



2026'da Enerjide Dijital Dönüşüme Yön Veren 6 Temel Teknoloji

Haziran 2026

Yapay Zekâ | Üretken Yapay Zekâ | Nesnelerin İnterneti
Dijital İkizler | V2G | Yerel Enerji Optimizasyonu

Enerjide Dijitalleşme Derneği Hakkında

Enerjide Dijitalleşme Derneği (EDİDER) Türkiye'nin enerji alanında hızla gelişen dijital teknolojilerde öncü ve rekabetçi olması için tüm paydaşları bir araya getiren, ortak platformlar kuran ve strateji belirlemede karar alıcılara destek olacak Türkiye'nin enerjideki ileri teknoloji düşünce kuruluşu olarak 9 Ocak 2020 günü yola çıkmıştır.

Türkiye'de enerji, teknoloji ve iletişim alanında faaliyet gösteren önemli üyelerinin katkılarıyla EDİDER son 6 yılda çeşitli organizasyonlar, çalıştaylar ve içerikler üreterek enerji dönüşümünde dijitalleşmenin önemi konusunda farkındalığı arttıran çalışmalar yaparak bu alanın gelişimine katkı sağlamıştır.

Yazarlar: İlayda Girgin, Serhat Sidar Özdemir

Editör: Gökberk Bilgin

Bu rapor, www.edider.org adresinden indirilebilir.

Aksi belirtilmedikçe, bu yayında yer alan materyaller; kaynak ve telif hakkı sahibi olarak EDİDER'e uygun şekilde atıfta bulunulması kaydıyla serbestçe kullanılabilir, paylaşılabılır, kopyalanabilir, çoğaltılabilir, basılabilir ve/veya depolanabilir.

Bu yayında üçüncü taraflara atfedilen materyaller ise ayrı kullanım koşulları ve kısıtlamalara tabi olabilir. Bu tür materyallerin kullanımı öncesinde, ilgili üçüncü taraflardan gerekli izinlerin alınması gerekebilir.

Atıf: EDİDER (2026), *2026'da Enerjide Dijital Dönüşüme Yön Veren 6 Temel Teknoloji*, Enerjide Dijitalleşme Derneği, Türkiye.

Sorumluluk Reddi: Bu rapor çalışma kapsamında esas alınan kabuller, Haziran 2026 tarihi itibarıyla geçerli olan piyasa koşulları doğrultusunda hazırlanmıştır. Söz konusu piyasa koşulları zaman içerisinde değişiklik gösterebileceğinden, bu raporun hazırlanmasına katkı sağlayan kurum ve kişiler; raporda yer alan öngörülerin gerçekleşmemesi, farklı şekilde gerçekleşmesi veya piyasa koşullarındaki değişimlerden kaynaklanabilecek doğrudan ya da dolaylı ticari kazanç ya da kayıplardan sorumlu tutulamaz.

Tasarım: Flowgate

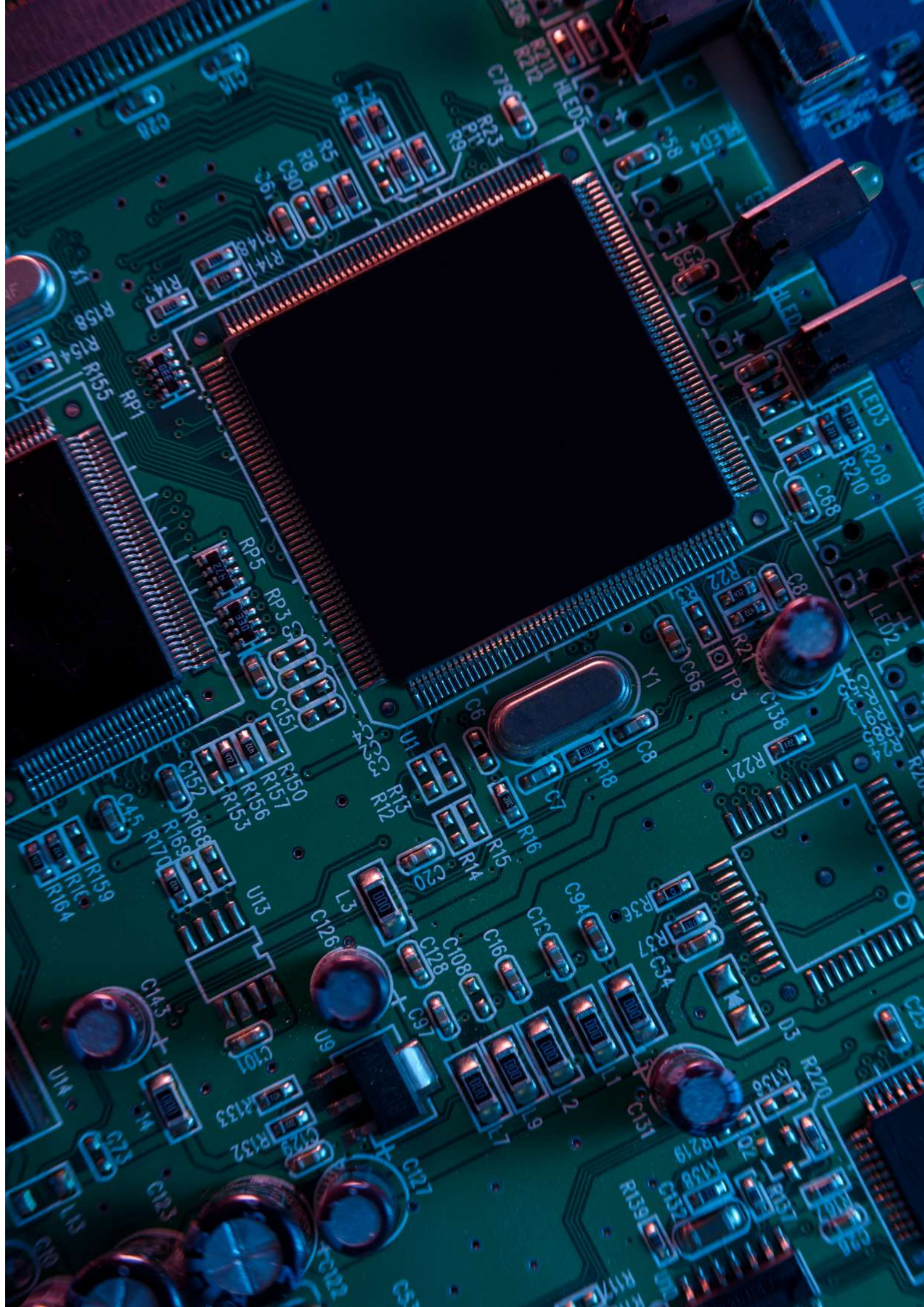
Haziran 2026

İçindekiler

Şekiller.....	04
Yönetici Özeti	06
Bölüm 1	
Giriş.....	08
Bölüm 2	
Yapay Zekâ ve Şebeke Operasyonları.....	30
Bölüm 3	
Nesnelerin İnterneti (IoT).....	43
Bölüm 4	
Dijital İkizler.....	51
Bölüm 5	
Araçtan Şebekeye Teknolojileri (V2G)	60
Bölüm 6	
Yerel Enerji Optimizasyonu.....	68
Bölüm 7	
Sonuç.....	75
Kaynakça.....	78

