme altyapıları ile hem özel sektörün yatırım kapasitesi desteklenmekte hem de uluslararası çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) standartlarına uyum sağlanmaktadır. Rapor kapsamında, Türkiye'nin enerji sektöründeki teknolojik ilerlemeler ile dijital dönüşüm süreci; yapay zekâ, büyük veri analitiği, dijital ikizler, nesnelerin interneti (IoT) ve blok zincir tabanlı enerji ticareti çözümleri gibi dijital teknolojilerin türlerine göre kategorize edilerek ele alınmıştır.

Bu kapsamda, her bir uygulamanın sistem ölçeğinde sunduğu operasyonel, ekonomik ve yönetsel faydalar ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Ayrıca, enerji depolama sistemlerinin dijital entegrasyonu, tüketici davranışlarının dijital olarak izlenmesi, veri güvenliği altyapılarının güçlendirilmesi, regülasyonel esneklik mekanizmaları ve sınır ötesi dijital enerji ticareti gibi stratejik alanlar üzerinden Türkiye'nin mevcut kapasitesi analiz edilmiştir. (ESG News, n.d.)

EPIAŞ Şeffaflık Platformu, TEİAŞ yük tahmin sistemleri, EPDK lisanslama süreçleri, TKYB ve TSKB'nin yeşil finansman modelleri, kamu-özel sektör iş birlikleri ve girişimcilik ekosisteminin yükselen yapısı; bu dönüşümün somut çıktıları olarak raporda belgelenmiştir. Dijitalleşmenin çok katmanlı yapısı, raporda hem teknik çözümler hem de politika tasarımı düzeyinde sistematik biçimde ele alınmış; enerji güvenliği, sürdürülebilir kalkınma, finansal kapsayıcılık ve bölgesel enerji entegrasyonu hedefleriyle olan bağlantıları güçlü biçimde ortaya konmuştur.

Dijitalleşmenin bölgesel enerji geçişinde Türkiye'yi bir merkez ülke konumuna taşıyabilecek stratejik etkileri, örnek uygulamalar üzerinden tartışılmış; politika yapıcılara, yatırımcılara ve teknoloji sağlayıcılara yönelik yol gösterici önerilere yer verilmiştir.

Bu çerçevede, Türkiye'nin enerji sektöründe dijitalleşmeye yönelik yaklaşımı yalnızca bir altyapı modernizasyonu olarak değil; aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmanın, dijital ekonominin ve bölgesel enerji entegrasyonunun ana bileşeni olarak tanımlanmaktadır. Türkiye'nin dijital enerji vizyonunun küresel standartlarla olan uyumunu ve bölgesel liderlik potansiyelini stratejik ve bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymakta; aynı zamanda teknoloji transferi, yatırım mobilizasyonu ve regülasyonel iş birlikleri için güçlü bir referans çerçevesi sunmaktadır.



## 2. KÜRESEL PERSPEKTİFTEN ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

### 2.1. Küresel Enerji Sistemlerinde Dijitalleşmenin Dinamikleri

Küresel enerji sistemleri, artan enerji talebi, arz-talep dengesizlikleri, kaynakların sürdürülebilir kullanımı, şebeke esnekliği ihtiyacı ve iklim değişikliğiyle mücadele gibi çok boyutlu zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorlukların yönetiminde dijital teknolojiler, yalnızca operasyonel araçlar olarak değil; aynı zamanda sistemlerin çevikliğini, dayanıklılığını ve verimliliğini artıran temel stratejik bileşenler olarak konumlanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2023 Dünya Enerji Yatırımları Raporu’nda, dijital enerji teknolojilerine yapılan küresel yatırımın yıllık ortalama %20 oranında arttığını ve bu artışın enerji sektörünün yapısal dönüşümünde kritik rol oynadığını belirtmektedir. (IEA, 2024)

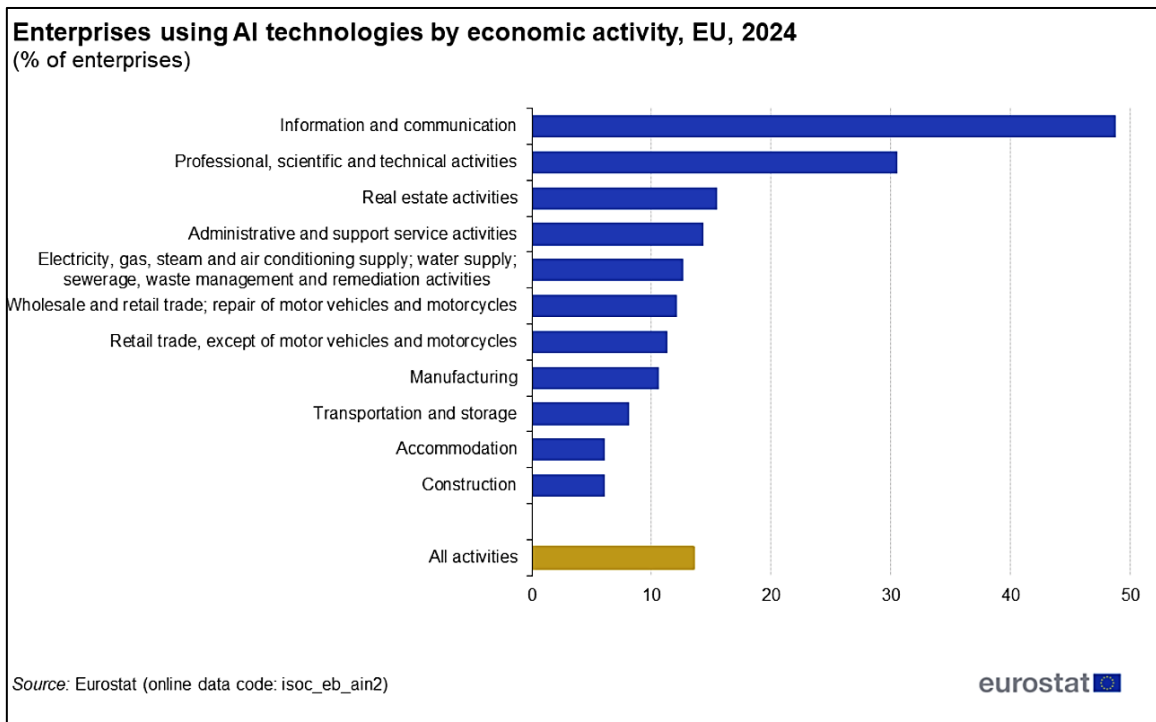
Günümüz enerji altyapılarına entegre edilen dijital çözümler, üretim, iletim, dağıtım ve tüketim süreçlerinde veri odaklı karar alma mekanizmalarını destekleyerek sistem verimliliğini üst düzeye çıkarmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı veri analizi, siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ (AI), makine öğrenimi (ML) ve dijital ikiz teknolojileri; şebeke kontrolü, yük dengelemesi, enerji tahmin edilmesi ve bakım optimizasyonu gibi uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), dijitalleşmenin yenilenebilir enerji penetrasyonu üzerindeki etkisini vurgulayarak; şebeke esnekliğini artıran dijital teknolojilerin, enerji geçişi sürecini hızlandıran temel etkenler arasında olduğunu bildirmektedir.

Dijitalleşme, aynı zamanda yeni enerji iş modellerini de mümkün kılmaktadır. Blok zincir tabanlı eşler arası enerji ticareti platformları, sanal enerji santralleri (Virtual Power Plants – VPP), tüketiciye doğrudan bilgi akışı sağlayan şeffaflık platformları ve talep tarafı yönetimi uygulamaları, tüketiciyi sistemin pasif bir bileşeni olmaktan çıkararak aktif bir oyuncuya dönüştürmektedir. Böylece kullanıcılar, yalnızca enerji tüketicisi değil; aynı zamanda veri sağlayıcısı, enerji üreticisi ve talep dengeleyicisi rolünü üstlenebilmektedir. Ayrıca dijitalleşme, enerji güvenliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Siber güvenlik, veri bütünlüğü, kritik altyapıların dijital korunması ve hızlı müdahale kapasitesi gibi alanlar, modern enerji sistemlerinin güvenli işleyişi için vazgeçilmez hâle gelmiştir. Avrupa Komisyonu’nun “Digitalising the Energy Sector” girişimi, bu bağlamda hem teknolojik gelişmelerin hem de

güvenlik risklerinin entegre şekilde yönetilmesini önermekte; regülasyonların bu çok katmanlı sürece uygun olarak yeniden şekillendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. (Energy Sustainability Directory, 2025)

Bu bağlamda, farklı sektörlerde yapay zeka teknolojilerinin kullanım oranlarını incelemek, dijital dönüşümün sektörel yaygınlığı hakkında daha derinlemesine bir değerlendirme imkanı sunmaktadır. Bu karşılaştırma, hangi sektörlerin dijitalleşme sürecinde öncü konumda olduğunu, hangilerinin ise teknolojik adaptasyon sürecinde geriden geldiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, politika yapıcılar için sektörel önceliklerin belirlenmesinde veri temelli bir dayanak sağlamaktadır.



Şekil 2.1: Sektörlere göre yapay zekâ teknolojilerini kullanan işletmeler, AB, 2024

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere, yapay zeka kullanımının en yüksek olduğu alanlar profesyonel, bilimsel ve teknik hizmetler ile bilgi ve iletişim sektörü olduğu belirlenmiş, geleneksel imalat ve inşaat gibi sektörlerde kullanım oranlarının ise görece düşük seviyelerde kaldığı araştırmalar sonucunda elde edilmiştir. (Eurostat,2024)

Bu durum teknolojiye dayalı üretim ve hizmet sektörlerinin dijital dönüşüm sürecinde daha hızlı ilerlediğini ortaya koymaktadır. Düşük kullanım oranlarına sahip sektörler ise altyapı yatırımlarını artırarak, dijital becerilerin geliştirilmesi ve inovatif çözümlerin teşvik edilmesi yoluyla bu farkı kapatabilir. Böylece tüm sektörlerde dijitalleşmenin dengeli bir biçimde yaygınlaşması, ulusal ölçekte rekabet gücünü artıracaktır.

Sonuç olarak, dijitalleşme yalnızca bir teknolojik entegrasyon süreci değil; aynı zamanda enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik, güvenlik ve erişilebilirlik hedeflerine ulaşmasında stratejik bir kaldıraç görevi görmektedir.

Yapay zeka ve diğer dijital teknolojilerin farklı sektörlerdeki yaygınlık düzeyleri, dijital dönüşümün ulusal ölçekte dengeli ilerlemesi için sektörel odaklanmanın önemini ortaya koymaktadır.

Altyapı yatırımlarının artırılması, dijital becerilerin geliştirilmesi, veri odaklı karar alma mekanizmalarının güçlendirilmesi ve yenilikçi çözümlerin teşvik edilmesi, Türkiye'nin küresel enerji dönüşüm sürecinde rekabet avantajı elde edilmesini sağlayacak temel adımlar olarak öne çıkmaktadır. Dijital dönüşüm vizyonunu enerji politikalarının merkezine yerleştiren ülkeler, küresel enerji dönüşüm sürecinde önemli bir rekabet avantajı elde etmektedir.

## **2.2. Uluslararası Entegre Yaklaşımlar: Almanya, Güney Kore, Hollanda ve Diğer Başarılı Uygulamalar**

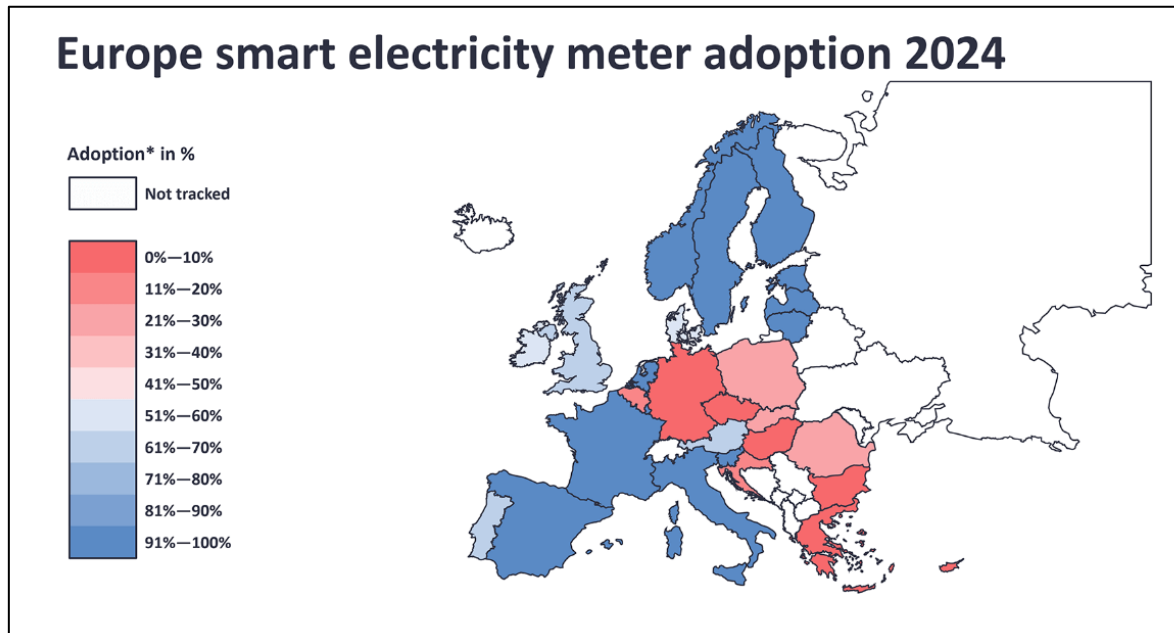
Enerji sektöründe dijitalleşmeyi sistematik biçimde yürüten ülkeler, yalnızca teknolojik üstünlük sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda sistem esnekliği, arz güvenliği, kullanıcı memnuniyeti ve sürdürülebilirlik hedeflerine bütüncül çözümler sunmaktadır. Almanya, Güney Kore ve Hollanda bu konuda öncü ülkeler arasında yer almakta; çeşitli politika araçları ve dijital teknolojiler aracılığıyla sektör dönüşümünü hızlandırmaktadır.

Almanya, "Energiewende" (Enerji Dönüşümü) politikası doğrultusunda akıllı sayaçlar, uzaktan kontrol sistemleri ve dağıtık üretim modellerini kırsal alanlara kadar yaygınlaştırmıştır. Ülke, enerji verisi yönetimini merkezi şebeke kontrol sistemleriyle entegre ederek özellikle şebeke dengelemesi, arz-talep optimizasyonu ve yenilenebilir kaynak entegrasyonunda önemli başarılar elde etmiştir. Ayrıca Almanya, Avrupa Birliği'nin Clean Energy Package kapsamında dijital altyapıyı enerji verimliliği ile doğrudan ilişkilendirmiştir.

Güney Kore, "Digital New Deal" stratejisi kapsamında enerji sektörünü 5G tabanlı haberleşme sistemleri, gerçek zamanlı izleme platformları ve yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri ile donatmıştır. KOGAS ve KEPCO gibi büyük kamu kuruluşları, tüketici taleplerini anlık takip eden algoritmalar sayesinde enerji üretim planlarını optimize etmekte; aynı zamanda enerji depolama sistemlerini yapay zekâ destekli karar destek araçlarıyla entegre etmektedir. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), 2023)

Hollanda, dağıtık enerji kaynaklarını blockchain tabanlı mikro şebekelerle entegre eden ilk Avrupa ülkelerindendir. “PowerMatcher” ve “USEF” platformları gibi dijital çözümler aracılığıyla, bireysel tüketiciler aynı zamanda üretici konumuna gelmiş ve yerel enerji paylaşımı mümkün hâle gelmiştir. Hollanda ayrıca, dijital ikiz teknolojisini yenilenebilir santrallerin performans izleme sistemlerine entegre ederek bakım maliyetlerini azaltmış ve arıza risklerini öngörülebilir hâle getirmiştir.

İtalya, “Open Meter” projesi ile 30 milyondan fazla akıllı sayacı ulusal ölçekte devreye almış ve tüketici verisi ile enerji verimliliği hedeflerini doğrudan ilişkilendirmiştir.