Şekiller

Şekil 1: Neden Dijitalleşme? Enerji Sistemi Dönüşümünün Temel Gücü.	08
Şekil 2: Enerji Dönüşümü ve Şebeke Yatırımları.	15
Şekil 3: Yapay Zekâda AB, ABD ve Çin Rekabati.	35
Şekil 4: Oxford Insights Devletlerin YZ Hazırlık Endeksi ve Türkiye.	37
Şekil 5: Küresel Endekslerde Türkiye'nin Yapay Zekâ Konumu.	41
Şekil 6: Enerji Sektöründe Nesnelerin İnterneti.	45
Şekil 7: Enerjide Siber Güvenlik ve IoT Riskleri.	49
Şekil 8: Dijital İkizler ve Küresel Pazar.	55
Şekil 9: Araçtan Şebekeye Pazarı.	61
Şekil 10: Karşılaştırmalı Analiz.	74



Yönetici Özeti

Küresel ölçekte enerji sektörüne yönelik yatırım iştahı tarihi seviyelere ulaşmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre 2025 yılında enerji sektörüne yönelen toplam sermaye akışının **3,3 trilyon ABD dolarına ulaşması** beklenmektedir. Bunun yaklaşık 2,2 trilyon doları yenilenebilir enerji, enerji depolama, şebeke modernizasyonu, elektrifikasyon ve dijital teknolojilere yönelmektedir. Enerji dönüşümünün merkezinde artık yalnızca yeni enerji üretim kapasitesi değil, bu kapasiteyi etkin şekilde yönetecek dijital sistemler yer almaktadır.

Rapor kapsamında değerlendirilen altı temel teknoloji; **Yapay Zekâ, Üretken Yapay Zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), Dijital İkizler, Araçtan Şebekeye Teknolojileri (V2G) ve Yerel Enerji Optimizasyonu** olarak belirlenmiştir. Bu teknolojiler birbirinden bağımsız gelişmeler değil; enerji sisteminin dijitalleşmesini mümkün kılan birbirini tamamlayan katmanlar olarak değerlendirilmektedir. Yapay zekâ karar verme süreçlerini hızlandırırken, IoT sistemleri veri üretmekte, dijital ikizler simülasyon ve optimizasyon sağlamaktadır. V2G ve yerel enerji optimizasyonu ise dağıtık enerji sistemlerinin ekonomik ve teknik olarak yönetilebilmesini mümkün hale getirmektedir.

Küresel rekabette üç farklı yaklaşım öne çıkmaktadır. **ABD teknoloji geliştirme kapasitesi, risk sermayesi ve yenilikçi girişim ekosistemiyle** lider konumunu korurken; **Çin devlet destekli altyapı yatırımları ve ölçek ekonomisiyle** enerjide dijitalleşmede hızla ilerlemektedir. **Avrupa Birliği ise dijitalleşmeyi regülasyon, veri yönetişimi ve standartlaşma ekseninde** şekillendirmektedir. Bu üç yaklaşımın ortak noktası ise enerji sistemlerinin geleceğinin dijital teknolojiler olmaksızın yönetilemeyeceği yönündeki güçlü kabuldür.

Raporun en önemli bulgularından biri, enerji dönüşümünün önündeki temel engelin artık enerji üretim kapasitesi değil, şebeke kapasitesi ve dijital altyapı yetersizlikleri olduğudur. Siemens tarafından gerçekleştirilen küresel araştırmaya göre **enerji yöneticilerinin %73'ü yetersiz şebeke altyapısını elektrifikasyonun önündeki en büyük engel olarak tanımlamaktadır**. Artan yenilenebilir enerji üretimi, elektrikli araçlar, veri merkezleri ve dağıtık enerji kaynakları mevcut enerji sistemlerinin daha akıllı, daha esnek ve daha öngörülebilir hale gelmesini zorunlu kılmaktadır.

Yapay zekâ, enerji sektöründe en hızlı gelişen teknoloji alanı olarak öne çıkmaktadır. Yük tahmini, üretim optimizasyonu, kestirimci bakım, piyasa analizi ve siber güvenlik alanlarında kullanılan yapay zekâ sistemleri enerji şirketlerinin operasyonel performansını önemli ölçüde artırmaktadır.

Nesnelerin İnterneti teknolojileri enerji sistemlerinin görünürlüğünü artıran temel yapı taşıdır. Akıllı sayaçlar, sensörler, saha ekipmanları ve dağıtık enerji kaynakları sayesinde enerji sistemleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve yönetilebilmektedir. **Dünya genelinde 1,2 milyarı aşan akıllı sayaç kurulumu** gerçekleştirilmiş durumdadır. Türkiye ise akıllı sayaç dönüşümünün başlangıç aşamasındadır ve 2035 yılına kadar %80 penetrasyon hedeflemektedir. Bu dönüşümün başarısı, şebeke dijitalleşmesi ve veri yönetimi altyapısının gelişimine bağlı olacaktır.

Dijital ikizler enerji sektöründe operasyonel mükemmelliğin yeni standardı haline gelmektedir. Fiziksel varlıkların gerçek zamanlı dijital kopyaları olarak çalışan bu sistemler; santrallerin, şebekelerin ve enerji ekipmanlarının performansını optimize etmekte, bakım maliyetlerini düşürmekte ve operasyonel riskleri azaltmaktadır. Özellikle **Avrupa Birliği'nin TwinEU projesi ve ABD ile Çin'deki büyük ölçekli uygulamalar, dijital ikizlerin gelecekte enerji sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde merkezi bir rol oynayacağını göstermektedir.** Türkiye'de ise bu alandaki uygulamalar henüz erken aşamadadır ve önemli büyüme potansiyeli taşımaktadır.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte V2G teknolojileri enerji sistemlerinde yeni bir esneklik kaynağı oluşturmaktadır. Elektrikli araç bataryalarının şebekeye enerji verebilmesini sağlayan bu yaklaşım, milyonlarca mobil depolama ünitesinin enerji sistemine entegre edilmesini mümkün kılmaktadır. ABD, Çin ve Avrupa Birliği bu alanda farklı modeller geliştirmekte olup **V2G teknolojileri geleceğin esneklik piyasalarının temel unsurlarından biri olarak görülmektedir.** Türkiye'de ise mevzuat eksikliği, çift yönlü şarj altyapısının yetersizliği ve dağıtım şebekelerinin dijital olgunluk seviyesi bu teknolojinin önündeki temel engellerdir.