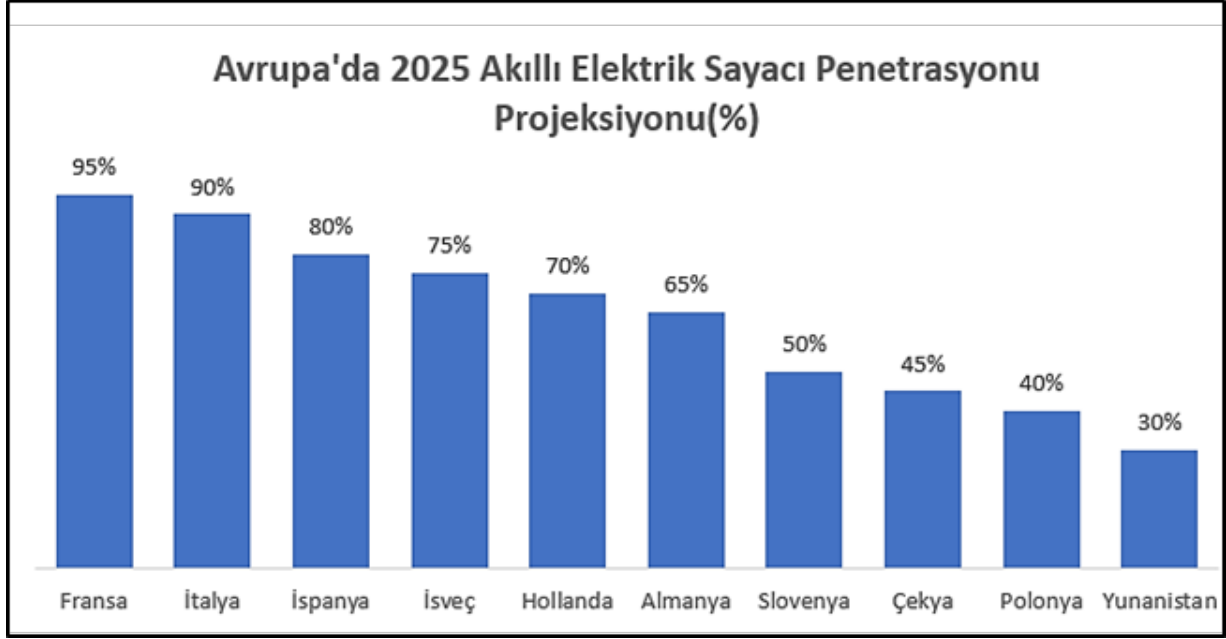
Şekil 2.2: Avrupa 2024 yılı Akıllı Elektrik Sayacı Penetrasyonu İstatistikleri

Avrupa ülkeleri, enerji altyapısını dijitalleştirme yolunda önemli adımlar atarken, akıllı sayaç uygulamalarının yaygınlaşma düzeylerinde belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır. Bu farklılıkların analiz edilmesi, bölgesel dijitalleşme seviyelerinin dağılımı üzerinde etkilidir. Bu doğrultuda, Avrupa ülkelerinde dijital enerji altyapılarının modernizasyonu, yalnızca üretim ve iletim ağlarının yenilenmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda akıllı sayaçlar, dağıtık üretim izleme sistemleri, veri merkezleri, SCADA ve IoT tabanlı enerji yönetim platformlarının yaygınlaştırılmasını da içermektedir. Avrupa Komisyonu’nun “Digitalising the Energy System” girişimi kapsamında yürütülen projeler, üye ülkelerde şebeke esnekliği, veri güvenliği ve operasyonel izlenebilirliğin artırılmasını hedeflemektedir. Bu projeler sayesinde birçok ülkede gerçek zamanlı veri takibi, talep yanıt mekanizmaları ve yapay zekâ destekli enerji tahmin sistemleri aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece dijital altyapı yatırımları, Avrupa



enerji piyasalarının entegre, şeffaf ve düşük karbonlu bir yapıya dönüşmesinde kilit rol oynamaktadır.

Bu kapsamda, Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi Batı Avrupa ülkeleri, erken başlattıkları kapsamlı yatırımlar ve ulusal ölçekli projeler sayesinde akıllı sayaç adaptasyonu yüksek oranlara ulaşmıştır. (IoT Analytics Research,2024)



Şekil 2.3: Avrupa 2025 Yılı Akıllı Elektrik Sayacı İstatistiği

Özellikle Fransa ve İtalya gibi ülkeler Şekil 2.3’te yer alan tabloda da belirtildiği gibi, tamamlanma aşamasına yaklaşan ulusal ölçekli projeleriyle kıtada lider konumundadır. Kuzey Avrupa ülkeleri ise uzun süredir devam eden dijitalleşme politikaları sayesinde yüksek penetrasyon oranlarını korumaktadır. Orta Avrupa’da devam eden orta vadeli planlar, dengeli bir büyümeyi işaret ederken, bazı Doğu Avrupa ülkelerinde pilot uygulamalar ve altyapı çalışmalarının ise devam ettiği görülmektedir. Enerji dönüşümünde kritik rol oynayan bu teknolojinin yaygınlaşması, ülkelerin enerji verimliliği hedefleri ve sürdürülebilirlik stratejileriyle doğrudan bağlantılı olarak şekillenmektedir. (CB Dijital Dönüşüm Ofisi, 2021)

Avustralya, “Virtual Power Plant (VPP)” girişimleriyle ev tipi bataryaları ve fotovoltaik sistemleri dijital ağlar aracılığıyla yöneten platformlar kurmuştur. Japonya, enerji talep tahmin modellerinde kuantum hesaplama ile desteklenen yapay zekâ çözümlerini devreye alarak enerji ticareti ve üretim planlamasında devrim niteliğinde adımlar atmıştır. İsveç, SCADA sistemleri ile enerji arz-talep senaryolarını optimize ederken; veri şeffaflığını teşvik eden açık platformlar ile tüketiciye doğrudan bilgi sunmaktadır.

Bu örnekler, dijitalleşmenin sadece teknik altyapıdan ibaret olmadığını; aynı zamanda regülasyon, kullanıcı davranışı ve finansal modellerin de dönüşümünü kapsayan çok katmanlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin bu örneklerden öğreneceği çok sayıda stratejik uygulama bulunmakta olup, özellikle kırsal yayılım, veri yönetimi standartları, yapay zekâ tabanlı planlama sistemleri ve enerji depolama entegrasyonları gibi alanlarda bu uygulamaların dikkate alınması önem arz etmektedir.

### **2.3. Türkiye'nin Genel Dijitalleşme Düzey ve Uluslararası Konumlandırılması**

Türkiye, enerji sektöründeki dijitalleşme sürecini yalnızca teknolojik bir modernizasyon aracı olarak değil; aynı zamanda ulusal kalkınma, enerji arz güvenliği, iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilirlik hedeflerinin temel bileşenlerinden biri olarak konumlandırmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, Türkiye'nin enerji politikalarında dijitalleşmeyi stratejik bir kaldıraç olarak değerlendirdiğini göstermektedir.

Bu doğrultuda, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023–2027 Stratejik Planı'nda dijital dönüşüm, doğrudan politika hedefi olarak tanımlanmış; uygulamaya dönük birçok somut adım öngörülmüştür. Akıllı sayaçların yaygınlaştırılması, SCADA sistemlerinin genişletilmesi, otomatik arıza tespit teknolojileri, uzaktan izleme çözümleri ve üretim planlama yazılımları gibi dijital uygulamalar, enerji altyapılarının verimliliğini ve esnekliğini artırmayı hedeflemektedir.

Bu dönüşümde kamu kurumları kilit rol üstlenmektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ), dijital altyapıların entegrasyonu, veri analitiğine dayalı planlama, akıllı şebeke yönetimi ve piyasa şeffaflığı alanlarında dikkat çeken uygulamalar gerçekleştirmektedir. Özellikle EPIAŞ tarafından geliştirilen Şeffaflık Platformu, elektrik piyasasındaki arz-talep dengesi, fiyat oluşumu ve üretim/ithalat verilerinin anlık ve kamuya açık şekilde sunulmasıyla veri temelli piyasa yönetimini kurumsallaştırmıştır. TEİAŞ ise, yapay zekâ destekli tahminleme modelleriyle iletim sistemi dengesini sağlamak ve sistem güvenliğini artırmayı amaçlamaktadır. Özel sektör aktörleri de bu dijital dönüşüm sürecinin etkin katılımcılarıdır. Dijital ikiz teknolojileri, mobil saha yönetim sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyon çözümleri ve elektrikli araç şarj altyapılarının dijital sistemlerle entegrasyonu gibi alanlarda geliştirilen yenilikçi uygulamalar, sektörün dönüşüm hızını artırmaktadır. Aynı zamanda kullanıcı odaklı veri analizleriyle talep yönetimi stratejileri geliştirilmekte ve dijital platformlar üzerinden etkileşimli hizmet sunumları yaygınlaşmaktadır. Enerji üretim tesislerinde bakım

verimliliğini artırmaya ve üretim sürekliliğini sağlamaya yönelik dijital ikiz yatırımları da bu kapsamda önem taşımaktadır. Özellikle hidrojen ve yenilenebilir kaynaklara dayalı üretim altyapılarının dijital sistemlerle entegre edilmesi, Türkiye'nin yeşil dijital dönüşüm hedefleriyle uyumlu bir gelişimdir. Bununla birlikte, start-up girişimciliği de dijital enerji çözümleri alanında ivme kazanmıştır. Akıllı ev otomasyon sistemlerinden blockchain tabanlı mikro şebeke yönetimine, yapay zekâ temelli enerji tahmin etme yazılımlarından enerji ticareti platformlarına kadar birçok yenilikçi ürün geliştiren girişimler, enerji ekosisteminin çeşitlenmesine ve hızla dijitalleşmesine katkı sunmaktadır.

Türkiye'deki dijitalleşme süreci yalnızca teknolojik gelişmelere dayanmakla kalmayıp, kamu destek programları, araştırma fonları ve politika belgeleriyle de kurumsal düzeyde desteklenmektedir. TÜBİTAK, BTK ve Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi koordinasyonunda yayımlanan Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi (2021–2025), altyapı yoğun sektörlerde yapay zekâ temelli çözümlerin yaygınlaştırılmasını hedeflemekte ve enerji sektörü bu stratejinin uygulama alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, enerji talep tahmini, sistem optimizasyonu ve arz güvenliği planlamalarında ileri analitik sistemlerin kullanımı teşvik edilmektedir.

Ancak bu gelişmelere karşın, dijital altyapının ülke genelinde homojen olarak yaygınlaşmadığı görülmektedir. Özellikle kırsal bölgelerde veri iletim altyapısının yetersizliği, akıllı sayaç penetrasyonunun düşüklüğü ve otomasyon sistemlerinin sınırlı uygulanabilirliği, dijital dönüşümün bölgesel düzeyde farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu durum, sistem esnekliği, arz güvenliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında bölgesel eşitsizlikleri gündeme getirmektedir. Ayrıca, siber güvenlik ve veri yönetişimi alanlarında önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, Avrupa Birliği ülkeleriyle kıyaslandığında mevzuat yapısı, teknik yetkinlikler ve kurumlar arası koordinasyon düzeyi açısından bazı yapısal farklılıklar devam etmektedir.

Tüm bu unsurlar ışığında, Türkiye'nin dijital enerji dönüşümünü sürdürülebilir, kapsayıcı ve küresel ölçekte rekabetçi bir düzeye taşıyabilmesi için bir dizi stratejik yönelimin hayata geçirilmesi önem arz etmektedir. Öncelikle, dijital teknolojilere uyumlu bir regülasyon altyapısının oluşturulması ve mevcut mevzuatın yenilikçi çözümleri teşvik edecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Bu sayede, dijital dönüşümün hukuki ve idari temeli güçlendirilmiş olacaktır. Bununla birlikte, kamu-özel sektör iş birliğinin daha sistematik ve verimli bir yapıya kavuşturulması, dijitalleşme süreçlerinin hızlanmasına ve kaynakların daha etkin kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

### **3. TÜRKİYE’DE ENERJİ SEKTÖRÜNDE DİJİTALLEŞMENİN GENEL GÖRÜNÜMÜ**

#### **3.1. Politikalar, Kurumsal ve Stratejik Yapılar**

Türkiye, enerji sektöründe dijital dönüşüm yolculuğunda önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da, sürecin daha derinlemesine ve sürdürülebilir biçimde ilerleyebilmesi için bazı yapısal ve operasyonel alanlarda gelişim ihtiyacı sürmektedir. Bu gelişim alanları, yalnızca mevcut eksiklikleri gidermek amacıyla değil; aynı zamanda Türkiye’nin bölgesel enerji merkezi olma hedefiyle dijital kapasitesini küresel standartlarla uyumlu hâle getirmesi açısından stratejik önem taşımaktadır.

Öncelikli olarak, dijital altyapının coğrafi yaygınlığı güçlendirilmelidir. Büyükşehirlerde yoğunlaşan veri iletimi ve akıllı sistem uygulamaları, kırsal ve yarı kırsal bölgelerde sınırlı düzeyde hayata geçirilebilmekte, bu da sistem genelinde homojen bir dijitalleşme düzeyinin oluşmasını engellemektedir. Kırsal bölgelere yönelik yüksek kapasiteli iletişim altyapılarının tesis edilmesi ve akıllı sayaç penetrasyonunun artırılması, enerji verimliliği ve arz güvenliği açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Bununla birlikte, artan dijitalleşme oranı enerji sektöründe siber güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir. Bu çerçevede, mevcut siber güvenlik stratejilerinin enerji sektörü özelinde detaylandırılması ve enerji veri yönetişimine ilişkin ulusal standartların belirlenmesi kritik bir ihtiyaçtır. Enerji sistemlerinin kesintisiz çalışmasını sağlamak adına, hem kamu hem özel sektör düzeyinde kapsayıcı güvenlik protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Türkiye’nin yerli ve milli teknoloji üretim kapasitesinin artırılması da dijital dönüşümün stratejik bir parçası olmalıdır. Yapay zekâ, dijital ikiz, büyük veri analitiği ve blokzincir gibi öncü teknolojilerde yerli çözümlerin geliştirilmesi; yalnızca dışa bağımlılığın azaltılmasına değil, aynı zamanda bölgesel teknoloji ihracatının teşvik edilmesine de katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, Ar-Ge teşviklerinin dijital enerji teknolojilerine yönlendirilmesi önem arz etmektedir.

Dijitalleşmenin başarısı yalnızca teknolojiye değil, aynı zamanda bu teknolojileri geliştirecek ve yönetecek insan kaynağına bağlıdır. Bu nedenle, üniversitelerle sektör arasında güçlü iş birlikleri kurulmalı; teknik eğitim, lisansüstü programlar ve uygulamalı sertifikasyon sistemleri aracılığıyla dijital enerji alanında uzman kadrolar yetiştirilmelidir. Ayrıca, kamu çalışanları için

sürekli mesleki gelişim programları oluşturulması, politika ve uygulama arasındaki koordinasyonu güçlendirecektir.

Son olarak, Türkiye'nin küresel dijital enerji dönüşümüne etkin biçimde entegre olabilmesi için uluslararası iş birliklerini güçlendirmesi gerekmektedir. Avrupa Birliği'nin "Digitalisation of Energy Action Plan", Uluslararası Enerji Ajansı'nın "Digital Demand-Driven Electricity Systems" gibi programlarına aktif katılım; teknoloji transferi, politika uyumu ve iyi uygulama örneklerinden faydalanma açısından stratejik fırsatlar sunmaktadır.

Bu çerçevede, Türkiye'nin dijital enerji dönüşümünü sürdürülebilir ve kapsayıcı bir biçimde ilerletebilmesi; çok katmanlı bir yaklaşım benimsemesine, stratejik uyum kapasitesini artırmasına ve dijitalleşmeyi sadece bir teknoloji yatırımı değil, aynı zamanda sistemsel dönüşüm aracı olarak görmesine bağlıdır.

### **3.2. Teknolojik Yatırımların Yaygınlığı ve Altyapı Dağılımı**

Türkiye'de enerji sektöründe dijital teknolojilere yönelik yatırımlar, iletim ve dağıtım altyapılarında bölgesel düzeyde farklılıklar göstermekte ve bu yatırımların yaygınlığı, kurumların dijital olgunluk düzeyine göre değişiklikler arz etmektedir (IEA, 2023). Son yıllarda TEİAŞ, EÜAŞ ve TEDAŞ gibi kamu kurumlarının koordinasyonunda yürütülen projelerle birlikte, veri odaklı sistemlerin entegrasyonu ivme kazanmıştır (ETKB, 2023). Bu kapsamda, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından hayata geçirilen "SCADA/EMS Sisteminin İletişim ve Ağ Yapısının Yenilenmesi Projesi" ve Dünya Bankası destekli "İletim Sisteminin Dönüştürülmesi Projesi (İSDP)", gibi projeler, ülke genelinde iletim altyapısının dijitalleştirilmesine yönelik önemli katkılar sağlamıştır. Bununla birlikte, bu dönüşümün coğrafi dağılımı ve altyapı kapasitelerinin homojen olmaması, TEİAŞ tarafından planlanan İletim Sisteminin Dönüştürülmesi Projesi (İSDP) Dünya Bankası finansmanı ile desteği ile öncelikli bölgelerde yoğunlaştırılmasına neden olmaktadır (TEİAŞ & Dünya Bankası, 2024).

Proje kapsamında, ülke genelinde yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması amacıyla elektrik iletim şebekesine entegrasyonun sağlanması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji santrallerinin şebekeye bağlanmasını kolaylaştırmak, iletim ve dağıtım güvenilirliğini artırmak, enterkonnekte sistem esnekliğini güçlendirmek, şebeke yönetim ve işletim süreçlerini optimize etmek ve kriz yönetimi ile afet sonrası toparlanma kapasitesini iyileştirmek öncelikli hedefler arasında yer almaktadır (IEA, 2023). Bu kapsam doğrultusunda şebeke güvenilirliği ile dayanıklılığını artırmak için iletim şebekesinin güçlendirilmesi, şebeke yönetimini ve



işletimini güçlendirmek ve yenilenebilir enerjinin entegrasyonunu desteklemek için dijitalleşme, geçişe hazırlık için kapasite geliştirme konusunda teknik yardım olmak üzere sırası ile üç ana hedef bileşenden oluşmaktadır (CB Dijital Dönüşüm Ofisi, 2021). İlk bileşen olan iletim şebekesinin güçlendirilmesi için hedeflenen yol, VRE ölçeğini kolaylaştırmak, VRE güvenilirliğini ve dayanıklılığını artırmak için iletim şebekesinin güçlendirilmesi ve bu doğrultuda 672 milyon ABD doları yatırım yapılmasının planlandığı belirtilmiştir. Bu adım, şebekeyi güçlendirerek ve modernize edecek ve iletim sisteminin güvenilirliğini ve dayanıklılığını artırmayı amaçlamaktadır. VRE projelerinin dağıtımını geciktirebilecek veya yüksek düzeyde kısıtlamaya yol açabilecek acil ve yerel şebeke kısıtlamalarının da gözönüne alındığı belirtilmiştir. Diğer yeni ve yenilenmiş trafo merkezleri de yenilenebilir enerjinin iletimini sağlayacak ve VRE kısıtlamasını en aza indirecek şekilde planlanmıştır. Bu trafo merkezleri Gaz Yalıtımlı Şalt Cihazı (GIS) ve Trafo Merkezi Otomasyon Sistemi (SAS) gibi yeni teknolojilerden yararlanacak ve yeni 400 ve 154 kV yer altı kablolarının ve 154 kV havai iletim hatlarının inşasını finanse edecektir. Yeni yer altı kabloları, yalnızca TEİAŞ için arıza tespiti ve dahili telekomünikasyon için değil, aynı zamanda potansiyel olarak üçüncü taraf kullanımı için de kullanılacak olan optik fiber kablo ile donatılması planlanmaktadır. Bu yatırımlar, yenilenebilir enerjinin artan payıyla üretim karışımıyla üretilen temiz elektriğin sakinlere ve endüstrilere ulaştırılması yoluyla artan talebi karşılamak için kritik öneme sahiptir (IEA, 2023).

Şebeke işletim ve yönetimini güçlendirmek için dijitalleştirme ve VRE entegrasyonu için ise planlanan 76 milyon ABD dolarlık bir yatırım olduğu belirtilmiş ve bu ikinci bileşen, şebekeyi dijitalleştirmeyi ve şebeke yönetimini ve operasyonlarını kolaylaştırmak için yeni dijital araçların benimsenmesiyle TEİAŞ'ı desteklemeyi amaçlamıştır (TEİAŞ & Dünya Bankası, 2024).

Proje içeriğinde ise, TEİAŞ'ın Gözetim Kontrol ve Veri Toplama (SCADA)/Enerji Yönetim Sisteminin (EMS) güçlendirilmesi ve kritik 400kV trafo merkezleri için Seri Kapasitör Kompansatörünün (SCC) yükseltilmesi/kurulumu yoluyla otomatik uzaktan reaktif güç yönetimini kapsamaktadır. SCADA/EMS yükseltilmesi aracılığıyla, TEİAŞ için hızla artan bir VRE payıyla güç sistemlerini yönetmelerine yardımcı olacak son teknoloji bir dijital EMS yazılımı tanıtılması planlanmaktadır (TEİAŞ & Dünya Bankası, 2024). Önerilen SCC'ler, TEİAŞ'ın iletim kapasitesini ve şebeke istikrarını artırma teknolojisiyle uzun mesafe iletim hatlarındaki talep merkezlerine yenilenebilir kaynaklardan daha fazla enerji iletmesine olanak tanıyacaktır. Ekipman tamamen otomatik olacak ve uzaktan kontrol edilecektir. Son bileşen ise,

geçişe hazırlanmak için kapasite oluşturma konusunda teknik yardım olup hedeflenen yatırım 2 milyon ABD doları olarak belirtilmiştir. Bu bileşen, TEİAŞ'ın devletin enerji hedeflerine sorunsuz bir şekilde ulaşması için gerekli kapasiteleri ve süreçleri oluşturmalarını desteklemeyi amaçlamaktadır (IEA, 2023).



Şekil 3.1: Potansiyel Alt Proje İlleri (ETKB, 2023)

Türkiye’de gerçekleşmesi planlanan bu projelerin hangi illerde olacağı ile ilgili detaylar ise Şekil 3.1’de yer alan haritada gösterilmiştir.

Harita verilerine göre İstanbul, Bursa, Çanakkale, Kocaeli, İzmir, Ankara, Aksaray, Samsun, Şanlıurfa, Kahramanmaraş, Gaziantep, Mersin, Hatay, Antalya, Edirne, Tekirdağ, Muğla, Kastamonu illerinde uygulanması planlanmaktadır.



Şekil 3.2: Tahmini proje sayılarının illere göre dağılımı (ETKB, 2023)

Türkiye yapılacak projelerin tahmini sayıları ile ilgili detaylar Şekil 3.2’de yer alan haritada gösterilmiştir. Harita verilerine göre en çok projenin İstanbul ve İzmir bölgeleri başta olmak üzere Türkiye’nin birçok bölgesinde yapılması planlanmaktadır.

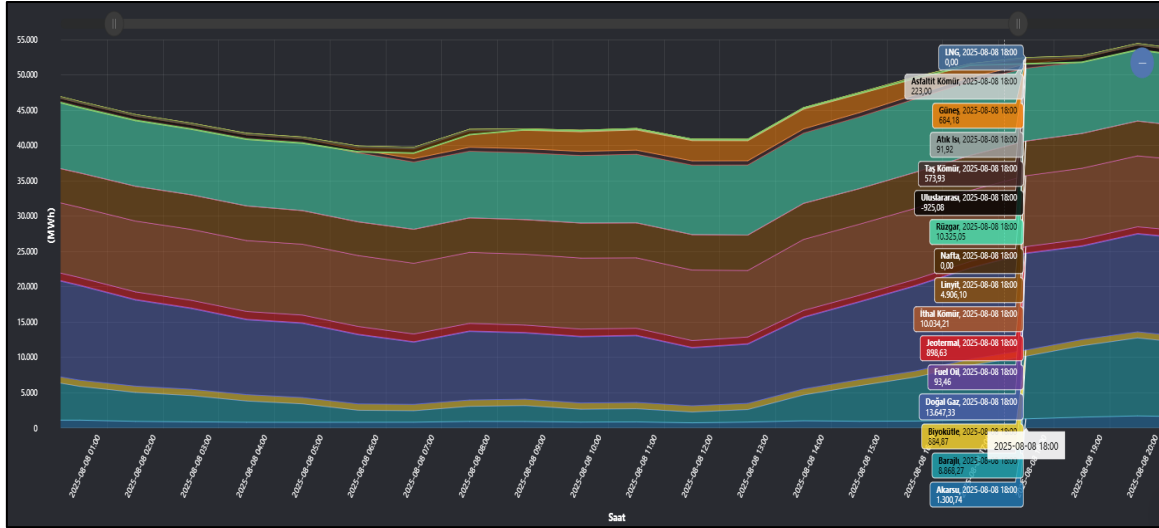
Bunun yan sıra, iletim sistemleri kapsamında, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından geliştirilen Ulusal SCADA/EMS sisteminin merkezileştirilmesi ve ülke geneline yayılması, iletim düzeyinde dijital izleme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır (TEİAŞ & Dünya Bankası, 2024). Bu kapsamda, “Milli Yük Tevzi SCADA/EMS Sistemi” ile üretim tesisleri ve yük tevzi merkezleri arasındaki veri alışverişi güvenli ve sürekli hale getirilmiştir. Ancak bazı trafo merkezlerinde hâlâ analog sistemler kullanılmakta ve veri akış sürekliliğinde bölgesel kopukluklar yaşanmaktadır.

Dağıtım tarafında, dağıtım şirketlerine bağlı olarak kurulan Dağıtım Yönetim Sistemleri (DMS) ve Uzaktan Sayaç Okuma Sistemleri (AMR/AMI) gibi çözümler, büyükşehirlerde ve sanayi bölgelerinde yaygınlaşmıştır.

Marmara ve Ege bölgelerindeki dağıtım bölgelerinde bu sistemlerin kapsama oranı oldukça yüksekken, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde bu oran daha sınırlıdır. Örneğin, büyükşehirlerdeki birçok alçak gerilim abonesi uzaktan sayaç okuma sistemine entegre iken, bazı kırsal bölgelerde hâlâ manuel sayaç okuma süreçleri devam etmektedir. TEDAŞ’ın 2022 yılında kamuya açıkladığı dijital dönüşüm yol haritası kapsamında, dağıtım şebekelerinde dijital sistem geçişi hızlandırılmaya çalışılmaktadır (TEDAŞ, 2022).

Yenilenebilir enerji santrallerinde ise SCADA sistemleri, performans izleme yazılımları ve kestirimci bakım algoritmaları sayesinde üretim süreçleri daha verimli hâle getirilmektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr santrallerinde üretim verimliliği, yapay zekâ destekli analizlerle artırılmakta; enerji tahmin modelleri geliştirilmektedir (IEA, 2023). Ancak bu verilerin merkezi sistemlerle bütünleşmesi sınırlı düzeyde gerçekleşmektedir.

Dağıtık üretim kaynaklarının (güneş enerjisi, biyokütle, küçük HES) dijital olarak izlenmesi konusunda henüz ulusal düzeyde tekil bir veri havuzu bulunmamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla EPIAŞ tarafından geliştirilen Şeffaflık Platformu ve Tahmin Hizmetleri Portalı, üretim verilerini daha erişilebilir ve analiz edilebilir hale getirmeye yönelik önemli dijital uygulamalardır (EPIAŞ, 2024).



Şekil 3.3: Kaynaklara Göre Türkiye Gerçek Zamanlı Üretim

Şekil 3.3’de sunulan grafik, Türkiye’nin elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının yıllara göre dağılımını ve zamana bağlı değişim eğilimlerini göstermektedir. Grafik, fosil yakıtların (taşkömürü, linyit, doğal gaz ve petrol türevleri) toplam üretim içindeki payının hâlen yüksek olmakla birlikte, son on yılda kademeli olarak azalma eğilimine girdiğini ortaya koymaktadır. Buna paralel olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının — özellikle hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi — üretim portföyündeki payının belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu eğilim, Türkiye’nin enerji arzında kaynak çeşitliliğini artırma, karbon salınımlarını azaltma ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yönünde önemli bir yapısal dönüşüm yaşadığını göstermektedir. Ayrıca, grafikteki eğrilerin yakınsama ve ayrışma noktaları, enerji piyasasında arz güvenliği ile çevresel hedeflerin dengelenmesi sürecinde kritik eşikleri işaret etmektedir (IEA, 2023).

Enerji verimliliği ve yönetim uygulamalarında, kamuya ait binalarda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sistemine dayalı dijital izleme mekanizmaları kısmen uygulanmakta olup, birçok kamu binasında gerçek zamanlı tüketim takibi yapılmamaktadır. Bununla birlikte, bazı kamu hastaneleri, eğitim kurumları ve hizmet binalarında otomasyon sistemleriyle entegre enerji yönetim yazılımlarının kurulu olduğu görülmektedir (IEA, 2023). EÜAŞ’ın “Enerji Yönetim Sistemi ve Otomasyon Projesi” kapsamında pilot uygulamalarla kamu binalarında dijital kontrol altyapısı kurulmaya başlanmıştır (EUAŞ, 2023).

Türkiye genelindeki güncel gözlemler, enerji sektöründe dijital altyapı yatırımlarının bölgesel olarak belirgin şekilde farklılaştığını göstermektedir. Marmara, Ege ve İç Anadolu gibi batı bölgelerinde kamu kurumları ve dağıtım şirketleri; santral üretimlerinin anlık ve güvenilir

dijital izlenmesi ile elektrik tüketiminin ölçüm-analitiğe dayalı yönetimi için veri izleme, otomasyon ve talep yönetimi sistemlerini büyük ölçüde entegre etmiş durumdadır. Özellikle Ankara, Bursa ve İzmir çevresindeki organize sanayi bölgelerinde, üretim-tüketim dengesinin optimizasyonuna yönelik dijital izleme uygulamaları yaygınlaşmıştır (IEA, 2023).

Buna karşın Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da, dijital izleme sistemlerinin sağlıklı çalışması için kritik olan fiber optik ve iletişim şebekelerinde süreklilik/kapasite yetersizlikleri görülmekte; bu da veri haberleşmesi, uzaktan izleme ve sistemler arası veri alışverişinde kesintilere yol açarak entegrasyon kabiliyetini sınırlamaktadır. Kırsal alanlarda ise dağıtım altyapısına entegre veri toplama ve telemetri çözümlerinin yaygınlaştırılması, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve internet bağlantı kalitesindeki sorunlar nedeniyle yavaş ilerlemektedir.

Bu çerçevede, dijital dönüşümün yalnızca belirli bölgelerde yoğunlaşmaması; ülke genelinde kapsayıcı, birlikte çalışabilir ve yerli teknoloji temelli bir altyapı modeliyle, özellikle de sağlam ve kesintisiz internet/iletişim omurgası üzerine inşa edilerek yaygınlaştırılmasının stratejik bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır.

## 4. TÜRKİYE’NİN DİJİTAL ENERJİ EKOSİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ

### 4.1. Dijital Teknolojilerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları

#### 4.1.1. Yenilenebilir Enerji ve Depolama Sistemlerinin Dijital Entegrasyonu

Yenilenebilir enerji sektörü, küresel enerji dönüşümünde önemli bir rol oynamakta olup, teknoloji ve dijitalleşme bu dönüşümün hızlanmasında belirleyici faktörler arasında yer almaktadır. Teknolojik yenilikler ve dijital çözümler, enerjinin üretiminden tüketimine kadar her aşamada daha verimli, sürdürülebilir ve esnek sistemlerin kurulmasına olanak tanımaktadır.

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir kullanımı amacıyla kamu kurumları çeşitli dijitalleşme projeleri yürütmektedir. Bu projeler, enerji üretiminden iletimine, dağıtımından tüketimine kadar tüm süreçlerde dijital teknolojilerin entegrasyonunu sağlamayı hedeflemektedir. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) tarafından geliştirilen Şeffaflık Platformu ve Veri Analitiği Portalı, enerji piyasasına dair verilerin gerçek zamanlı olarak sunulmasını sağlayarak piyasaların daha şeffaf, güvenilir ve etkin işlemesine imkân tanımaktadır.

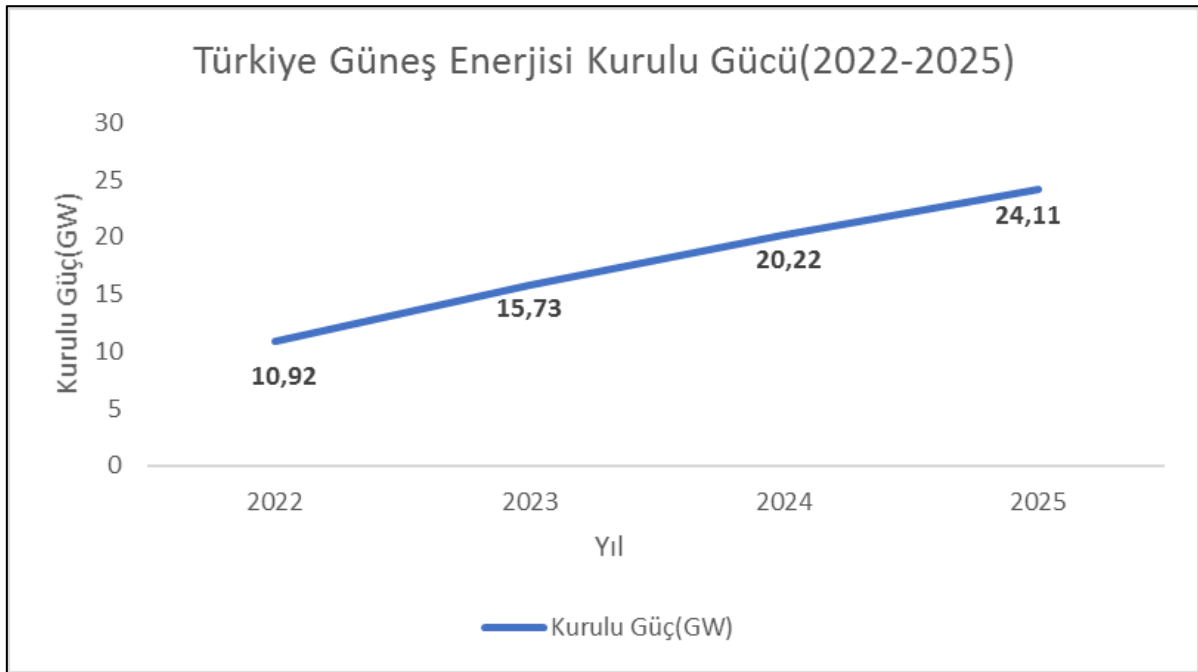
Bu platformlar, üretim-tüketim dengesi analizlerinden karbon emisyon hesaplamalarına kadar pek çok alanda yapay zekâ destekli modellemeler yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, 2024 yılında başlatılan Veri Gölü Projesi ile enerji verilerinin büyük veri altyapısıyla merkezi olarak toplanması ve makine öğrenmesi modelleriyle analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Türkiye’nin güneş enerjisinde dijitalleşme odaklı yatırımları, yalnızca uluslararası raporların teorik değerlendirmeleriyle sınırlı kalmayıp, kurulu güç verilerinde de net biçimde görülmektedir. 2022–2025 döneminde güneş enerjisi kapasitesindeki hızlı artış, dijital altyapı yatırımlarının, YEKA projelerinin ve özel sektör girişimlerinin fiili etkisini ortaya koymaktadır.

Özellikle dağıtık üretim sistemlerine geçişte dijital altyapının sağladığı veri yönetimi, şebeke optimizasyonu ve gerçek zamanlı izleme yetenekleri hem üretim verimliliğini hem de piyasa etkinliğini güçlendirmektedir. Türkiye’de enerji sektöründe dijital şebeke yönetimine yönelik altyapı yatırımları, TEİAŞ, TEDAŞ ve EPIAŞ koordinasyonunda yürütülen projeler aracılığıyla hızla ilerlemektedir.