Yerel enerji optimizasyonu ise merkezi enerji sistemlerinden dağıtık enerji sistemlerine geçişin temel bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. **Mikro şebekeler, enerji toplulukları, sanal güç santralleri ve üretici modelleri sayesinde enerjinin üretildiği yerde tüketilmesi mümkün hale gelmektedir.** Bu yaklaşım enerji kayıplarını azaltmakta, şebeke üzerindeki baskıyı düşürmekte ve enerji güvenliğini artırmaktadır. Türkiye'de lisanssız üretim düzenlemeleri ve enerji kooperatifleri bu dönüşümün temelini oluştursa da şebeke kapasite kısıtları ve yatırım süreçlerindeki belirsizlikler önemli engeller yaratmaktadır.

Türkiye'nin enerjide dijitalleşme alanındaki en önemli avantajları; **güçlü yenilenebilir enerji büyümesi, genç mühendislik havuzu, gelişen enerji teknolojileri ekosistemi ve stratejik coğrafi konumudur.** Buna karşılık **veri altyapısı, akıllı şebekeler, dijital beceriler, ileri teknoloji geliştirme kapasitesi ve yatırım ölçeği alanlarında** önemli açıklar bulunmaktadır. Oxford Insights Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi'nde Türkiye'nin teknoloji sektörü puanının 45,13 seviyesinde kalması, bu dönüşümün önündeki temel darboğazlardan birinin teknoloji geliştirme kapasitesi olduğunu göstermektedir.

Raporun temel sonucu, enerji sektöründeki rekabetin artık enerji üretim kapasitesi ile değil; veriyi yönetme, sistemleri optimize etme ve dijital teknolojileri ölçeklendirme kapasitesi ile belirlendiğidir.

Türkiye'nin 2053 net sıfır hedeflerine ulaşabilmesi ve enerji dönüşümünde bölgesel liderlik rolü üstlenebilmesi için üç stratejik öncelik öne çıkmaktadır: **şebeke dijitalleşmesinin hızlandırılması, enerji sektörüne özgü yapay zekâ ve veri yönetişimi çerçevesinin oluşturulması ve dijital dönüşümü yönetecek insan kaynağının geliştirilmesi.** Enerjinin geleceği daha fazla üretmekten çok, daha akıllı yönetebilmekle şekillenecektir. Bu nedenle dijitalleşme artık enerji sektörünün destekleyici bir unsuru değil, enerji dönüşümünün kendisidir.

1. Giriş

1.1. Enerjide Dijitalleşme

Enerjide dijitalleşme; güvenilirliği, verimliliği ve daha temiz enerji entegrasyonunu artırmak için yapay zekâ (YZ), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve dijital ikizler gibi dijital teknolojilerin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim süreçlerine entegre edilmesini içermektedir. 2025 yılında dijitalleşme, giderek daha karmaşık hâle gelen enerji sistemlerini ve büyük veri akışlarını yönetmek, enerji altyapısını güvence altına almak ve yeni iş modellerini mümkün kılmak anlamına gelmektedir (Bird & Bird, 2025). Enerji sistemi modellemesi, senaryo analizi ve metodoloji, gelişen dijital operasyonlara dayanmaktadır. Fiziksel altyapının dijital yeteneklerle birleştirilmesi yoluyla enerji dönüşümlerini kolaylaştırıcı bir rol üstlenmektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (UEA) Dünya Enerji Görünümü 2025 raporuna göre dijitalleşme, temiz enerji dönüşümü, enerji güvenliği ve sistem esnekliği, tüketici güçlendirme ve gelişmekte olan piyasaların atılım yapması gibi temel temaların tamamında yatay bir kolaylaştırıcı olarak ele alınmaktadır.

Şekil 1: Neden Dijitalleşme? Enerji Sistemi Dönüşümünün Temel Gücü

%73

Enerji yöneticilerinin %73'ü yetersiz şebeke altyapısını en büyük engel olarak görüyor.

Kaynak: Siemens, 2025

3.3T \$

2025 yılında enerji sektörüne toplam 3,3 trilyon \$ yatırım öngörülüyor. (2,2 trilyon \$ temiz enerjiye)

Kaynak: IEA, 2025

01

Altyapı Yetersizliği

Dağıtık enerji kaynaklarının artışı mevcut şebeke altyapısı üzerinde önemli bir baskı oluşturuyor.

02

İnsan Kaynağı Açığı

İşverenlerin %81'i beceri eksikliğini dönüşüm projelerinin önündeki bir numaralı bariyer olarak görüyor.



%81

03

Regülasyon Karmaşası

Sürekli değişen düzenlemeler ve uyumluluk gereksinimleri uygulama süreçlerini karmaşıklştırıyor.

Dijitalleşme; elektrik şebekeleri, son kullanıcı sektörleri, politika tasarımı ve teknolojik evrimle ilgili projeksiyonlara entegre şekilde işlenmektedir. Aynı zamanda dijitalleşme, standartlaşma, siber güvenlik, veri yönetimi ve finansman gibi alanlarda çözülmesi gereken sistemselsel bir sorun olarak çerçeveselenmektedir.

Raporda küresel elektrik talebinin önceki projeksiyonlara kıyasla daha hızlı arttığı vurgulanmaktadır (UEA, World Energy Outlook, 2025). Bu artış veri merkezleri, elektrikli ulaşım, ısıtma ve soğutma yükleri ile yeni gelişen dijital altyapı bileşenlerinden kaynaklanmaktadır.

Dolayısıyla veri işleme, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi dijital yüklerin enerji sisteminin asli bileşenleri hâline geldiği görülmektedir. Raporda yalnızca veri merkezlerine yapılan yatırımın 2025 yılı itibarıyla yaklaşık 580 milyar ABD dolarına ulaşmasının beklendiği belirtilmektedir (UEA, World Energy Outlook, 2025).

Bu yapısal dönüşüm, dijitalleşmeyi geleceğe hazır enerji sistemlerinin omurgası hâline getirmektedir. Enerji ekosistemleri daha fazla elektrifikasyona, merkezsizleşmeye ve değişken yenilenebilir kaynaklara yöneldikçe bu dönüşümün başarısı dijital altyapının sağlamlığına, yatırım akışlarının sürekliliğine, düzenleyici çerçevelerin uyum kapasitesine ve nitelikli insan kaynağının yeterliliğine bağlı hâle gelmektedir.

Yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde sektörün karşılaştığı en temel zorluk, üretimdeki kesintililik ve altyapı yetersizliğidir. Güneş ve rüzgâr gibi kaynaklar doğaları gereği değişkendir; güneş her zaman parlamaz ve rüzgâr her zaman esmez.