Bu projeler, SCADA ve enerji yönetim sistemlerinin (EMS) modernizasyonunu, akıllı sayaçlardan elde edilen verilerin anlık işlenmesini, kestirimci bakım algoritmalarının uygulanmasını ve arz-talep dengesinin yapay zekâ destekli modellenmesini kapsamaktadır. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) tarafından işletilen veri analitiği platformu ve şeffaflık portalı, piyasa oyuncularına üretim ve tüketim verilerini gerçek zamanlı olarak izleme olanağı sunarak operasyonel şeffaflığı güçlendirmektedir. Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) projelerinde ise, performans ölçüm ve izleme sistemlerinin dijital ortama taşınmasıyla birlikte üretim verimliliği, yatırım planlaması ve izleme süreçlerinde standartlaşma sağlanmıştır. Böylece dijital altyapı, Türkiye'nin enerji arz güvenliği, sistem esnekliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlayan stratejik bir unsur haline gelmiştir.



Şekil 4.1: Türkiye Güneş Enerjisi Kurulu Gücü (YTBS, TEİAŞ)

Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere, 2022’de 10,92 GW seviyesinde olan güneş enerjisi kurulu gücünün, 2025 yılı 30 Eylül itibari ile 24,11 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu artış eğilimi, dijitalleşme temelli izleme, planlama ve kontrol mekanizmalarının enerji yatırımlarının hızını artırmadaki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu büyüme trendi, yalnızca kurulu güç artışıyla sınırlı olmayıp, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam arz içindeki payını yükseltme stratejisinin somut bir göstergesidir.

Program, dağıtık batarya enerji depolama pilot uygulamaları ile entegre tasarlanmış olup; enerji güvenliğini artırma, fosil yakıt bağımlılığını azaltma, yerel istihdam yaratma, tüketici elektrik

maliyetlerini düşürme, piyasa şeffaflığını güçlendirme, arz-talep dengesini daha etkin yönetme ve yatırımcı güvenini pekiştirme gibi çok boyutlu faydalar sağlamaktadır.

Dünya Bankası'nın 2024 yılında başlattığı ve 1 milyar ABD doları tutarındaki program, Türkiye'de dağıtık güneş enerjisi kapasitesini 963 MW artırmayı, özel sektörden 260 milyon ABD doları yatırım mobilize etmeyi ve 14 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğerinde sera gazı emisyonunu azaltmayı hedeflemektedir. Piyasa şeffaflığını güçlendiren, arz-talep dengesinin daha etkin yönetilmesini sağlayan ve yatırımcı güvenini pekiştiren dijital altyapı ile desteklenmektedir. Böylece, dağıtık güneş enerjisi yatırımları ile dijital teknolojilerin kesişiminde oluşan bu yeni enerji ekosistemi, Türkiye'nin 2053 yılı karbon nötr hedefiyle uyumlu şekilde; sürdürülebilir, rekabetçi ve kapsayıcı bir yenilenebilir enerji entegrasyonuna zemin hazırlamaktadır.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), iletim sistemi bazında dijitalleşme hedefleri doğrultusunda Ulusal SCADA Sisteminin Geliştirilmesi projesini yürütmektedir. Bu proje sayesinde Türkiye'nin tüm elektrik iletim şebekesi gerçek zamanlı izlenebilmekte, arıza ve yük değişimleri uzaktan kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, 2023 yılında tamamlanan Yük Tahminleme Yazılımı Geliştirme projesiyle yapay zekâ destekli öngörü sistemleri başarılı bir şekilde devreye alınmıştır.

Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) projeleri kapsamında geliştirilen yeni nesil güneş ve rüzgâr santralleri, üretimden itibaren tam dijital izleme ve kontrol altyapısıyla desteklenmektedir. Örneğin, Konya Karapınar Güneş Enerjisi Santrali projesinde üretim verileri Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemlerle anlık izlenmekte ve operasyonel verimlilik sağlanmaktadır. Akıllı sayaç sistemleri sayesinde milyonlarca abonenin tüketim verisi uzaktan okunabilmekte, bu veriler analiz edilerek tüketiciye özel enerji verimliliği önerileri sunulabilmekte, aynı zamanda enerji talep tahmini ve kayıp-kaçak takibi açısından önemli katkı sağlanmaktadır. 2024 yılı itibarıyla Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) ve özel dağıtım şirketleri yaklaşık 12 milyon akıllı sayaç kurulumunu tamamlamıştır.

Enerji depolama alanında, dijital kontrol sistemleriyle entegre edilmiş lityum iyon batarya destekli tesisler şebeke dengelemesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) 2022 yılında aldığı düzenleyici karar doğrultusunda, enerji depolama sistemlerinin elektrik piyasasında lisanslı piyasa oyuncusu olarak faaliyet göstermesi mümkün hâle gelmiştir.

Üretim santrallerinde uygulanan dijital ikiz teknolojileri sayesinde, sistem performansı dijital ortamda simüle edilmekte; bu sayede arızaların önceden tahmin edilmesi, bakım stratejilerinin iyileştirilmesi ve tesis verimliliğinin artırılması sağlanmaktadır. Bina düzeyinde ise, kamu

kurumlarına ait tesislerde Bina Yönetim Sistemleri (BMS) ile aydınlatma, iklimlendirme, güvenlik ve enerji tüketimi entegre bir şekilde yönetilmektedir. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırmakta ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir.

Elektrikli araç altyapısı için geliştirilen platformlar, uygulama tabanlı şarj planlaması, yüksek hızlı istasyonlar ve EPDK lisanslı entegre şarj operatörleri ile sistemin büyümesini sağlamaktadır. Bu altyapılar, elektrikli araç kullanıcılarına daha hızlı ve verimli şarj imkânı sunarak, sürdürülebilir ulaşımın yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji santrallerinde dijitalleşmenin yanı sıra, saha uygulamalarında geliştirilen yeni nesil teknolojiler de sektörün dönüşümüne ivme kazandırmaktadır. Rüzgar enerjisinde kullanılan gelişmiş drone ve robotik sistemler, türbinlerin bakım ve denetim süreçlerinde etkin rol oynamakta, yüksek çözünürlüklü sensörler ve kameralar sayesinde zor erişilen bölgelerin incelenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sistemler sayesinde hem iş güvenliği artmakta hem de bakım maliyetlerinde önemli oranda azalma sağlanmaktadır. Ayrıca, akustik sensörler ile donatılmış sistemler, türbin kanatlarında oluşabilecek hasarları erken aşamada tespit edebilmekte ve yapay zekâ destekli analizlerle bakım stratejileri sunabilmektedir. Bu sayede, rüzgar santrallerinde bakım ve onarım maliyetlerinde %50'ye varan tasarruf sağlanabilmektedir.

Teknolojik gelişmeler kapsamında öne çıkan bir diğer yenilik ise kanatsız rüzgar türbinleridir. Girdap kaynaklı titreşim rezonansına dayalı çalışan bu sistemler, doğaya ve kuşlara zarar vermeyen, daha sessiz çalışan ve daha az bakım gerektiren bir yapı sunmaktadır. Alternatör sistemiyle elektrik üreten bu yeni nesil türbinler, daha kompakt ve sürdürülebilir bir çözüm olarak rüzgar enerjisine yeni bir perspektif kazandırmaktadır.

Kanatsız rüzgar türbinleri, özellikle şehir içi ve koruma altındaki alanlarda geleneksel türbinlerin çevresel etkilerini azaltmak için potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Bu türbinler, daha sessiz çalışmaları ve doğaya zarar vermemeleri nedeniyle bu tür bölgelerde kullanım için uygun alternatiflerdir. Ancak, bu teknolojilerin Türkiye'de yaygın kullanımı için daha fazla araştırma ve test yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak, Türkiye'de kanatsız rüzgar türbinleri üzerine çalışmalar ve üretim girişimleri bulunmaktadır. Bu türbinler, çevresel etkileri azaltmayı ve enerji üretimini sürdürülebilir kılmayı hedeflemektedir. Ancak, bu teknolojilerin yaygın kullanımı için daha fazla araştırma ve test yapılması gerekmektedir.

Hidroelektrik santrallerde ise TÜBİTAK MAM tarafından geliştirilen korozyon ve kavitasyon önleyici kaplama malzemeleri, türbin ömrünü uzatmakta; tandem türbin teknolojileri ve değişken hızlı işletme sistemleri, santral performansını artırmaktadır. Ayrıca, makine öğrenmesi algoritmaları ile donatılan kontrol sistemleri, güç çıkışlarındaki anormallikleri tespit ederek

arızaların erken teşhisini mümkün kılmakta; bu da performans ve verimlilik açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Güneş enerji sistemlerinde ise şeffaf güneş panelleri, perovskit hücreler ve çift yüzeyli paneller, enerji üretim verimliliğini artırmakta; özellikle termal kameralarla yapılan arıza tespitleri, bakım planlamasında yapay zekâ ile desteklenen uygulamalar sayesinde büyük avantaj sunmaktadır. Aynı zamanda, hava durumu tahminleme sistemleri ile entegre çalışan üretim izleme platformları, enerji ticaretinde kararlılığı artıran önemli dijital unsurlar arasında yer almaktadır.

Son olarak, enerji depolama teknolojilerinde akıllı inverter sistemleri ve makine öğrenmesi destekli şarj-deşarj algoritmaları, batarya performansını optimize ederken, akıllı şebekelere entegrasyon sayesinde sistem esnekliğini ve arz güvenliğini artırmaktadır. Bu yapılar, sadece elektrik üretimi açısından değil, dağıtım ve şebeke yönetimi stratejileri açısından da kilit rol üstlenmektedir.

#### **4.1.2. Tüketici Odaklı Uygulamalar ve Blok zincir Temelli Enerji Ticareti**

Elektrik sektörü, yenilenebilir yatırımların hız kazanması, elektrifikasyonun derinleşmesi ve tüketicinin giderek daha aktif bir rol üstlenmesiyle gözle görülür bir dönüşüm yaşıyor. Bu yeni düzenin başarısı, anlık veriyi doğru yorumlayıp sahada uygulanabilir kararlara dönüştürebilme yeteneğine bağlı. Yapay zeka, bu veriyi anında işleyerek öngörü ve optimizasyon sağlarken; blok zinciri aynı bilginin güvenilirliğini ve izlenebilirliğini garanti altına alıyor.

Şebeke dengesi, arz tarafında yenilenebilir üretimin oynaklığı ile talep tarafında tüketici davranışlarındaki belirsizlik arasında hassas bir çizgide korunuyor. Güncel derin öğrenme mimarileri, geçmiş yük serilerini meteoroloji, hareketlilik ve sosyo-ekonomik verilerle zenginleştirerek saatlikten mevsimsele uzanan pencerelerde oldukça isabetli talep tahmini yapıyor. Böylece ani dalgalanmalar önceden kestiriliyor; dengeleme maliyetleri düşerken kapasite planlaması daha güvenli hâle geliyor. Bu alandaki son adım, Ocak 2025'te tanıtılan GridFMs (Grid Foundation Models) girişimi: farklı iletim bölgelerinden derlenen standart veri kümelerini tek bir “büyük model” çatısında toplayarak bölgesel tahmin hatasını anlamlı ölçüde azaltmış durumda.

Şebeke varlıklarının dayanıklılığı, plansız duruşların en aza indirilmesine bağlı; klasik takvim tabanlı bakım bu ihtiyaca tam karşılık veremiyor. YZ tabanlı kestirimci platformlar, ekipman sensörlerinden gelen titreşim, sıcaklık ve akustik sinyalleri saniyeler içinde işleyip dijital ikiz modellerine aktarıyor. Algoritmalar, küçük bir rulman sapmasını ya da batarya hücresindeki

mikroskobik direnci “anomali” olarak işaretleyerek bakım ekiplerini haftalar öncesinden uyarıyor. Rüzgâr türbinleri, batarya blokları ve yüksek gerilim teçhizatında yaygınlaşan bu yaklaşım, arıza kaynaklı kesintileri belirgin biçimde kısaltarak şebeke kararlılığını güçlendiriyor.

Arz, depolama ve talebe ilişkin esneklik araçlarının tek bir senaryoda uyumlu çalışması, milisaniye ölçeğinde güncellenen kontrol kararlarıyla mümkün. Takviyeli öğrenme algoritmaları, gerçek zamanlı fiyat sinyallerini, hat yükü sınırlarını ve rezerv seviyelerini birlikte izleyerek üretim set noktalarını ve şarj-deşarj stratejilerini anlık olarak optimize ediyor. Sonuçta yakıt kullanımı ve hat kayıpları gerilerken, aynı enerji girdisiyle daha yüksek çıktı elde ediliyor.

Mikroşebekeler, çatı üstü fotovoltaik sistemler ve konut-tipi depolama, merkezi-olmayan karmaşık bir güç akışı haritası yaratıyor. Federatif öğrenme temelli YZ altyapıları, bu dağıtık veriyi merkezî depolama gerektirmeden yerinde işleyerek ortak modeller oluşturuyor; tepe yüklerini yumuşatıyor ve frekans sapmalarını dar bir aralıkta tutuyor. Mart 2025’te duyurulan Open Grid AI Initiative (Açık Şebeke YZ Girişimi), bu vizyonu ölçeklendirmek amacıyla sektörel model havuzları ve senaryo veri tabanları oluşturmayı hedefliyor.

Enerji piyasasında güvenin temeli, tek bir ölçümün sistemdeki tüm paydaşlar tarafından aynı şekilde görülmesidir. Dağıtık defter mimarisi, üretimden tüketime uzanan işlemleri kriptografik bloklar hâlinde tutarak bu gereksinimi karşılar. Bu yaklaşımın küresel ölçekte ortak bir çerçeveye oturması, ISO 24445:2024 “Energy Blockchain Fundamentals” standardıyla mümkün hâle geldi; belge, terminolojiden siber güvenliğe kadar pek çok başlığı netleştirerek projeler arası uyumu kolaylaştırdı. (Energy Sustainability Directory, 2025)

Blok Zincir (blockchain) teknolojisine dayalı enerji ticareti platformları, bireysel ve kurumsal üreticilerin ürettikleri elektriği doğrudan tüketicilere sunabildiği merkeziyetsiz sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılmakta; bu altyapılar mikro şebeke uygulamalarını ve kullanıcı tabanlı enerji paylaşımı modellerini desteklemektedir. Blok zinciri tabanlı P2P platformlar, küçük üreticilerin fazla elektriği doğrudan komşularına satmasına imkân tanır. Akıllı sayaç verisinin zincirde saklanması, enerji biriminin kaynağını ve zaman damgasını doğrulayarak fiyat oluşumunu şeffaf hâle getirir. Bu modelin pratik uygulanabilirliği, 2024’te sonuçlanan Northern Europe Regulatory Sandbox Pilot (Kuzey Avrupa düzenleyici kum havuzu) aracılığıyla test edildi; farklı tarife yapıları altında ölçeklenebilirlik ve kullanıcı kabulü konularında değerli iç görüler elde edildi.

Karbon kredileri ile yenilenebilir enerji sertifikalarının zincirde benzersiz dijital varlıklar olarak tutulması, çifte sayım ve veri manipülasyonu riskini büyük ölçüde ortadan kaldırır. Standart meta-veri şemaları sayesinde her sertifikanın kaynağı, miktarı ve kullanım hakkı tek noktadan izlenebilir; gönüllü ve uyum piyasalarında güvenilir raporlama mümkün olur.

Enerji teslimatı, dinamik tarife uygulamaları ve talep-yanıt teşvikleri, blok zincirine gömülü akıllı sözleşmelerle koşul bazlı olarak otomatik yürütülür. Kod temelli bu mekanizma, mutabakat süresini kısaltır, insan hatasını en aza indirir ve taraflar arasında şeffaf bir güven katmanı oluşturur.

2023–2025 döneminde Türkiye’de açıklanan veri merkezi yatırımları, ülkenin dijital dönüşüm hedefleri ile enerji altyapısının entegrasyonunda önemli bir ivme kazandırmıştır. Yapay zekâ, büyük veri, bulut bilişim ve akıllı şebeke yönetimi gibi alanlarda artan veri işleme ihtiyacı, yüksek kapasiteli ve güvenli veri merkezlerine olan talebi ciddi ölçüde artırmıştır. Bu doğrultuda hem kamu girişimleri hem de uluslararası iş birlikleriyle hayata geçirilen büyük ölçekli projeler, Türkiye’nin bölgesel dijital merkez olma vizyonunu desteklemektedir.

Türkiye genelinde, organize sanayi bölgeleri ve teknoloji geliştirme bölgelerinde inşa edilen yeni nesil veri merkezleri, Tier III düzeyinde yüksek standartlara sahip olup, 6 MW’tan başlayarak 100 MW’a kadar ölçeklenebilir bilişim yüklerine yanıt verebilecek biçimde planlanmaktadır. Söz konusu tesislerde, özellikle kamu destekli altyapı yatırımları ile modüler yapıdaki merkezlerin çeşitli iş yüklerine uyum sağlayabilecek kapasitede olduğu görülmektedir. İlk fazları bulut servisleriyle entegre olacak şekilde geliştirilen bu projeler, ilerleyen aşamalarda enerji yönetimi, yapay zekâ ve büyük veri uygulamalarıyla uyumlu hâle getirilmektedir.

Bu yatırımlar arasında, ülkenin farklı bölgelerinde kamuya ait organize sanayi bölgelerinde geliştirilen projeler öne çıkmaktadır. Örneğin, Ankara’daki Başkent Organize Sanayi Bölgesi’nde inşası planlanan hiper-ölçekli veri merkezi, 100 MW kapasiteye ulaşabilecek şekilde projelendirilmiş ve modüler yapısıyla farklı sektör ihtiyaçlarına göre yapılandırılmıştır. Aynı şekilde, İzmir ve İstanbul gibi büyükşehirlerde yürütülen projeler de kamu altyapısının sağladığı destekle ilerlemekte ve ulusal veri güvenliği politikaları ile uyumlu biçimde geliştirilmektedir.