Bu durum enerji arzı ile talep arasında dengesizlikler yaratmaktadır. Buna ek olarak mevcut şebekeler fosil yakıtlara dayalı tek yönlü enerji akışı için tasarlanmıştır ve yenilenebilir enerjinin gerektirdiği çift yönlü ve dağıtık enerji akışını yönetmekte zorlanmaktadır.

Siemens'in Infrastructure Transition Monitor 2025 çalışmasına göre enerji yöneticilerinin yüzde 73'ü yetersiz şebeke altyapısını elektrifikasyonun önündeki en büyük engel olarak tanımlamaktadır. Yöneticilerin yüzde 74'ü akıllı şebekeler ve şebeke yazılımlarının bu sorunun aşılmasında kritik rol oynayacağını vurgulamaktadır (Siemens, 2025).

Takip eden bölümler, 2025 yılında enerji sektöründe dijitalleşmenin nasıl uygulamaya geçirildiğini incelemek üzere altyapı, sistem kapasitesi, yatırım gereksinimleri, düzenleme ve işgücü dinamiklerine odaklanmaktadır.

1.2. Enerji Sektöründe Dijitalleşmede Ana Teknolojiler

a) Yapay Zekâ

Yapay zekâ, makinelerin veri analizi, örüntü tanıma ve karar verme gibi insan benzeri bilişsel işlevleri yerine getirmesini sağlayan teknolojiler bütünüdür. Enerjinin dijitalleşmesinde ise yenilenebilir enerjinin en büyük sorunu olan belirsizliği yönetmektedir.

Geçmiş veriler ve hava durumu modellerini analiz ederek güneş ve rüzgâr üretimini yüksek doğrulukla tahmin etmekte, şebekedeki talep artışlarını önceden öngörerek operatörlerin yükü dengelemesini sağlamaktadır.

Bu yönüyle enerji sektörünü dönüştürme potansiyeline sahiptir. Buna karşılık UEA'nın Energy and AI 2025 raporuna göre veri merkezlerinin elektrik talebi şebeke üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır.

Google ve Microsoft gibi teknoloji şirketleri bu talebi karşılamak amacıyla jeotermal ve nükleer gibi temiz enerji kaynaklarına yönelmektedir. UEA verilerine göre yalnızca Avrupa Birliği içindeki veri merkezi elektrik tüketiminin 2030 yılında 115 TWh'ye ulaşacağı öngörülmektedir (UEA, Energy and AI, 2025). Bu durum hem iletim altyapısının hem de dijital işlem kapasitesinin güçlendirilmesini gerektirmektedir.



b) Üretken Yapay Zekâ

Üretken yapay zekâ, mevcut verilerden öğrenerek yeni içerik, kod, görsel, senaryo ve veri kümeleri oluşturabilen gelişmiş YZ sistemleridir. Geleneksel yapay zekâdan farklı olarak şebeke operatörlerinin eğitimi için gerçekçi simülasyonlar ve sentetik veriler üretmekte, böylece gerçek sistemlerde risk almadan personelin yetkinliğini artırmaktadır.

Nadir görülen şebeke arızalarını, siber saldırı senaryolarını ve aşırı hava koşullarını simüle ederek sistem dayanıklılığını test etmektedir. Örneğin bir santral operatörü, üretken YZ sayesinde 100 yılda bir görülebilecek bir kasırga senaryosunu sanal ortamda deneyimleyebilmekte ve acil durum prosedürlerini geliştirebilmektedir.

Deloitte'un 2025 Enerji Sektörü Görünüm raporuna göre üretken YZ, enerji sektöründe operasyonel verimliliği yüzde 25-35 oranında artırma ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir (Deloitte, 2024).

Bu teknoloji aynı zamanda enerji piyasası analizleri için raporlar üretmekte, karmaşık veri kümelerini anlaşılır hale getirmekte ve karar vericilere stratejik öneriler sunmaktadır. Gelişen dil modelleri sayesinde farklı paydaşlar arasındaki teknik iletişimi kolaylaştırmakta, mühendislik dokümantasyonunu otomatik olarak oluşturmakta ve düzenleyici uyumluluk süreçlerini hızlandırmaktadır.

c) Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin İnterneti, fiziksel enerji altyapısını konuşabilir ve akıllı hâle getiren temel teknoloji katmanıdır. Milyonlarca sensör, akıllı sayaç ve bağlı cihaz aracılığıyla şebekenin her noktasından anlık veri toplanmaktadır.

Trafo merkezlerindeki sıcaklık sensörleri, iletim hatlarındaki titreşim algılayıcıları, güneş panellerindeki verimlilik izleyicileri ve rüzgâr türbinlerindeki rüzgâr hızı ölçüm cihazları sürekli veri akışı sağlamaktadır. Bu sayede arızaların yeri anında tespit edilebilmekte veya oluşmadan önce öngörülebilmektedir.

Örneğin bir trafonun normalden yüksek ısı değerleri göstermesi durumunda sistem otomatik uyarı vererek büyük bir arızayı önleyebilmektedir. IoT, eski ve sınırlı görünürlüğe sahip şebekeleri tamamen görünür ve yönetilebilir akıllı şebekelere dönüştürmektedir.

Fortune Business Insights'ın (2025) pazar analizlerine göre, küresel IoT pazarı 2025 yılında 864 milyar ABD doları büyüklüğe ulaşırken; enerji ve kamu hizmetleri (Utilities) bu pazarın en hızlı büyüyen segmentlerinden biri olmaya devam etmektedir. Sektörel

projeksiyonlar, 2026 yılında yatırımların %10'un üzerinde bir artışla ivme kazanacağını öngörmektedir.

Tüketici tarafında ise akıllı termostatlar, enerji yönetim sistemleri ve elektrikli araç şarj istasyonları talep tarafı yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu ekosistem sayesinde enerji tüketimi optimize edilmekte, maliyetler düşmekte ve karbon ayak izi azalmaktadır.

d) Dijital İkizler

Dijital ikizler, fiziksel varlıkların gerçek zamanlı verilerle beslenen, dinamik ve etkileşimli sanal kopyalarıdır. Gerçek zamanlı veri entegrasyonu ve gelişmiş simülasyon yetenekleriyle enerji sektörünün en stratejik araçlarından biri hâline gelmiştir. 2035 yılına kadar yıllık %35,7 oranında büyümesi beklenen bu teknoloji alanı, enerji santrallerinden rüzgâr çiftliklerine, şehir şebekelerinden denizaltı kablolarına kadar pek çok varlığın performansını optimize etmekte ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır.

Bir dijital ikiz, fiziksel varlığın tüm özelliklerini, davranışlarını ve çevresel etkileşimlerini sanal ortamda modellemektedir. Örneğin bir rüzgâr türbininin dijital ikizi, kanat açısını, rüzgâr koşullarını, mekanik aşınmayı ve enerji üretimini gerçek zamanlı olarak simüle etmektedir. En önemli katkısı risksiz simülasyon imkânıdır. Operatörler



yeni entegrasyonları, yazılım güncellemelerini veya ekipman değişikliklerini gerçek şebekede denemeden önce sanal ortamda test edebilmektedir. IEEE yayınlarında belirtildiği üzere dijital ikizler, özellikle mikro şebekelerin yönetimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve arıza öngörüsü açısından hayati bir araçtır (Ebrahimi vd., 2025).