Yerli kamu destekli yatırımcılar, veri merkezi altyapısını stratejik bir kalkınma alanı olarak değerlendirerek, 2030’a kadar yüksek düzeyde yatırım hedefleri belirlemiştir. Kamu iştirakleri ve ilgili kamu kontrolündeki kuruluşlar üzerinden yürütülen projelerde, ilk etapta 300 MW seviyelerinde çekirdek kapasite hedeflenmekte olup, uzun vadede bu kapasitenin 500 MW’ın



üzerine çıkarılması planlanmaktadır. Bu yatırımlar kapsamında, bulut teknolojileri ve enerji sektörüne özgü dijital uygulamalara hizmet verecek güçlü altyapı platformlarının oluşturulması hedeflenmektedir.

Uluslararası düzeyde faaliyet gösteren kamu veya yarı kamu niteliğindeki bazı kuruluşlar da Türkiye'deki mevcut yatırımlarını genişletmiştir. İstanbul'daki mevcut kampüslerin kapasitesi, son yıllarda yapılan ilave tesislerle birlikte yaklaşık 22 MW IT yüküne ve 12.000 metrekareye ulaşmıştır. Bu merkezler, yüksek yoğunluklu işlem ihtiyaçlarına yanıt verebilen sıvı soğutmalı sistemleriyle dikkat çekmekte ve kamuya ait veri barındırma, akıllı enerji yönetimi ve siber güvenlik uygulamaları için altyapı sunmaktadır.

Kamu destekli iletişim ve teknoloji kuruluşları, Türkiye genelinde farklı şehirlerde hizmet veren sekizden fazla veri merkeziyle yaklaşık 41,5 MW'lık kapasiteye ulaşmış ve 2025 yılı sonuna kadar bu altyapıya yaklaşık 8,4 MW ek kapasite daha eklemeyi hedeflemiştir. Bu yatırımların bir bölümü dış kaynaklı finansman yoluyla desteklenmiş olup, söz konusu finansman, yeni tesislerin inşası kadar mevcut altyapıların büyük veri ve yapay zekâ uygulamalarına uyumlu hâle getirilmesini de kapsamaktadır. Bu bütünsel yatırımlar, Türkiye'nin dijital enerji dönüşümünü hızlandırma, yerli veri barındırma ve işleme kapasitesini artırma hedefleriyle doğrudan örtüşmektedir.

Ayrıca, ülkeyi Orta Doğu, Balkanlar ve Orta Asya arasında stratejik bir dijital hizmet merkezi haline getirme vizyonunu güçlendirmektedir. Veri merkezlerinin sahip olduğu yüksek işlem gücü ve güvenlik düzeyi, enerji sektöründe gerçek zamanlı veri yönetimi, yapay zekâ destekli karar sistemleri ve akıllı şebeke uygulamaları için sağlam bir altyapı zemini sunmaktadır.

## **4.2. Operasyon ve Bakım Süreçlerinde Dijitalleşme**

Enerji sektörü, giderek artan rekabet, sürdürülebilirlik hedefleri ve verimlilik beklentileri nedeniyle dijital dönüşümün odağı haline gelmiştir. Operasyon ve bakım süreçlerinin etkin yönetimi, santral performansının kritik bir belirleyicisidir.

Türkiye'de yenilenebilir enerji yatırımlarının artmasıyla birlikte, operasyon ve bakım süreçlerinde de dijital teknolojilerin kullanımı hız kazanmıştır.

| Yıl  | SCADA Sistemleri | Akıllı Sayaçlar | Kestirimci Bakım | Siber Güvenlik |
|------|------------------|-----------------|------------------|----------------|
| 2018 | %40              | %20             | %10              | %5             |
| 2019 | %50              | %30             | %15              | %10            |
| 2020 | %65              | %45             | %30              | %20            |
| 2021 | %75              | %60             | %50              | %35            |
| 2022 | %85              | %75             | %65              | %50            |
| 2023 | %90              | %85             | %80              | %65            |

Şekil 4.2: Türkiye'nin yıllara göre dijitalleşme yüzdeleri, SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi (2022)

enerji dönüşümü, enerji değer zincirinin tüm aşamalarında somut uygulamalarla kendini göstermektedir. Bu kapsamda iletim altyapısında, TEİAŞ tarafından yürütülen projeler aracılığıyla SCADA, enerji yönetim (EMS) ve dağıtım yönetim (DMS) sistemlerinin modernizasyonu sağlanmakta; uzaktan izleme, kestirimci bakım ve siber güvenlik yetkinlikleri ile desteklenen kontrol merkezleri yaygınlaştırılmaktadır. Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz kabiliyetleri sayesinde, ulusal elektrik şebekesinin izlenebilirliği ve müdahale etkinliği önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca, dijital ikiz teknolojileri ile senaryo analizi ve kriz simülasyonları gibi ileri düzey Şekil 4.2’de yer alan grafik, Türkiye’de enerji sektöründe dijitalleşmenin önemli alanlarda hızla arttığını, özellikle SCADA sistemleri ve akıllı sayaç uygulamalarının yaygınlaştığını gösteriyor.

Türkiye’de dijital modellemeler mümkün hâle gelmektedir.

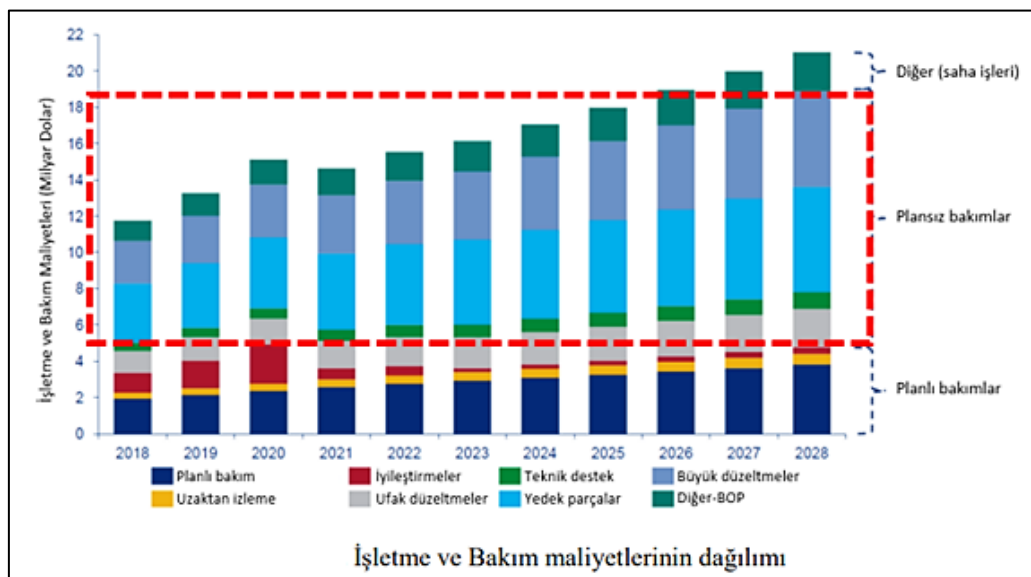


Şekil 4.3: Enerji Sektöründe Dijitalleşmenin Operasyon ve Bakım Süreçlerine Etkileri (SHURA Enerji Dönüşüm

Merkez, 2022 dokümanı referans alınarak hazırlanmıştır.)

Şekil 4.3’de yer alan grafiğe göre ise; gerçek zamanlı veri takibi, operasyonel görünürlük artışı, hızlı arıza tespiti, kullanıcı verimliliği artışı, doğru karar destek, arz-talep optimizasyonu, kritik altyapıların korunması, siber tehditlere hızlı müdahale, şeffaflık, veri güvenliği ve yeni ticaret modelleri gibi hususlarda enerji sektöründeki dijitalleşmenin operasyon ve bakım süreçlerine olan etkileri gözlenmektedir. Dağıtım seviyesinde ise akıllı sayaçların yaygınlaştırılması, tüketim verilerinin otomatik okunması ve değerlendirilmesini sağlayarak hem kullanıcı deneyimini iyileştirmekte hem de faturalama süreçlerinde şeffaflık sunmaktadır. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yardımıyla arıza tespiti, bakım planlaması ve saha operasyonları daha etkin şekilde yönetilmekte; otomatik şebeke kontrol sistemleri aracılığıyla kesinti süreleri azaltılmakta ve şebeke güvenilirliği artırılmaktadır. Alçak ve orta gerilim seviyelerinde kurulan bu dijital çözümler, dağıtım şirketlerinin operasyonel verimliliğini güçlendirmektedir.

Yenilenebilir enerji santrallerinde ise SCADA sistemleri, performans izleme yazılımları ve kestirimci bakım algoritmaları sayesinde üretim süreçleri daha verimli hâle getirilmektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr santrallerinde üretim verimliliği, yapay zekâ destekli analizlerle artırılmakta; enerji tahmin modelleri geliştirilmektedir. Örnek olarak; rüzgar türbinlerinin artan güç kapasiteleri ve işletme süreleri, bakım ve onarım maliyetlerinde bir artışa neden olmuştur. Rüzgar türbinlerinin yüksek güç üretimine yönelik tasarım ve işletme gereklilikleri, karmaşık sistemlerin daha zorlu şartlarda çalışmasını ve daha fazla mekanik stres altında olmasını gerektirir. Bu da doğal olarak, türbinlerin daha sık arızalanmasına ve bakım maliyetlerinin artmasına yol açar. İşletme ve bakım maliyetlerinde plansız bakımların toplam bakım maliyetleri içerisindeki payı Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: 2018–2028 Döneminde İşletme ve Bakım Küresel Maliyetlerinin Dağılımı

Planlı bakım olarak ifade edilen kısım, ekipman üreticilerinin servis programlarında belirtildiği şekilde standart bakım ve ekipman kontrolleri için harcanan maliyeti, plansız bakım ise işçilik maliyetleri ve ekipman kiralama dahil olmak üzere türbin ve kanat ekipmanı arızası için onarım ve değiştirme çalışmaları için harcanan maliyeti göstermektedir. Öngörülen bakım maliyetlerinin yaklaşık %70'ini plansız bakımlar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, kestirimci bakımın gelişmiş sensör teknolojileri ve veri analizi yöntemleri kullanarak türbinlerin durumunu sürekli olarak izlemesi büyük önem teşkil etmektedir. Şekil 4.4'te yer alan grafik, planlı bakım, plansız bakım ve diğer kalemler bazında bakım maliyetlerinin yıllar içindeki değişimini göstermektedir. Veriler, toplam bakım maliyetlerinin yaklaşık %70'inin plansız bakımlardan kaynaklandığını ortaya koymakta; bu durum, kestirimci bakım teknolojilerinin arıza öncesi müdahale kapasitesiyle maliyetlerin düşürülmesindeki stratejik önemini vurgulamaktadır. Batarya enerji depolama sistemleriyle entegre çalışan bu altyapılar, üretim-tüketim dengesini sağlamada kritik rol oynamakta; mikro şebeke uygulamaları aracılığıyla otonom kontrol mekanizmaları test edilmektedir. Ayrıca, hibrit enerji santrallerinde yük paylaşımı algoritmaları kullanılarak sistem stabilitesi güçlendirilmektedir. Tüketici tarafında ise mobil uygulamalar ve çevrim içi platformlar aracılığıyla enerji izleme, fatura analizi ve talep yönetimi çözümleri sunulmaktadır. Bu sistemler, bireysel kullanıcıların enerji tüketim farkındalığını artırmakta, büyük ölçekli kullanıcılar içinse bina otomasyon sistemlerine entegre edilerek enerji verimliliği sağlanmaktadır. Akıllı ev teknolojileri ile donatılmış yapılar, enerji tüketimini optimize ederken kullanıcıya davranışsal geri bildirim sağlamaktadır.

Yapay zekâ ve büyük veri çözümleri, enerji sektöründe karar destek süreçlerini dönüştürmektedir. Kestirimci bakım sistemleri sayesinde ekipman arızaları önceden tespit edilerek bakım süreçleri planlanabilmekte; üretim ve tüketim verileri büyük veri platformlarında analiz edilerek arz-talep yönetimi daha hassas yürütülmektedir. Bu tür uygulamalar, özellikle planlama ve yatırım kararlarının rasyonelleştirilmesine katkı sunmaktadır. Blok zincir teknolojisine dayalı pilot uygulamalarda ise eşler arası enerji ticareti modelleri geliştirilmekte, çatı tipi güneş paneli kullanıcılarının ürettikleri elektriği şebekeye satabilmeleri için dijital sertifikasyon altyapıları oluşturulmaktadır. Bu sistemler, veri güvenliği ve izlenebilirlik ilkeleri çerçevesinde şeffaf ve izlenebilir ticaret yapılarının kurulmasına olanak tanımaktadır.

Dijitalleşmenin beraberinde getirdiği siber güvenlik ihtiyaçları doğrultusunda, özellikle TEİAŞ ve kamu dağıtım şirketleri bünyesinde siber güvenlik merkezleri kurulmuş, tehdit izleme ve olay müdahale kapasiteleri artırılmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı koordinasyonunda

yürütülen siber tatbikatlar ve testlerle, kritik altyapıların korunması hedeflenmiştir. Bu çalışmalar, enerji sektörünün dirençliliğini artırmak adına stratejik bir öncelik hâline gelmiştir.

Ar-Ge ve yenilikçilik ekseninde ise üniversiteler, teknoloji girişimleri ve araştırma merkezleri iş birliğiyle yürütülen projelerde; sanal güç santrali modellemeleri, artırılmış gerçeklik destekli bakım çözümleri, blok zincir uygulamaları ve yapay zekâ tabanlı ticaret senaryoları geliştirilmektedir. Bu projeler, yerli teknolojilerin ortaya çıkmasını ve enerji teknolojilerinin ihracat potansiyelinin artırılmasını teşvik etmektedir. Kamusal alanda da dijitalleşme yönünde adımlar atılmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023–2027 Stratejik Planı'nda dijital dönüşüm doğrudan politika hedefi olarak tanımlanmakta; Enerji Verimliliği Portalı, Ulusal Enerji Veri tabanı ve e-İzin sistemleri gibi dijital araçlarla yönetim süreçlerinin sadeleştirilmesi amaçlanmaktadır. EPIAŞ bünyesinde işletilen Piyasa Yönetim Sistemi ve veri paylaşım platformları aracılığıyla, piyasalarda şeffaflık ve etkinlik sağlanmakta; piyasa katılımcılarının eşit bilgiye erişimi desteklenmektedir.

## 5. DİJİTALLEŞMENİN YÖNETİŞİMSEL, REGÜLASYONEL VE HUKUKİ BOYUTU

### 5.1. Mevzuat Uyumu ve Regülasyonların Dijital Teknolojilere Entegrasyonu

Türkiye'nin enerji sektöründe dijitalleşme süreci, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda hukuki bir dönüşüm gerektirmektedir. Dijitalleşme, yenilikçi çözümler ve verimlilik artışı sağlasa da yasal altyapının bu hızlı değişimlere uyum sağlayabilmesi, sektördeki oyuncuların faaliyetlerini sürdürebilmesi ve dijitalleşmenin sağladığı avantajlardan faydalanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu noktada Türkiye'nin enerji sektöründe dijitalleşme ile ilgili mevcut düzenlemeler ve hukuki yaklaşımlar daha da önem kazanmaktadır.

Türkiye, enerji sektöründeki dijitalleşmeye stratejik bir öncelik olarak yaklaşıp da mevcut hukuki altyapının dijital teknolojilerle uyumlu hale getirilmesi gerektiği aşıkardır. Türkiye'de dijitalleşmeye yönelik hukuki düzenlemeler genellikle Avrupa Birliği mevzuatına paralel olarak şekillenmektedir ancak dijital dönüşümün gerekliliklerini karşılayabilmek için sadece AB normlarına uyum sağlanması yeterli olmayacaktır. Bu kapsamda, yerel mevzuatın güncellenmesi ve yeni nesil enerji teknolojileri için özel düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, dijitalleşmeyi stratejik bir öncelik olarak belirlemiş olsa da bu sürecin verimli bir şekilde işlemesi için mevzuatın güncellenmesi ve dijital enerji altyapılarının hukuki çerçevelerle güvence altına alınması gerekmektedir. Özellikle, enerji depolama sistemleri gibi yeni nesil teknolojilerin hukuki düzenlemeleri, piyasada rekabetin sağlanması ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Henüz bu tür sistemlerin hukuki düzenlemeleri tam anlamıyla oturmamış olsa da sahiplik hakları, kullanım alanları, ticaretine ilişkin kurallar ve lisanslama süreçlerinin açık bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Avrupa'da enerji depolama sistemleri genellikle "yenilenebilir enerji kaynakları" gibi değerlendirilmektedir. Ancak Türkiye'de bu sistemlerin hukuki statüsü hâlâ belirsizliğini korumaktadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak yasal düzenlemelerin de bu teknolojilere özgü hale gelmesi gerektiği aşıkardır. Bunun yanında, bulut bilişim tabanlı veri işleme altyapıları enerji sektöründe giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak bulut sistemlerinin kullanımı, verilerin Türkiye sınırları içinde saklanması zorunlulukları, sınır ötesi veri transferleri ve enerji

piyasasında faaliyet gösteren şirketlerin bu altyapılara uyum süreçleri bakımından henüz net bir düzenlemeye kavuşturulmamıştır. Benzer şekilde, yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri (tahminleme, akıllı şebeke optimizasyonu, talep tarafı yönetimi vb.) için de özel bir hukuki çerçeve bulunmamaktadır. Bu alanda şeffaflık, algoritmik hesap verebilirlik ve tüketici haklarının korunması gibi konuların mevzuata entegrasyonu kritik öneme sahiptir. Cumhurbaşkanlığı 2019/12 sayılı Genelgesi, kritik altyapı hizmetleri (enerji dahil) veren kamu kurumlarının verilerini yalnızca kendi özel sistemlerinde veya yerel sağlayıcılarla tutmasını öngörmektedir; bulut kullanımına izin verilmektedir ama yerelleştirme önceliklidir. Ayrıca Dijital Dönüşüm Ofisi tarafından yayımlanan Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi ve Denetim Rehberi, güvenlik önlemlerini zorunlu kılmakta; BİGDES sistemi ile uyum denetimlerinin takibi yapılmaktadır. Bu çerçevede, enerji şirketlerinin bulut sistemlerinin tedarikçilerini seçerken veri güvenliği, süreklilik ve yerelleştirme açısından hukuki sorumlulukları belirginleşmiştir. Türkiye'nin enerji sektöründe dijitalleşmeye yönelik mevcut hukuki altyapısının, Avrupa Birliği ve iyi uygulama örnekleri sunan ülkelerdeki düzenlemelerle karşılaştırmasını göstermektedir.

*Tablo 5.1: Türkiye, AB ve Seçilmiş Ülkelerde Enerji Depolama ve Mevzuat Karşılaştırması*

| Kategori                               | Türkiye                                                                     | Avrupa Birliği (genel)                                                                        | Romanya                                                   | İspanya                                                                                 |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Enerji Depolama Düzenlemeleri</b>   | Belirsiz; sahiplik, ticaret, lisanslama net değil                           | 2019 Elektrik Direktifi ve Yönetmeliği; 2023 Pil Düzenlemesiyle döngüsel yönetim              | Çift vergilendirme kaldırıldı; 2026'ya kadar 5 GW hedefi  | 2025 Kralname ile enerji depolama artık kamu hizmeti sayılıyor; izinler kolaylaştırıldı |
| <b>Veri Güvenliği / Siber Güvenlik</b> | Uluslararası standartlara uyum önemli görülüyor ama somut yasa az           | NIS2, DORA, Cyber Resilience Act gibi yeni mevzuatlarla siber dayanıklılık artırılıyor        | —                                                         | —                                                                                       |
| <b>Ulusal-Uluslararası Uyum</b>        | AB mevzuatına paralel ancak yeterli değil; güncelleme ihtiyacı vurgulanıyor | Clean Energy paketi, REPowerEU, TEN-E, Batarya ve Kibritleme düzenlemeleriyle uyumlu politika | AB çerçevesine uyum sağlanıyor, vergisel düzenleme örneği | AB paketlerine bağlı, pratik uygulamalar hızlandırılıyor                                |

Tablo 5.1'de, Türkiye'nin mevzuat güncellemelerine ihtiyaç duyduğu alanları ve diğer ülkelerin güçlü uygulamalarını net biçimde ortaya koymaktadır.



## 5.2. Veri Güvenliği ve Gizliliği

Dijitalleşme ile birlikte enerji piyasasında büyük miktarda veri üretilmekte ve bu veriler çeşitli platformlar üzerinden paylaşılmaktadır. Bununla birlikte artan veri paylaşımı ve analitik süreçler de önemli bir hukuki boyut taşımaktadır. Veri gizliliği ve güvenliği, enerji piyasası aktörlerinin hukuki sorumluluklarını etkileyen temel unsurlar arasında yer almakta; bu nedenle, veri güvenliğini sağlamak amacıyla siber güvenlik önlemlerinin hukuki düzenlemelerle desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de dijitalleşme sürecinin daha sürdürülebilir ve güvenli bir şekilde ilerleyebilmesi için, yerli dijital çözümlerinin ve yazılımlarının geliştirilmesi kadar, uluslararası standartlara uyum sağlanması da gerekmektedir.

Bu noktada Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) doğrudan önem taşımaktadır. Enerji sektöründeki dijital uygulamalar (akıllı sayaçlar, tüketici davranış verileri, mobil uygulamalar) kişisel verilerin işlenmesini beraberinde getirmekte; bu da KVKK ve AB Genel Veri Koruma Tüzüğü (GDPR) ile uyumlu süreçlerin oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Şirketlerin tüketici verilerini yalnızca belirli amaçlarla toplaması, saklama sürelerini sınırlaması ve açık rıza mekanizmalarını etkinleştirmesi hukuki bir gereklilik haline gelmiştir.

KVKK, yapay zekâ tabanlı sistemlerin kişisel veri işleme süreçlerinde güvenlik, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkelerine uyumu öne çıkarmaktadır. Kişisel Verileri Koruma Kurumu, bu kapsamda sektör rehberleri yayımlamış, özellikle bankacılık, mobil uygulamalar ve AI kullanımına dair yol gösterici ilkeler geliştirmiştir. Ayrıca 2024'te sunulan AI Kanun Tasarısı, Türkiye'de ilk kez yapay zekâ sistemlerini düzenleyen kapsamlı bir çerçeve getirmekte, güvenlik, eşitlik ve gizlilik ilkelerine dayalı yükümlölükler öngörmektedir. KVKK ihlallerinde ise ciddi idari para cezaları uygulanabilmektedir.

Bu doğrultuda, dijital altyapıların ve enerji ticareti sistemlerinin ulusal hukuk çerçevesinde güvence altına alınması, sektördeki dijital dönüşümün sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artıracaktır.

## 5.3 Ulusal ve Uluslararası Uyum

Türkiye'nin dijital enerji altyapılarının hukuki çerçevesi sadece yerel düzenlemelere değil aynı zamanda uluslararası standartlara da uyum sağlamalıdır. Küresel çapta enerji ticaretinin dijitalleşmesi ve sınır ötesi veri akışı, Türkiye'nin enerji piyasası aktörlerinin uluslararası normlarla uyumlu hale gelmesini zorunlu kılmaktadır.

Dijitalleşme ile birlikte karşılaşılan hukuki zorlukların aşılması için çeşitli adımlar atılmalıdır. Bunlar arasında mevzuatın yenilenmesi, sektörel iş birliklerinin artırılması ve dijital enerji altyapılarının hukuki güvence altına alınması ön plandadır. Ayrıca dijitalleşmenin sağladığı faydaların tam anlamıyla hayata geçebilmesi için düzenleyici kurumların hızla hareket etmesi ve esnek düzenlemeler oluşturması gerekmekte ve piyasa katılımcılarının eşit bilgiye erişimi desteklenmektedir.

Özellikle EPDK'nın ikincil düzenlemelerle dijitalleşmeye uyumlu lisanslama süreçleri, enerji piyasalarında dijital ticaretin kuralları, şebeke yönetim sistemlerine ilişkin teknik standartlar ve veri paylaşımına dair çerçeveler geliştirmesi gerekmektedir. AB'de olduğu gibi Türkiye'de de piyasa gözetimi ve denetiminin dijital altyapılara uyum sağlayacak şekilde güncellenmesi, uluslararası uyum açısından kritik bir adımdır.

Türkiye'nin Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi 2021–2025, veri altyapısının güçlendirilmesi, yapay zekâ uzmanı yetiştirilmesi ve sektörel uyumun sağlanmasına yönelik önemli adımlar öngörmektedir. 2024–2025 Eylem Planı ise enerji dahil kritik sektörlerde yerli yapay zekâ çözümlerinin geliştirilmesini ve düzenleyici çerçevenin AB ile uyumlu hale getirilmesini önceliklendirmektedir. Ayrıca, Haziran 2024'te TBMM'ye sunulan AI Kanun Tasarısı, AB'nin AI Yasası ile paralel risk temelli bir yaklaşım getirmektedir. Bu gelişmeler Türkiye'nin enerji dijitalleşmesinde uluslararası normlara entegrasyon kararlılığını göstermektedir.

## 6. DİJİTALLEŞMEYİ DESTEKLEYEN POLİTİKA ARAÇLARI VE FİNANSAL MEKANİZMALAR

### 6.1. Teşvik Politikaları ve Kamu Destekleri

Türkiye’de enerji sektörünün dijital dönüşümünü hızlandırmak amacıyla çeşitli teşvik mekanizmaları ve destekleyici politikalar uygulanmaktadır. Bu kapsamda, Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) modeli, yalnızca üretim yatırımlarını değil aynı zamanda dijital altyapılarla entegre sistemlerin geliştirilmesini de teşvik etmektedir. YEKA ihalelerinde, yerli teknoloji kullanımı, akıllı kontrol sistemleri entegrasyonu ve izleme altyapısı gibi kriterler önceliklendirilmektedir. Özellikle 2020 sonrası YEKA ihalelerinde, veri izleme sistemleri ve dijital performans ölçümleri ihale teknik şartnamelerine entegre edilmiştir.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen Milli Enerji ve Maden Politikası kapsamında, dijital çözümler üreten yerli firmalara Ar-Ge destekleri ve yatırım teşvikleri sağlanmaktadır. TÜBİTAK, KOSGEB ve Kalkınma Ajansları üzerinden dağıtılan bu destekler, enerji verisi analitiği, yapay zekâ destekli enerji yönetimi yazılımları ve şebeke otomasyonu gibi alanlara yoğunlaşmaktadır.

Ayrıca EPDK tarafından 2022 yılında yayımlanan “Enerji Depolama Yönetmeliği”, sadece batarya sistemlerinin değil, bu sistemleri yöneten dijital platformların da lisanslı piyasa oyuncusu olmasının önünü açmıştır. Bu kapsamda, dijital şebeke yönetimi, talep yanıt sistemleri ve akıllı inverter çözümleri geliştiren şirketler hem yatırım teşviklerinden hem de elektrik piyasasında doğrudan gelir elde etme hakkından yararlanabilmektedir.

Avrupa Yeşil Mutabakatına uyum çerçevesinde hazırlanan Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021’de enerji sektöründeki dijital çözümlerin teşvikini içeren hedefler barındırmaktadır. Planın 6. maddesinde, karbon ayak izi izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması, yenilenebilir enerji sertifikalarının dijitalleştirilmesi ve akıllı şebekelerin yaygın kullanımı yer almaktadır.

Avrupa Birliği destekli IPA projeleri ve Dünya Bankası ile yürütülen Türkiye Enerji Sektörü Dönüşüm Projesi, yerel dağıtım şirketlerinin dijital dönüşüm altyapılarını kurmaları için hibe ve uzun vadeli kredi olanakları sağlamaktadır. Bu destekler, özellikle akıllı sayaç sistemleri, SCADA platformları ve veri merkezleri yatırımlarını kapsamaktadır. Bu teşvik mekanizmaları ve politikalar, sadece yatırımı desteklemekle kalmayıp aynı zamanda dijitalleşmeyi yerli ve sürdürülebilir kılacak yapısal bir dönüşüm çerçevesi sunmaktadır. Türkiye’nin enerji

sektöründe küresel ölçekte rekabet gücünü artırabilmesi için bu tür mekanizmaların genişletilmesi ve teknoloji sağlayıcı ekosisteminin güçlendirilmesi kritik önemdedir.

Dijital enerji finansmanı, dijital teknolojiler ile yeşil finansman modellerini bir araya getiren ve enerji sektöründe sürdürülebilir dönüşü destekleyen bütüncül bir finansal inisiyatif olarak öne çıkar. Bu yaklaşım sadece teknik çözümlerden değil; aynı zamanda bu çözümlerin hayata geçirilmesi için gerekli olan finansal araçlardan da oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliği yatırımları, karbon sertifikaları, akıllı şebekeler ve mikro şebekeler gibi alanlarda dijital destekli finansman modelleri geliştirilir. Bu sayede enerji üretimi, temini ve tüketim süreçlerinde verimlilik artar, şeffaflık sağlanır ve finansmana erişim daha kolay ve kapsayıcı hale gelir.

Dijital teknolojiler içerisinde özellikle blockchain, IoT, yapay zekâ ve büyük veri analitiği finansal süreçlere yeni boyut kazandırır. Blockchain ile karbon sertifikalarının takibi ve karbon piyasalarındaki teknik altyapı şeffaf ve manipülasyona kapalı hale gelir. Bu sayede hem yatırımcı hem de düzenleyici taraf güven içinde hareket eder. IoT cihazlarıyla entegre edilen akıllı sayaçlar ve yapay zekâ temelli talep/tedarik yönetim sistemleri sayesinde enerji verimliliği projeleri performansa dayalı olarak desteklenebilir; finansman sağlayan kurumlar risklerini daha etkili yönetebilir ve geri ödeme planları ile performans kriterleri dijital olarak izlenebilir. Bir diğer önemli finansman aracı olan yeşil tahviller, sürdürülebilirlik bağlantılı tahviller (SLB) ve borçlanma araçları; dijital sistemlerle entegre kullanım sayesinde çevresel performansın raporlanmasına olanak tanır. 2021 itibarıyla yapılan dijital tahvil tokenizasyon çalışmaları, özellikle BNP Paribas tarafından blok zincirde ihraç edilen yenilenebilir enerji tahvilleri ile örneklenmiş, bu teknolojiler sayesinde küçük yatırımcılar da daha kolay katılım sağlayabilmiştir. (BNP Paribas & EDF ENR, 2022)

Dijital enerji finansmanının güçlü örnekleri bazen doğrudan bankalar aracılığıyla ortaya çıktığı gibi, bazen fintech, kalkınma bankaları ve kamu-özel ortaklıklarıyla da şekillenir. Türkiye’de yatırım bankacılığında yürütülen programlarda akıllı şebeke, dağıtık güneş enerjisi ve batarya sistemleri gibi dijital enerji yatırımlarının finansmanı sağlanmaktadır.

Uluslararası düzeyde ise, Dünya Bankası’nın bond-i platformu 2018’den beri blok zincir-bazlı tahvil ihracı gerçekleştirerek dijital finansman araçlarının altyapısına yönelik örnek teşkil etmektedir. Dünyada bu konuda önemli örneklerden bir tanesi, 2016 yılında Birleşik Krallık merkezli olarak kurulan bir blok zincir teknolojisi girişimidir.

Temel amacı, enerji tasarrufunu teşvik eden dijital bir platform sunmaktır. 2018’de gerçekleştirdiği ilk coin arzı (ICO) ile dikkat çeken girişim, kendi yerel kripto para birimi aracılığıyla kullanıcıları enerji tasarrufu davranışları karşılığında ödüllendirmekte; bu dijital varlıklar, enerji faturasında indirim, verimli cihaz alımı veya toplu taşıma gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir.

Sonuç olarak, dijital enerji finansmanı; teknolojik araçları, finansal enstrümanları ve uluslararası iş birliklerini bir araya getirerek, enerji sistemlerinin düşük karbonlu, dijital olarak yönetilebilen ve toplumsal katılıma açık şekilde dönüşmesine zemin hazırlar. Bu bağlamda, yeşil ve sürdürülebilir tahviller, dijital krediler, tokenize edilmiş enerji bonoları, blok zincir tabanlı karbon sertifikaları gibi enstrümanların dijital altyapılarla entegre edilmesi hem finansal verimliliği artırmakta hem de iklim hedeflerine ulaşmada kritik rol oynamaktadır.

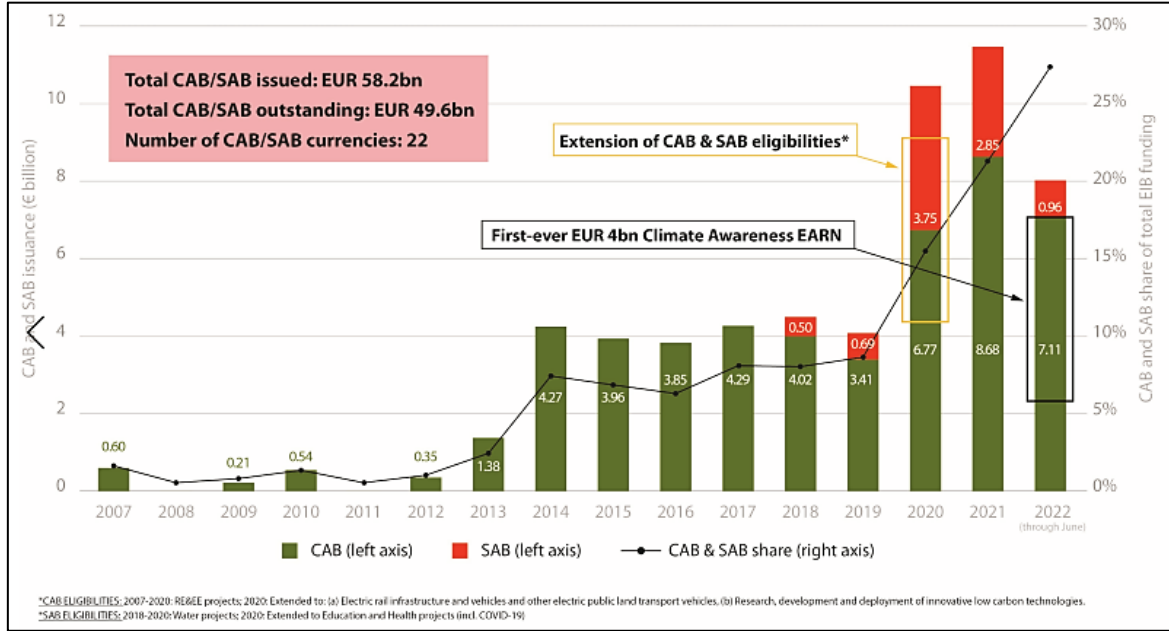
Uluslararası literatürde, dijital teknolojilerin yeşil finans ile entegrasyonunun enerji verimliliğini anlamlı düzeyde artırdığına dair önemli kanıtlar bulunmaktadır.