Bu teknoloji aynı zamanda varlık ömrü boyunca tasarım, işletme ve bakım süreçlerini birbirine bağlayarak mühendislik kararlarını veri odaklı hâle getirmektedir. Siemens ve GE gibi şirketler, dijital ikiz platformları üzerinden müşterilerine ekipman verimliliğinde %10-25 artış sağlamaktadır.

e) Araçtan Şebekeye Teknolojisi (V2G)

V2G, elektrikli araçların bataryalarında depolanan enerjinin elektrik şebekesine geri satılmasını ve şebeke dengeleme hizmeti sunmasını sağlayan çift yönlü enerji transfer sistemidir. Bu teknoloji, park halindeki milyonlarca elektrikli aracı mobil enerji depolama birimi olarak kullanarak şebekeye esneklik kazandırmaktadır.

Enerji üretiminin fazla olduğu saatlerde araçlar şarj olur; talebin zirve yaptığı akşam saatlerinde ise araçlar depoladıkları enerjiyi şebekeye geri satarak gelir elde eder. Bu, şebeke dengesizliğini gideren dinamik bir tampon görevi görmektedir.

BloombergNEF'in 2024 raporuna göre dünya genelinde 2030 yılına kadar 240 milyon elektrikli aracın yollarda olması ve bunların toplam depolama kapasitesinin 14 TWh'yi bulması beklenmektedir (BloombergNEF, 2024). Bu kapasite, büyük ölçekli batarya santrallerine olan ihtiyacı önemli ölçüde azaltabilecek düzeydedir.

V2G teknolojisinin yaygınlaşması için akıllı şarj istasyonları, çift yönlü invertörler ve blok zincir tabanlı enerji ticaret platformları gibi altyapı yatırımları gerekmektedir. Ancak batarya ömrü, standart eksikliği ve düzenleyici belirsizlikler hâlen aşılması gereken engellerdir.

f) Yerel Enerji Optimizasyonu

Yerel enerji optimizasyonu, enerjinin uzun mesafelerden taşınması sırasındaki iletim kayıplarını ve ana şebeke üzerindeki yükü minimize eden yerinde üretim ve tüketim modelidir. Bu yaklaşım, enerjinin üretildiği yerde tüketilmesini teşvik etmektedir.

Yerel mikro şebekeler ve enerji toplulukları sayesinde, tüketiciler aynı zamanda prosumer (türetici) haline dönüşmekte, enerji bağımsızlığı artarken merkezi altyapı maliyetleri düşmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) göre yerel enerji sistemleri, iletim ve dağıtım kayıplarını %30-40 oranında azaltabilmektedir

(IRENA, 2024). Ayrıca bu model, enerji güvenliğini artırmakta ve merkezi şebeke arızalarından etkilenme riskini düşürmektedir. Blockchain teknolojisi, akıllı kontratlar ve eşler arası enerji ticaret platformları sayesinde bir mahalle sakininin çatı güneş panelinden ürettiği fazla enerjiyi komşusuna doğrudan satabilmesi mümkün hale gelmektedir.

Brooklyn Microgrid ve Sonnen Community gibi öncü projeler bu modelin işlevliliğini kanıtlamıştır. Yerel optimizasyon aynı zamanda elektrikli araç şarj istasyonlarının akıllı yönetimi, ısı pompalarının koordinasyonu ve bina enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonunu içermektedir. Bu sayede elektrik talebi daha öngörülebilir hale gelmekte ve yenilenebilir enerjinin değişkenliği yerel düzeyde dengelenmektedir.

1.3. Küresel Yatırım Hacimleri ve Trendleri

BloombergNEF'in yıllık raporuna göre, 2024 yılında düşük karbonlu enerji dönüşümüne yapılan küresel yatırım, bir önceki yıla göre %11 artışla rekor seviye olan 2,1 trilyon Amerikan dolarına ulaşmıştır (BloombergNEF, 2025). UEA'nın Dünya Enerji Görünümü 2025 raporuna göre ise 2025 yılında enerji sektörüne toplam sermaye akışının 3,3 trilyon Amerikan dolarına yükselmesi ve bunun yaklaşık 2,2 trilyon Amerikan dolarının yenilenebilir enerji, nükleer, şebekeler, depolama, düşük emisyonlu yakıtlar, verimlilik ve elektrifikasyona yönelmesi beklenmektedir (UEA, Global Energy Review, 2025).

YZ, IoT, dijital ikizler ve dağıtık enerji teknolojileri milyarlarca Amerikan dolarlık risk sermayesi çekerken stratejik satın almaların da tetikleyicisi olmaktadır. Teknoloji devleri, YZ veri merkezlerini beslemek için nükleer enerjiye yönelerek dönüştürücü oyuncular haline gelmiş; geleneksel enerji şirketleri ise geride kalmamak için dijital yetenekleri satın alma yarışına girmiştir.

a) YZ ve Üretken YZ

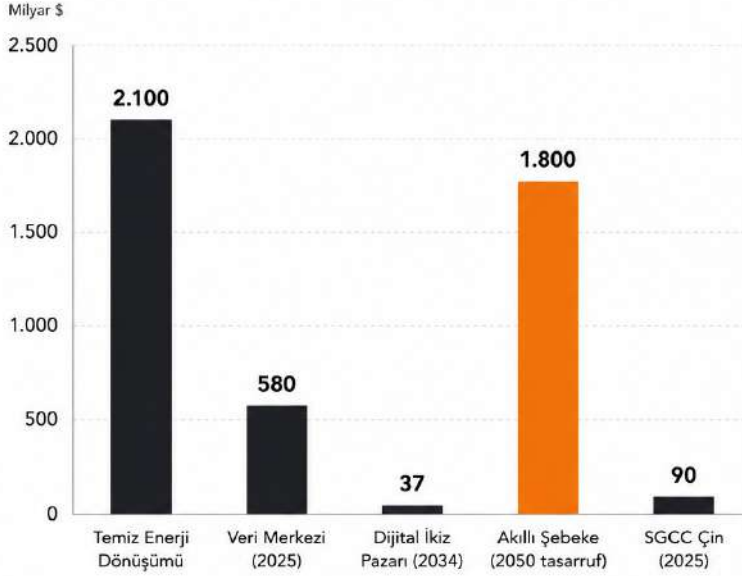
Enerjide YZ pazarı hızla büyümektedir. Argonne Ulusal Laboratuvarı'nın araştırmasına göre, YZ destekli kestirimci bakım uygulamaları güneş projelerinde %43-56 oranında maliyet düşüşü sağlamaktadır (Argonne National Laboratory, 2025).

Capgemini'nin 2024 anketine göre enerji kuruluşlarının %25'i artık bazı veya tüm fonksiyonlarında üretken YZ'yi etkinleştirmiştir; bu oran 2023'te sadece %3 idi (Enlit World, 2024). Infosys'in raporuna göre üretken YZ, enerji sektöründe şebeke optimizasyonu, talep tahmini ve müşteri hizmetleri alanlarında giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır (Infosys, 2024).

Şekil 2: Enerji Dönüşümü ve Şebeke Yatırımları

Enerji Dönüşümü ve Şebeke Yatırımları

Karşılaştırmalı yatırım büyüklükleri (Milyar \$)



Kaynak: BloombergNEF (2025), China Daily (2024), Amazon

2.1T \$

Düşük karbonlu enerji yatırımı

BloombergNEF, 2025

600 Milyar ¥

Çin SGCC şebeke yatırımı
(2025: 650 Milyar ¥)

China Daily, 2024

500M \$

Amazon X-energy Seri C-1
nükleer enerji yatırımı

2024

Crunchbase verilerine göre 2024 yılının son çeyreğinde YZ, veri merkezi ve enerji startup'ları büyük sermaye akışları almıştır (Crunchbase News, 2024). Öne çıkan turlar arasında X-energy'nin Amazon öncülüğündeki 500 milyon Amerikan dolarlık Seri C-1 turu yer almaktadır (ANS Nuclear Newswire, 2024).

National Grid Partners, YZ çözümlerine özel 100 milyon Amerikan dolarlık taahhüt açıklamış ve ilk yatırımını YZ destekli enerji tahmini yapan Amperon'a yapmıştır. National Grid Partners, Nisan 2024 itibarıyla 2018'deki kuruluşundan bu yana 50'den fazla yatırımda 450 milyon Amerikan dolarının üzerinde sermaye dağıtmıştır; portföyünde 1 milyar Amerikan dolarının üzerinde değerlendirilen 5 unicorn şirket bulunmaktadır (PR Newswire, 2024).

b) IoT ve Dijital İkizler

UEA'ya göre şebeke dijitalleşmesine yönelik yatırımlar kritik önem taşımaktadır. UEA'nın akıllı şebeke ile ilgili raporuna göre, dijital teknolojiler 2050'ye kadar küresel çapta 1,8 trilyon Amerikan dolarlık şebeke yatırımı tasarrufu sağlayabilir; ancak gelişmekte

olan ÷lkelerde altyapının yeterince yükseltilmemesi ve dijitalleşmemesi durumunda ekonomik çıktı yaklaşık 1,3 trilyon Amerikan doları azalabilir (UEA, Unlocking Smart Grid Opportunities in Emerging Markets, 2023). Bir diğler raporda ise ulusal iklim hedeflerini karşılamak için şebeke yatırımlarının 2030'a kadar yıllık 600 milyar Amerikan dolarının üzerine çıkacağı öngörülmektedir (UEA, Electricity Grids and Secure Energy Transitions, 2023).

Enerji sektöründe dijital ikizler hızla büyüyen bir segment olarak öne çıkmaktadır. Market.us'un raporuna göre, enerji sektöründeki dijital ikiz pazarı 2024'te 2,4 milyar Amerikan dolar değerinde olup 2034'te 37,3 milyar Amerikan dolarına ulaşması öngörülmektedir; bu da %31,4'lük bir bileşik yıllık büyüme oranına karşılık gelmektedir. 2024 yılında Kuzey Amerika %34,2'lik payla pazara hakim konumdadır (Market.us, Global Digital Twins in Power Market Size, Share Analysis Report, 2025).

c) Yerel Enerji Optimizasyonu

BloombergNEF'in raporuna göre, kanıtlanmış, ticari olarak ölçeklenebilir ve yerleşik iş modellerine sahip teknolojiler, yani yenilenebilir enerji, enerji depolama, elektrikli araçlar ve şebekeler gibi, 2024'te yatırımın büyük çoğunluğunu oluşturmuş ve bu sektörler %14,7 büyümeye 1,93 trilyon Amerikan doları çekebilmiştir (BloombergNEF, 2025).

d) Birleşme, Satın Almalar ve Stratejik Yatırımlar

Enerji sektörünün dijital dönüşümü 2024-2025 döneminde birbirine zıt iki yatırım paradigması ile şekillenmektedir. Batıda şirketler dijital yetenekleri satın alma yoluna giderken, Doğuda ve özellikle Çin'de devlet destekli devasa iç yatırımlar ve altyapı inşası öne çıkmaktadır.

Enerji sektörünün dijital dönüşümü 2024-2025 döneminde birbirine zıt iki yatırım paradigması ile şekillenmektedir. Batıda şirketler dijital yetenekleri satın alma yoluna giderken, Doğuda ve özellikle Çin'de devlet destekli devasa iç yatırımlar ve altyapı inşası öne çıkmaktadır.

Avrupa

Smart Energy International'ın 2024'ün en önemli akıllı enerji satın almalarını inceleyen raporuna göre, Avrupa kamu hizmetleri stratejik dijital satın almalara öncülük etmiştir (Latief, 2024). Örneğin Centrica, Ağustos 2024'te teknoloji tedarikçisi ENSEK'i ve şirketin tescilli platformu Ignition'ı bünyesine katarak dijital altyapısını güçlendirmiştir. Bu

satın alma, Centrica'nın perakende kolu olan British Gas'ın mevcut müşteri tabanının halihazırda söz konusu platforma entegre olması nedeniyle stratejik bir önem taşımaktadır (Centrica, 2024).

Çin

Çin'de kamu hizmetlerinin omurgasını oluşturan Kamu İktisadi Teşebbüsleri, satın almadan ziyade devasa bütçelerle kendi dijital ekosistemlerini inşa etmektedir. Dünyanın en büyük kamu hizmeti şirketi olan State Grid Corporation of China (SGCC), şebeke inşası için 2024 yılında 600 milyar yuanın üzerinde yatırım yapmış, 2025 yılı için ise 650 milyar yuanın, yaklaşık 90 milyar ABD dolarının, üzerinde yatırım planlamıştır (China Daily, 2024; Bloomberg, 2025).

Bu yatırımların odağında Güçlü Akıllı Şebeke (Strong Smart Grid) ve Her Yerde Bulunan Güç Nesneleri İnterneti (Ubiquitous Power Internet of Things) vizyonu yer almaktadır (Xinhua, 2019). SGCC, artan yenilenebilir enerji payını yönetebilmek amacıyla yapay zekâ destekli yük tahminleme sistemleri geliştirmektedir.