Örneğin, Çin temelli bir çalışmada, dijital güçlendirilmiş yeşil finansman uygulamalarının şehirlerde enerji verimliliğini hem terminal düzeyde hem de çevresel toplam faktör verimliliği açısından iyileştirdiği gösterilmiştir.

Dijital finans platformları, enerji şirketlerine kredi garantisi, tesis temelli menkul kıymetleştirme ve teknik destek sağlayarak riskleri azaltmakta, finansmana erişimi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, uluslararası kalkınma bankaları ve yatırım kuruluşları, dijital enerji çözümlerine yönelik finansmanlarını, dağıtık yenilenebilir sistemleri destekleyerek artırmaktadır. 2020 yılında yayımlanan ve 2021–2025 iklim bankacılığı yol haritasını gösteren bir rapora göre, 2012 yılından 2019 yılına kadar iklim fonlarının toplamı yüz milyar avroyu aşmıştır. Söz konusu rakamın, ilerleyen yıllarda enflasyon ve teknoloji kullanımındaki artış dikkate alındığında önemli düzeyde yükselmesi öngörülmektedir.

Bu kapsamda, kamu kaynaklı ve uluslararası kalkınma odaklı finansman mekanizmaları dijital enerji yatırımlarını giderek daha fazla desteklemektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TKYB) ve Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) gibi kurumlar, ulusal düzeyde dijital enerji projelerine yönelik kredi, hibe ve garanti programlarını yürütmektedir. Uluslararası ölçekte ise Avrupa Yatırım Bankası (EIB), Dünya Bankası ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) tarafından sağlanan iklim ve enerji fonları, dijital altyapı, akıllı şebekeler, enerji depolama sistemleri ve veri yönetimi platformlarını da kapsayacak biçimde genişletilmiştir. Bu politikalar, dijital

dönüşümün finansman boyutunu güçlendirerek Türkiye'nin enerji sektöründe hem düşük karbonlu kalkınma hedeflerine hem de sürdürülebilir teknoloji temelli büyüme vizyonuna katkı sağlamaktadır.



Şekil 6.1: Avrupa Yatırım Bankası'nın (EIB) Yeşil, Sosyal ve Sürdürülebilir Tahvillerinin Yıllık Dağılımı

Şekil 6.1, Avrupa Yatırım Bankası'nın (EIB) 2012–2019 döneminde iklim ve çevresel sürdürülebilirlik finansmanı kapsamında sağladığı toplam kaynağı ve yıllara göre artış trendini göstermektedir. Bu dönemde EIB, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, akıllı şebekeler ve dijital enerji altyapıları gibi alanlarda 100 milyar avroyu aşan bir finansman hacmine ulaşmıştır. Yıllık bazda, fon miktarlarında kademeli bir artış gözlenmekte; bu artış, hem Avrupa Birliği'nin yeşil dönüşüm hedefleri hem de dijital enerji çözümlerine yönelik artan yatırım ihtiyacıyla doğrudan ilişkilidir. (European Investment Bank, 2020)

2020 sonrası dönemde, EIB'nin 2021–2025 İklim Bankacılığı Yol Haritası kapsamında, finansmanın daha yüksek oranda dijitalleşme odaklı projelere yönlendirileceği belirtilmektedir. Bu kapsamda; dağıtık yenilenebilir enerji sistemleri, veri izleme altyapıları, akıllı sayaç sistemleri ve yapay zekâ tabanlı enerji yönetimi çözümleri gibi dijital bileşenler, iklim fonlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Tablo ve ilgili veriler, EIB'nin yalnızca sermaye sağlamada değil, aynı zamanda Avrupa enerji sektörünün dijital dönüşümünü hızlandırmada da stratejik bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Bu durum, iklim hedeflerine ulaşmada dijital enerji finansmanının önemini ve kamu bankalarının bu süreçteki katalizör etkisini göstermektedir.

Küresel ölçekte, kalkınma ajansları ve uluslararası finans kurumları tarafından yürütülen programlar da dijital enerji finansmanını desteklemektedir. Örneğin, Fransa merkezli kalkınma ajansı AFD tarafından yürütülen Digital Energy Challenge programı, gelişmekte olan ülkelerde enerji sistemlerinin dijitalleşme yoluyla dönüştürülmesini hedeflemekte ve enerjiye erişim, akıllı şebeke yönetimi, talep tarafı katılımı ve sistem esnekliği alanlarında dijital çözümler geliştiren projeleri desteklemektedir. Program kapsamında, yapay zekâ tabanlı talep tahmini, IoT destekli ölçüm sistemleri ve blockchain ile izlenebilir mikro şebekeler gibi teknolojiler ön plana çıkmaktadır. Yerel girişimlerin ve kamu-özel ortaklıklarının desteklenmesiyle, dijital enerji finansman altyapısının güçlendirilmesi hedeflenmektedir.

Türkiye’de de dijital enerji finansmanına yönelik örnekler bulunmaktadır. Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TSKB) tarafından yürütülen “Sürdürülebilir Enerji ve Altyapı Tesisleri” programı, akıllı enerji sistemlerine ve dijitalleşmeye odaklı projelere finansman sağlama planlarını içermekte; bu kapsamda dijital altyapı ve 5G uygulamalarının da dikkate alındığı görülmektedir. (TSKB, 2022)

Bu alandaki temel hedefler arasında, blockchain tabanlı sertifika ve menkul kıymetleştirme mekanizmalarıyla şeffaflık ve izlenebilirliğin sağlanması; IoT ve yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri ile talep–sunum dengesinin optimize edilerek enerji verimliliğinin artırılması gereklidir. Dijital platformlar aracılığıyla KOBİ’ler ve yerel projelerin finansmana erişiminde eşitliğin sağlanması; veri temelli analiz ile kredi güvence sistemleri sayesinde yatırım risklerinin minimize edilmesi yer almaktadır.Özetle, dijital enerji finansmanı; dijital teknolojiler ve yeşil finansman modellerinin entegrasyonu yoluyla enerji sektöründe sürdürülebilir dönüşümü destekleyen kapsamlı ve stratejik bir yaklaşımdır. Blockchain, IoT, yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojiler, karbon sertifikalarının güvenilir takibini, enerji yönetimi süreçlerinde şeffaflığı ve etkinliği güçlendirmektedir. Performansa dayalı finansman modelleri, enerji verimliliği yatırımlarını desteklerken finansman sağlayan kurumların risklerini daha etkin yönetmesine ve geri ödeme süreçlerinin dijital olarak izlenmesine imkân tanımaktadır. Dijital platformlar aracılığıyla yeşil tahviller, dijital krediler ve tokenize edilmiş enerji bonoları gibi finansal araçlar, çevresel performansın izlenmesini kolaylaştırmakta ve finansal süreçlerde güveni artırmaktadır.

Bu finansman yaklaşımı yalnızca finansal etkinliği artırmakla kalmaz; aynı zamanda enerji arz güvenliğini güçlendirir, enerji sistemlerinin esnekliğini ve dayanıklılığını artırarak ani arz-talep dengesizliklerinin etkisini azaltır. Küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ’ler) yanı sıra yerel ve yenilikçi projeler de dijital platformlar sayesinde daha kolay fonlanabilir hale gelir.

Sürdürülebilirlik açısından ise, dijital enerji finansmanı, enerji sistemlerinin düşük karbonlu dönüşümünü hızlandırır ve çevresel performansın ölçülmesini, raporlanmasını ve şeffaf olmasını sağlar. Böylece iklim hedeflerine ulaşmak için gerekli finansal araçlar ve teknolojik altyapılar etkin biçimde bir araya getirilir.

## **6.2. Türkiye’de Bankalar Bazında Dijital Enerji Finansmanı**

Türkiye’de dijital enerji finansmanının gelişiminde bankalar kilit rol oynamaktadır. Özellikle Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) ve Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TKYB) bu alanda öne çıkan kurumlardır.

TSKB, sürdürülebilirlik ve dijitalleşmeyi entegre eden bir finansman yaklaşımıyla enerji sektöründe dijital dönüşümü desteklemektedir. Banka tarafından yürütülen Sürdürülebilir Enerji ve Altyapı Tesisleri programı, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, dijital altyapı ve akıllı şebeke projelerine özel kredi paketleri sunmaktadır. Program kapsamında, 5G teknolojilerinin entegre edildiği dijital altyapı yatırımları da finansman dahilinde değerlendirilmektedir. TSKB, kredi sürecinde yalnızca teknik fizibiliteyi değil, aynı zamanda dijitalleşmenin projeye kattığı katma değer ile sürdürülebilirlik unsurlarını da analiz etmektedir. Böylece dijital izlenebilirlik ve performans takibi sağlanarak riskler minimize edilmektedir.

TKYB ise enerji sektöründeki dijital dönüşüm projelerine uzun vadeli ve uygun maliyetli finansman sağlamaya odaklanmaktadır. Kamu–özel ortaklıkları ve proje garantileri aracılığıyla, projelerin finansal sürdürülebilirliği desteklenmektedir. Banka, çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) kriterlerine uygun projeleri önceliklendirerek hem çevresel hem de sosyal etkileri dikkate almaktadır. Ayrıca, dijital araçlar üzerinden gerçekleştirilen veri analitiği ve yapay zekâ uygulamaları, kredi değerlendirme süreçlerini hızlandırmakta ve risk yönetimini güçlendirmektedir.

Bankaların dijital enerji finansmanındaki rolleri yalnızca kredi sağlamakla sınırlı değildir. Blockchain teknolojisi kullanılarak kredilerin şeffaf ve değiştirilemez biçimde kaydedilmesi, proje performansının düzenli ve güvenilir bir şekilde izlenmesini mümkün kılmaktadır. Performansa dayalı finansman modellerinin yaygınlaşmasıyla, enerji verimliliği projelerinin başarısı daha etkin biçimde güvence altına alınmaktadır. Dijital platformlar aracılığıyla KOBİ’lerin ve yerel girişimlerin finansmana erişimi kolaylaşmakta, böylece kapsayıcı bir finansman ekosistemi oluşmaktadır.



Sonuç olarak, Türkiye’de bankalar; teknik ve finansal kapasiteleriyle enerji sektöründe dijitalleşmeyi hızlandıran stratejik aktörlerdir. Sağladıkları kaynaklar ve uyguladıkları yenilikçi finansman modelleri, sürdürülebilir, dijital ve düşük karbonlu enerji projelerinin artmasına doğrudan katkı sunmaktadır.

### **6.3. Türkiye’de Finansman Kuruluşları ve zel Sektör şirketleri Bazında Dijital Enerji Finansmanı**

Türkiye’de dijital enerji finansmanı, yalnızca bankacılık sektörüyle sınırlı kalmayıp; kalkınma ajansları, kamu bankaları, fintech girişimleri ve enerji sektöründeki çeşitli aktörler tarafından aktif şekilde uygulanmaktadır. Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TKYB) ve uluslararası kalkınma kuruluşları, dijital enerji projelerine uzun vadeli, düşük faizli ve sürdürülebilirlik odaklı finansman modelleri sunmaktadır. Bu erçeve, enerji altyapısının dijital dönüşümü ve yenilenebilir enerji entegrasyonu için gerekli sermaye, hem yurt içi hem de yurt dışı kaynaklardan sağlanmaktadır.

Türkiye’de dijital enerji finansmanında yeşil tahvil, sürdürülebilirlik bağlantılı tahvil (SLB) ve dijital tokenize tahviller gibi menkul kıymet türleri giderek yaygınlaşmaktadır. Bu finansal araçlar, enerji projelerinin fonlama süreçlerinde şeffaflığı, izlenebilirliği ve yatırımcı erişimini artırmaktadır. Özellikle tahvil ihraçlarının dijital platformlar üzerinden takibi, yatırımcıya fonların kullanımına ilişkin gerçek zamanlı bilgi sağlamakta; blockchain teknolojisinin entegrasyonu ile güvenilirlik ve doğrulama kapasitesi güçlenmektedir.

Performansa dayalı finansman modelleri, projelerin geri ödeme planlarını sahadan toplanan dijital verilere bağlamakta; bu sayede yatırım riski düşürülmekte ve finansal sürdürülebilirlik artırılmaktadır. Proje performansının sürekli izlenmesi, fon sağlayıcılar açısından şeffaflık yaratırken, yatırımcı güvenini pekiştirmektedir.

Uluslararası kuruluşların Türkiye’de yürüttüğü programlar, dijital enerji finansman altyapısının gelişimine ivme kazandırmaktadır. Dünya Bankası’nın blok zincir tabanlı tahvil ihraçları ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası’nın (EBRD) sürdürülebilir enerji kredileri, dijital finansman modellerinin hem teknik hem de operasyonel açıdan uygulanabilirliğini artırmakta; piyasa ekosisteminin gelişimine katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye’de dijital enerji finansmanı; kamu bankaları, kalkınma ajansları ve uluslararası kuruluşların koordineli çalışmasıyla, teknolojik altyapı yatırımlarından yeşil tahvil ve bono ihraçlarına, performansa dayalı finansman modellerinden dijital izleme ve raporlama

sistemlerine kadar geniş bir yelpazede hızla gelişmektedir. Bu bütüncül yapı, sürdürülebilir ve düşük karbonlu enerji sistemlerinin ölçekli biçimde finanse edilmesini ve uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

#### **6.4. Dünyada Bankalar Bazında Dijital Enerji Finansmanı**

Uluslararası bankalar, dijital enerji finansmanının gelişiminde kritik roller üstlenmektedir. Özellikle Avrupa ve ABD merkezli büyük finans kuruluşları, sürdürülebilirlik stratejilerinin ayrılmaz bir parçası olarak dijital enerji projelerine yoğun şekilde finansman sağlamaktadır. Avrupa Yatırım Bankası (EIB), 2012–2019 yılları arasında iklimle ilgili projelere 100 milyar avrodan fazla kaynak ayırarak dijital enerji altyapılarının kurulmasını desteklemiştir. EIB'nin 2021–2025 İklim Bankacılığı Yol Haritası, enerji dönüşümünde dijital teknolojilerin finansmana entegrasyonunu hızlandırmayı hedeflemektedir.

Uluslararası ölçekte faaliyet gösteren diğer finans kuruluşları da yeşil tahvil ihraçları, sürdürülebilirlik bağlantılı krediler ve dijital enerji projeleri için özel finansman programları geliştirmektedir. Bu programlar; yapay zekâ destekli enerji optimizasyonu, blok zincir tabanlı karbon piyasaları ve IoT altyapısının geliştirilmesi gibi dijital çözümleri kapsamaktadır.

Dijital enerji finansmanında bankalar, geleneksel kredi mekanizmalarının ötesine geçerek, blok zincir teknolojisi ve büyük veri analitiğiyle kredi risklerini dinamik olarak yönetmekte, kredi geri ödeme süreçlerini dijital olarak izlemektedir. Bu yaklaşımlar, yatırımcı güvenini artırmakta ve finansal sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca, KOBİ'lerin dijital enerji projelerine erişimini kolaylaştırmak amacıyla dijital finansal platformlar ve fintech iş birlikleri de hayata geçirilmektedir.

#### **6.5. Dünyada Finansman Kuruluşları ve Özel Sektör Şirketleri Bazında Dijital Enerji Finansmanı**

Dünya genelinde kalkınma bankaları ve özel sektör, dijital enerji finansmanında öncü konumdadır. Dünya genelinde kalkınma bankaları ve özel sektör, dijital enerji finansmanında öncü konumdadır. Dünya Bankası, dijital enerji finansmanını desteklemek amacıyla küresel ölçekte yürütülen programlar aracılığıyla 2020–2025 döneminde milyarlarca dolarlık fon tahsis etmektedir. Uluslararası Finans Kurumu (IFC) da yenilenebilir enerji ve dijital enerji projelerine finansman sağlamakta, blok zincir tabanlı enerji ticareti platformlarını desteklemektedir.

Küresel ölçekte faaliyet gösteren önde gelen enerji şirketleri, dijital enerji dönüşümüne önemli yatırımlar yapmaktadır. Bu yatırımlar; yapay zekâ tabanlı enerji talep tahmini, IoT destekli dağıtık enerji kaynaklarının entegrasyonu, akıllı şebeke uygulamaları ve dijital enerji yönetimi çözümleri gibi alanları kapsamaktadır. Ayrılan yatırım fonları hem enerji sistemlerinin esnekliğini hem de verimliliğini artırmayı hedeflemektedir.

Enerji depolama ve dijital enerji yönetimi alanında, özellikle evsel ve ticari ölçekte kullanılan batarya sistemleri; güneş enerjisi panelleriyle entegre çalışarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Bazı pazarlarda, yüksek başlangıç maliyeti gerektirmeden sistem kurulumu yapılabilmesini sağlayan, aylık sabit ödemeye dayalı finansman modelleri uygulanmaktadır. Bu sayede geleneksel krediye erişimi olmayan bireyler de enerji sistemlerine erişim imkânı bulabilmektedir.