Şirket, genel merkezi ve 27 eyalet şubesi için geliştirdiği yapay zekâ platformu aracılığıyla elektrik yüklerini gerçek zamanlı olarak dengelemektedir (CRI Online, 2025). Grid Mind (Guangming Model) gibi veri güdümlü çerçeveler, derin öğrenme algoritmalarına dayanmaktadır (SGCC Press, 2024).

ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'na benzer bir yaklaşımla, kontrol odalarında dijital ikizler ve sanal operatör asistanları kullanılarak insan hatası minimize edilmektedir (NREL News, 2023).

e) Petrol ve Gaz Devleri

Batı: Petrol ve gaz sektöründe Batılı enerji devleri, teknoloji girişimlerine yatırım yaparak ve küresel konsorsiyumlar oluşturarak portföylerini çeşitlendirmektedir. 2024–2025 döneminde Infravision, CRI ve HySiLabs gibi enerji teknolojisi girişimlerine yatırım yapılmıştır (Equinor, 2024). Ayrıca SolarQuarter ve Sustainability Magazine kaynaklarına göre BP, Shell, TotalEnergies ve Equinor, Kasım 2024'te Sahra Altı Afrika ile Güney ve Güneydoğu Asya'daki enerji erişim projeleri için birlikte 500 milyon ABD doları tutarında taahhütte bulunmuştur (SolarQuarter, 2024; Sustainability Magazine, 2024).

Çin

Çin’de ise geleneksel bir petrol ve gaz devi olan Sinopec, dönüşüm stratejisini hidrojen ve dijitalleşmenin birleşimi üzerine kurmuştur. Şirket, hidrojen değer zincirini geliştirmek amacıyla uzun vadeli sermaye harcamalarında hidrojen için 30 milyar yuani aşan doğrudan taahhütlerde bulunmuş ve toplamda 100 milyar yuanlık kapsamlı bir temiz enerji yatırım planı açıklamıştır (Bloomberg, 2021). Ayrıca inovasyonu desteklemek amacıyla 5 milyar yuanlık, yaklaşık 690 milyon ABD doları tutarında, hidrojen odaklı bir girişim sermayesi fonu olan Sinopec Enze Fund kurulmuştur (Caixin Global, 2020).

Sinopec’in dijitalleşme stratejisi, hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımının optimize edilmesini kapsamaktadır. İç Moğolistan’da kurulan dünyanın en büyük yeşil hidrojen-kömür kimyasal projesi, rüzgâr ve güneş enerjisi ile elektrolizörlerin çalışmasını koordine eden gelişmiş dijital kontrol sistemlerine dayanmaktadır (Xinhua, 2023). Ayrıca Cummins ile kurulan ortak girişim aracılığıyla akıllı elektrolizör üretimine yatırım yapılmaktadır (Reuters, 2021).

g) Teknoloji Devleri: Enerji Üretimi ve Entegrasyon

Teknoloji şirketleri, YZ veri merkezi güç taleplerinin yönlendirmesiyle enerji yatırımında en yıkıcı güç olarak ortaya çıkmıştır. ABD devleri nükleere yönelirken, Çinli devler donanım ve yazılım bağımsızlığına odaklanmaktadır.

ABD

CNBC’nin haberine göre Microsoft, Amazon, Google ve Meta gibi teknoloji devleri nükleer enerjiye büyük yatırımlar yapmaktadır (CNBC, 2024). Constellation Energy, Eylül 2024’te Microsoft ile 20 yıllık bir enerji satın alma anlaşması imzalamıştır. Bu anlaşma, Three Mile Island Unit 1’in yeniden başlatılmasını sağlayacaktır. Constellation, 2028’e kadar (son güncellemelere göre 2027 gibi erken bir tarihte) santrali yeniden başlatmak için 1,6 milyar Amerikan dolarlık yatırım yapacaktır.

Tesis, 835 MW kapasiteye sahiptir (CNBC, 2024; Utility Dive, 2025). Buna ek olarak Google ve Kairos Power, Ekim 2024’te küçük modüler reaktörlerden enerji satın almak için dünyanın ilk kurumsal anlaşmasını imzalamıştır (Google, 2024). Master Plant Development Agreement kapsamında, 2035’e kadar toplam 500 MW kapasiteli bir dizi ileri reaktör santrali geliştirilecektir. İlk reaktörün 2030’a kadar devreye girmesi hedeflenmektedir. Anlaşma, 6-7 reaktörün (bir adet 50 MW ve ardından her biri iki adet 75 MW’lık reaktör içeren üç santral) kurulmasını öngörmektedir (Google, 2024).

Amazon Web Services, Mart 2024'te Talen Energy'nin Susquehanna nükleer santralinin yanındaki 960 MW'lık Cumulus veri merkezi kampüsünü 650 milyon Amerikan dolara satın almıştır (ANS Nuclear Newswire, 2024). Haziran 2025'te bu ilişki genişletilerek 1.920 MW'lık yeni bir PPA imzalanmıştır. Ayrıca Amazon, Ekim 2024'te X-energy'nin 500 milyon Amerikan dolarlık Seri C-1 fonlama turuna ana yatırımcı olarak katılmış olup, 2039'a kadar ABD genelinde 5 GW'ın üzerinde yeni güç projesini devreye almayı hedeflemektedir (Data Center Frontier, 2024).

Çin

ABD yaptırımları sonrası strateji değiştiren Huawei, Digital Power birimi ile enerji sektöründe baskın bir oyuncu haline gelmiştir (Huawei, 2024). Huawei'nin yatırım kolu Habo, tedarik zincirini güvence altına almak için yarı iletkenler, kurumsal hizmetler ve elektronik malzemeler alanlarındaki start-up'lara yatırım yapmaktadır (Lew, 2024).

Habo, 2023 yılı sonuna kadar büyük çoğunluğu yarı iletken sektöründeki start-up'lara olmak üzere 97 yatırım gerçekleştirmiştir (Huawei Central, 2024). Fiziksel yapay zekâ ve bedenlenmiş yapay zekâ (embodied AI) üzerine çalışan Spirit AI'a yapılan Habo yatırımı, Huawei'nin robotik alanındaki ilk girişimini temsil etmekte ve otonom sistemler için potansiyel uygulamalar sunmaktadır (TrendForce, 2025).

Huawei, Tencent ve Alibaba, ABD yaptırımlarının etkisini azaltmak amacıyla açık kaynaklı RISC-V komut seti mimarisi temelinde çipler geliştirmek için Beijing Open Source Chip Research Institute bünyesinde bir konsorsiyum oluşturmuştur (Pan, 2022).

1.4. Enerji Sektöründe İnsan Kaynakları ve Dijitalleşme

Enerji sektörü, dijitalleşme ve yeşil dönüşüm süreçleriyle birlikte iş gücü yapısında köklü bir değişim yaşamaktadır. Bu başlık küresel yetenek açığı, demografik değişimler ve Türkiye'deki verimlilik sorunlarını ele almakta ve çözüm mekanizması olarak Yerel Enerji Optimizasyonu, V2G teknolojisi, YZ, Dijital İkizler, Üretken YZ ve IoT kavramlarına odaklanmaktadır.