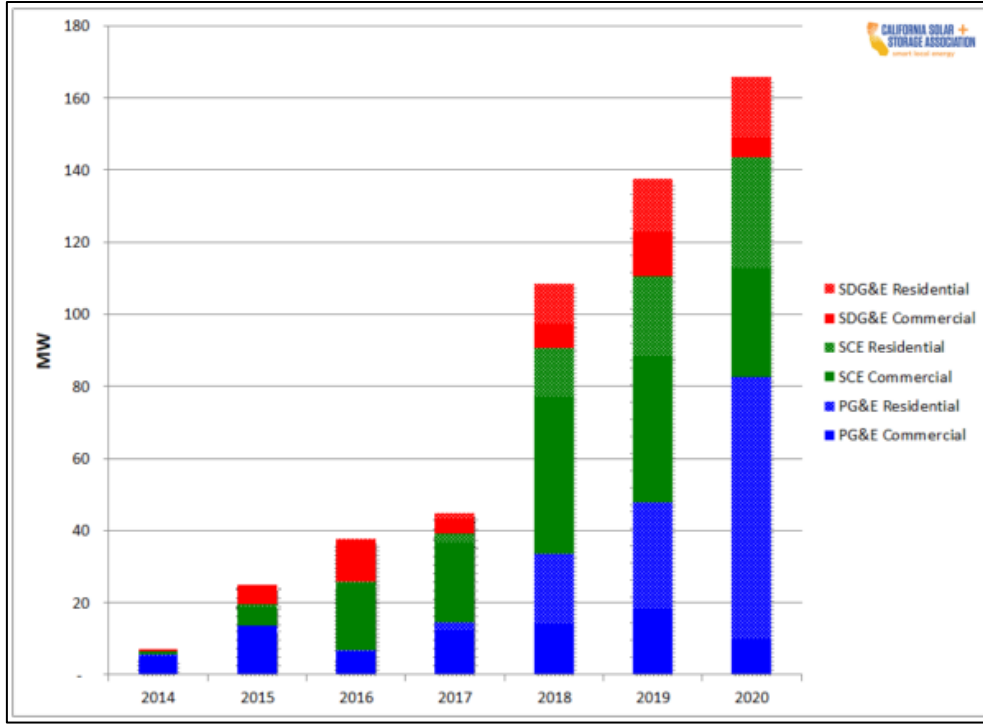
Ayrıca, enerji üretim ve tüketim dengesini merkezi bir yazılım üzerinden yöneten “sanal enerji santrali” (Virtual Power Plant – VPP) uygulamaları, birçok bölgede hayata geçirilmektedir. Bu modelde, yüzlerce konutun enerji depolama sistemleri merkezi yazılımla entegre edilerek arz-talep dengesi otomatik olarak yönetilir. Sistem, enerji sisteminin kararlılığını sağlarken kullanıcıya enerji satışından ek gelir elde etme imkânı sunar.

Finansman altyapısının dijital olarak izlenmesi, kullanıcıların gelir-gider dengesini gerçek zamanlı takip edebilmesini mümkün kılar.

Bu yaklaşımın ölçeklenme potansiyelini gösteren önemli bir örnek, Kaliforniya ve Avustralya’da uygulanan sanal enerji santrali projelerinin dağıtılmış enerji depolama kapasitesindeki artış verileridir.

Bu doğrultuda, dijital enerji finansmanının sanal enerji santrali ve enerji depolama uygulamalarıyla entegrasyonu, enerji piyasalarının esnekliğini artıran yeni bir yatırım modeli ortaya koymuştur. Gelişmiş veri analitiği, yapay zekâ tabanlı tahmin sistemleri ve gerçek zamanlı izleme teknolojileri sayesinde, bu yatırımların operasyonel performansı hem finansal kurumlar hem de kamu otoriteleri tarafından ölçülebilir ve doğrulanabilir hale gelmiştir. Böylece, enerji depolama kapasitesinin dijital altyapılarla bütünleşmesi; yatırımcı açısından risk yönetimini kolaylaştırırken, kamu politikaları açısından da enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine somut katkı sağlamaktadır.

Bu model, dijital finansman süreçlerinde şeffaflık, hesap verebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerini güçlendirerek, enerji sektöründe dijitalleşmenin kurumsal temellerini sağlamlaştırmaktadır.



Şekil 6.2.: Kaliforniya ve Avustralya'daki bir özel şirketin sanal enerji santralleri (VPP) kapsamındaki dağıtılmış enerji depolama kapasitesinin artışı

Şekil 6.2'de verilen grafikte görüldüğü üzere, 2014 yılında yalnızca birkaç MW seviyesinde olan kapasite, 2020 yılına gelindiğinde 160 MW'ı aşarak yaklaşık 16 kat artış göstermiştir. Büyümenin özellikle 2018 sonrasında hızlandığı, hem konut hem de ticari segmentlerde paralel şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu artış, dijital enerji finansman modelleri, yenilikçi teknolojiler ve kullanıcı odaklı çözümlerin birleşerek kısa sürede ölçeklenebilir sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yapay zekâ tabanlı optimizasyon, IoT ile gerçek zamanlı izleme ve esnek ödeme planları gibi unsurlar, kapasite artışını hızlandıran temel faktörlerdir.

Gelişmiş dijital enerji yönetim platformları, enerji depolama sistemlerinin piyasa fiyatlarına göre otomatik ve optimize biçimde alım-satım yapmasını sağlayarak finansal verimliliği artırmaktadır. Yapay zekâ destekli algoritmalar, enerji depolama sistemlerinin ne zaman doldurulacağı veya boşaltılacağına karar vererek hem kârlılığını hem de sistem verimliliğini yükseltmektedir.

Mevcut veriler, sanal enerji santrali projelerinin teknik ölçeğini ve zaman içindeki büyümesini net biçimde ortaya koymaktadır. Örneğin, yalnızca belirli bir bölgede 2020 yılında 165 MW/428 MWh dağıtılmış enerji depolama kapasitesi mevcutken, bu rakam günümüzde

yaklaşık 530 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, dijital enerji finansmanının teknik kapasiteyi büyütme ve yenilikçi enerji yönetimi modellerini yaygınlaştırma potansiyelini göstermektedir.

Sonuç olarak, dijital enerji finansmanı ve sanal enerji santralleri; enerji sistemlerinin esnek, sürdürülebilir ve kullanıcı katılımını artıran bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Bu model, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda enerjiye erişimde eşitliği de desteklemektedir. Hem küresel hem de ulusal ölçekte, bankacılık sisteminden teknoloji şirketlerine, regülatörlerden yatırımcılara kadar tüm paydaşların iş birliğiyle dijital enerji finansmanının kurumsal altyapısının güçlendirilmesi, düşük karbonlu geçişin en kritik bileşenlerinden biri olacaktır.

## 7. SONUÇLAR

Türkiye'nin enerji sektöründeki dijital dönüşüm süreci, yalnızca teknik modernizasyonun ötesinde; arz güvenliği, maliyet etkinliği, şeffaflık ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin aynı anda ilerletildiği stratejik bir dönüşüm olarak şekillenmektedir. Küresel eğilimlerle uyumlu biçimde, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği, dijital ikiz ve blok zincir teknolojilerinin politika, piyasa ve operasyonel düzeylerde entegrasyonu giderek güçlenmektedir. Bu gelişmeler, enerji ekosisteminde yalnızca üretim ve iletim değil, tüketim tarafının da aktif bir bileşen hâline gelmesini sağlamaktadır.

Dünya genelinde dijital enerji teknolojilerine yönelik yatırımlar hızla artmakta ve özellikle Almanya, Güney Kore, Hollanda, İtalya, Avustralya ve Japonya gibi ülkeler, sayaçlaşma, veri yönetimi, dağıtık üretim entegrasyonu ve ileri analitik tabanlı şebeke optimizasyonu gibi alanlarda olgun uygulama örnekleri sergilemektedir. Bu deneyimler, ulusal ölçekte ölçme-izleme altyapısının hızla yaygınlaştırılabileceğini, esnek güç sistemleri için dijital omurganın stratejik önemini ve yerel ihtiyaçlara uyarlanmış regülasyonların dönüşüm sürecini hızlandırabileceğini ortaya koymaktadır.

Türkiye, dijital enerji vizyonunu kalkınma, enerji arz güvenliği ve iklim dostu dönüşüm hedefleriyle bütünleştirmiştir. EPİAŞ'ın veri şeffaflığına yönelik adımları, TEİAŞ'ın yapay zekâ destekli yük tahmin sistemleri ve TEDAŞ'ın otomasyon projeleri, güçlü bir kurumsal altyapı oluşturmuştur. Ancak bölgesel altyapı farklılıkları, siber güvenlik kapasitesi ve kurumlar arası koordinasyon, önümüzdeki dönemde iyileştirilmesi gereken kritik alanlar arasında yer almaktadır.

Enerji sektöründe akıllı sayaç, SCADA/EMS/DMS modernizasyonu, kestirimci bakım sistemleri ve siber güvenlik altyapıları, operasyonel verimliliği artırarak kesinti sürelerini ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır. Yenilenebilir enerji yatırımlarında dijital izleme ve kontrol mekanizmaları, yatırımcı güvenini artırmakta ve özellikle 2022–2025 döneminde güneş enerjisi kurulu gücünün 9,7 GW'dan 19,6 GW'a yükselmesi, dijitalleşmenin yatırım ivmesini destekleyen kritik bir unsur olduğunu göstermektedir.

Blokzincir tabanlı enerji ticareti platformları, akıllı sözleşmeler ve mobil enerji yönetimi uygulamaları, tüketiciyi sistemin aktif bir oyuncusuna dönüştürmektedir. Bu teknolojiler, enerji sertifikalarının ve karbon kredilerinin izlenebilirliğini güçlendirirken, veri güvenliği ve işlem şeffaflığı gibi unsurları da pekiştirmektedir. Ayrıca yüksek kapasiteli veri merkezleri ve yapay

zekâ destekli analiz altyapıları, gerçek zamanlı piyasa yönetimi ve şebeke otomasyonu için gerekli dijital omurgayı sağlamaktadır.

Finansman boyutunda, yeşil tahviller, sürdürülebilirlik bağlantılı tahviller (SLB) ve dijital tokenizasyon yoluyla ihraç edilen menkul kıymetler, yalnızca yatırım fonlarını çekmekle kalmamakta; aynı zamanda karbon emisyonu azaltımının, yeni kapasite artışının ve enerji üretim performansının şeffaf biçimde raporlanmasına imkân tanımaktadır. Uluslararası uygulamalarda, bu finansman araçlarıyla elde edilen kaynakların rüzgâr, güneş, akıllı şebeke ve enerji depolama projelerine yönlendirilmesi; düşük karbonlu dönüşümün mali temellerini güçlendirmektedir.

Dijital enerji finansmanı alanında sanal enerji santrali (VPP) uygulamaları, kullanıcı katılımını ve sistem esnekliğini artıran yenilikçi bir model olarak öne çıkmaktadır. Konut ve ticari segmentte dağıtılmış enerji depolama sistemleri, merkezi yazılımlar aracılığıyla arz-talep dengesini otomatik olarak yönetebilmekte ve kullanıcılara enerji satışından ek gelir elde etme imkânı sunmaktadır. Kaliforniya'daki bir uygulamaya ait 2014–2020 dönemi verileri incelendiğinde, toplam kurulu depolama kapasitesinin yaklaşık 10 MW seviyelerinden 160 MW'ın üzerine çıktığı görülmektedir. Bu artış, yapay zekâ tabanlı optimizasyon, IoT tabanlı izleme sistemleri ve esnek ödeme planları gibi dijital finansman modellerinin birlikte çalıştığında, dağıtık depolama kapasitesinin kısa sürede katlanarak büyüebildiğini ortaya koymaktadır.

Türkiye'de dijital enerji finansmanı henüz gelişim sürecindedir. Yatırım bankacılığı, enerji altyapı projelerinin finansmanında önemli bir rol oynamakta olsa da, dijital teknolojilerin bu süreçlere entegrasyonu sınırlı kalmaktadır. Bu ekosistemin gelişmesi için düzenleyici çerçevenin açık standartlar, teşvik mekanizmaları ve dijital finansal araçlara yönelik güvenli piyasa yapıları ile güçlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle KOBİ'ler ve enerji kooperatifleri gibi yerel aktörlerin, dijital enerji projelerine erişimini artıracak fonların oluşturulması ve performans bazlı ödeme sistemlerinin yaygınlaştırılması önem arz etmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, dijital enerji dönüşümü; enerji sistemlerinin karbon nötrlüğü, toplumsal katılımı ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından temel bir araçtır. Türkiye'nin bu dönüşümde küresel ölçekte rekabetçi konumunu güçlendirmesi için kırsal kapsama alanlarında iletişim altyapısının iyileştirilmesi, depolama ve piyasa entegrasyonuna yönelik hukuki netliğin sağlanması, ulusal veri gölleri ve birlikte çalışabilir standartların oluşturulması, sektör-özel zorunlu siber güvenlik standartlarının getirilmesi, yerli yazılım ve donanım geliştirme kapasitesinin desteklenmesi ve tokenizasyon temelli finansman

modellerinin yaygınlaştırılması öncelikli adımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu adımların hayata geçirilmesi, Türkiye'nin esnek, düşük karbonlu ve dijital olarak yönetilebilen bir enerji sistemini ölçekli biçimde inşa etmesine ve bölgesel enerji dönüşümünde referans ülke konumuna yükselmesine katkı sağlayacaktır.



## 8. KAYNAKÇA

1. CB Dijital Dönüşüm Ofisi. (2021). *Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi (2021–2025)*. Ankara: T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi.
2. ESG News. (n.d.). *ESG News web sitesi*. Erişim tarihi: 15 Ağustos 2025.
3. International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Investment 2024*. Paris: IEA.
4. Energy Sustainability Directory. (2025). *Digitalising the energy sector—Girişim ve standartlar genel bakış*.
5. Eurostat. (2024). *Enterprises using AI technologies — 2024 edition*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
6. IoT Analytics Research. (2024). *Smart electricity meter penetration statistics (Europe, 2024)*.
7. BNP Paribas & EDF ENR. (2022). *Blockchain tabanlı yeşil tahvil pilotu: Yenilenebilir enerji finansmanı örneği*.
8. European Investment Bank (EIB). (2020). *EIB Climate Bank Roadmap 2021–2025*. Luxembourg: EIB.
9. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB). (2022). *Sürdürülebilir Enerji ve Altyapı Tesisleri Programı*. İstanbul: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası.
10. Tesla. (2023). *Virtual Power Plant (VPP) program overview*.
11. Agence Française de Développement (AFD). (2024). *Digital Energy Challenge Projects*.
12. BNP Paribas & EDF ENR. (2022). *Blockchain and green bond tokenization*.
13. Energy Sustainability Directory. (2025). *Green digital finance definition*.
14. Enerjisa. (2023). *Sürdürülebilirlik Raporu*. İstanbul: Enerjisa Enerji A.Ş.
15. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). *2023–2027 Stratejik Planı*. Ankara: ETKB.
16. EPIAŞ. (2024). *Şeffaflık Platformu & Veri Analitiği Portalı*. İstanbul: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
17. Eurostat. (2024). *Avrupa’da Yapay Zekâ Kullanımı*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
18. DMI. (2023). *Türkiye Dijital Olgunluk Endeksi*. Ankara: ETKB.
19. IoT Analytics Research. (2024). *Akıllı Savaş Penetrasyonu*.

20. International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Investment Report*. Paris: IEA.
21. International Energy Agency (IEA). (2024). *Digitalisation & Energy*. Paris: IEA.
22. Dünya Bankası. (2024). *Türkiye’de Dijitalleşme Çalışması*. Washington D.C.: World Bank.
23. TEDAŞ. (2022). *Dijital Dönüşüm Yol Haritası*. Ankara: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
24. TEİAŞ & Dünya Bankası. (2024). *Türkiye İletim Sistem Gelişmeleri (ISDP)*. Ankara: ETKB.
25. TEİAŞ & EÜAŞ. (2024). *SCADA Projeleri Raporu (2018–2028)*. Ankara.
26. Avrupa Yatırım Bankası (EIB). (2024). *Green/Social Bonds Report*. Luxembourg: EIB.
27. Özel Şirket Raporları (Kaliforniya & Avustralya). (2024). *Sanal Enerji Santralleri*.
28. Zhou, X., & Yin, Y. (2019). *Dijitalleşmenin Enerji Sistemine Etkileri*. Beijing: Energy Press.
29. CB Dijital Dönüşüm Ofisi. (2022). *Resmi Blog*. Ankara.
30. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024). *Basın Açıklamaları*. Ankara: ETKB.
31. EPİAŞ. (2024). *Veri Gölü Projesi*. İstanbul: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
32. Dünya Bankası. (2023). *Energy Sector Reports*. Washington D.C.: World Bank.
33. International Energy Agency (IEA). (2024). *Artificial Intelligence in Energy*. Paris: IEA.
34. International Energy Agency (IEA). (2023). *Smart Grid Reports*. Paris: IEA.
35. TEİAŞ. (2024). *10 Yıllık Kapasite Projeksiyonu*. Ankara: TEİAŞ.
36. Enerjisa. (2023). *Dijitalleşme Yatırımları*. İstanbul: Enerjisa Enerji A.Ş.
37. EÜAŞ. (2023). *Dijital İşletme Raporu*. Ankara: Elektrik Üretim A.Ş.
38. Türkiye Dijital Ekonomi Forumu (ETKB). (2024). *Dijitalleşme İndeksi Açıklamaları*. Ankara: ETKB.
39. World Bank. (2024). *Climate Finance Reports*. Washington D.C.: World Bank.
40. EIB. (2023). *Clean Energy Finance Reports*. Luxembourg: EIB.
41. Kaliforniya Enerji Komisyonu. (2024). *VPP Örnekleri*. Sacramento: California Energy Commission.
42. Avustralya Enerji Ajansı. (2024). *VPP Örnekleri*. Sydney: Australian Energy Agency.
43. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Veri Yayınları*. Ankara: ETKB.

44. CB Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *Kamu Yatırımlarında Dijitalleşme*. Ankara: T.C. Cumhurbaşkanlığı.