Dünya Ekonomik Forumu (DEF)'in Geleceğin Meslekleri 2025 raporu, dijital erişimin genişletilmesinin ve yeşil dönüşümün 2030'a kadar milyonlarca yeni iş yaratacağını, ancak bu işlerin ileri teknoloji okuryazarlığı gerektireceğini vurgulamaktadır (DEF, 2025). Bu demografik baskı ve yetenek krizi, DEF'in 2025 raporundaki sektörel verilerle

de doğrulanmaktadır. Rapora göre, enerji teknolojisi ve kamu hizmetleri sektöründeki işverenlerin %43'ü, yaşanan ve azalan çalışma çağındaki nüfusu, iş dönüşümlerini etkileyen en kritik makro trendlerden biri olarak tanımlamaktadır. Bu örnek sektördeki kurumsal hafıza kaybı riskini somutlaştıran en önemli göstergelerden biridir. Enerji teknolojisi sektöründeki şirketlerin %81'i, işgücü piyasasındaki beceri eksikliğini dönüşümün önündeki bir numaralı bariyer olarak görmektedir (DEF, 2025).

Petrol ve doğal gaz sektöründe ise bu oran %54 seviyesindedir (DEF, 2025). Bu açığı kapatmak için şirketler dışarıdan yetenek bulmaktan ziyade içerideki kaynağı dönüştürmeye yönelmiştir. Öyle ki, petrol ve doğal gaz sektörü, %96 oranında mevcut iş gücünü yetkinleştirme stratejisini benimseyerek, tüm sektörler arasında bu alana en fazla yatırım yapmayı planlayan endüstri olmuştur (DEF, 2025).

Yeşil ve dijital dönüşümün kesişim noktasında ise talep edilen roller ve beceriler hızla değişmektedir. Sektörde yapay zekâ ve makine öğrenimi uzmanları ile yenilenebilir enerji mühendisleri, önümüzdeki beş yılın en hızlı büyüyen iş rolleri arasında yer almaktadır. Buna karşılık, çalışanlardan beklenen yetkinlik setinde köklü bir değişim yaşanmaktadır; enerji teknolojisi sektöründe yapay zekâ ve büyük veri becerilerine olan talebin %91 oranında artması beklenirken, siber güvenlik yetkinliklerine olan talep artışı %79 seviyesindedir (DEF, 2025).

Özellikle V2G teknolojisinin yaygınlaşması ve yerel enerji optimizasyonu ihtiyacı otomotiv ve veri yönetimini de kapsayan disiplinler arası hibrit rolleri zorunlu kılmakta buna karşılık, çalışanlardan beklenen yetkinlik setinde köklü bir değişim yaşanmaktadır.

DEF raporunu destekler nitelikte, UEA'nın Dünya Enerji İstihdamı 2025 raporu, krizin boyutunun yalnızca mühendislik veya liderlik rolleriyle sınırlı olmadığını ortaya koymaktadır. Rapora göre, enerji işgücünün %54'ünü oluşturan uygulamalı teknik roller (elektrikçiler, şebeke hattı çalışanları, kaynakçılar vb.) en akut personel sıkıntısının yaşandığı alandır ve enerji firmalarının %60'ı bu pozisyonlar için işe alım zorluğu yaşamaktadır (UEA, World Energy Employment, 2025). Gelişmiş ekonomilerde sektöre giren her bir genç çalışana karşılık emekliliği yaklaşan 2,4 çalışan bulunmaktadır.

Ayrıca, dijitalleşme bir çözüm olarak görülse de enerji sektörü, yapay zekâ yetenek yoğunluğu açısından teknoloji ve finans sektörlerinin %40 gerisindedir. Daha da önemlisi, sektörün en çok ihtiyaç duyduğu saha kurulumu ve bakım onarım gibi fiziksel yetkinlik gerektiren işler mevcut yapay zekâ teknolojileri tarafından ikame edilebilir nitelikte değildir. Bu noktada fiziksel varlıkların sanal kopyalarını oluşturan dijital ikizler teknolojisi devreye girmektedir. Bu teknoloji, çalışanların tehlikeli sahalara

Enerjide Yetenek Dönüşümü

Demografik baskı ve yetenek açığı, enerji sektörünün dönüşümünü şekillendiriyor. Şirketler, bu açığı kapatmak ve geleceğin yetkinliklerine uyum sağlamak için iş gücünü dönüştürmeye odaklanıyor.

%81

Enerji teknolojisi sektöründe beceri eksikliği dönüşümün önündeki en büyük bariyer.

Kaynak: DEF, 2025

%96

Petrol ve doğal gaz sektörü mevcut iş gücünü yetkinleştirmeye yatırım yapıyor.

Kaynak: DEF, 2025

%43

Enerji teknolojisi ve kamu hizmetleri sektöründeki işverenler, yaşlanan ve azalan iş gücünü en kritik makro trendlerden biri olarak görüyor.

Kaynak: DEF, 2025

EN HIZLI BÜYÜYEN ROLLER

Önümüzdeki 5 Yıl

01

Yapay zekâ uzmanları

02

Makine öğrenimi uzmanları

03

Yenilenebilir enerji mühendisleri

inmeden önce santrallerin birebir sanal kopyaları üzerinde risksiz pratik yapmasına olanak tanıyarak teknik eğitim sürecini hızlandırmakta ve güvenlik risklerini minimize etmektedir.

Enerji sektöründe varolan yetenek krizi ile ilgili olarak gümüş tsunami kavramı karşımıza çıkar. Gümüş tsunami, yaşlanan nüfusu ve dolayısıyla demografik değişimi işaret eder. Sektör, yaşlanan işgücünün emekli olmasıyla ve kurumsal hafızanın kaybı ile mücadele etmektedir.

Örneğin Japonya'da 65 yaş ve üstü nüfus 2025 itibarıyla 36.19 milyon olarak tahmin edilmektedir, bu oran tüm nüfusun %29.4'üne denk gelmektedir (Japan Times, 2025). Nüfusun yaşlanması, Japon firmalarının karşı karşıya kaldığı kritik işgücü açığına katkıda bulunmakta ve işgücü verimliliğini olumsuz etkilemektedir.

IMF'in 2025 Eylül tarihli analizinde, işgücündeki yaşlanmanın Japonya'daki işgücü verimliliği artışıyla negatif ilişkili olduğu tespit edilmiş, nüfus yaşlanmasından daha fazla etkilenen sektörlerin 5 yıl sonra daha yüksek işgücü açığı bildirme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Asao vd., 2025).

Bir diğer örnek olarak ABD'de enerji işgücünün yaklaşık yarısının önümüzdeki 10 yıl içinde emekli olması beklenmektedir (NETA World Journal, 2025). Bunun sonucunda hem teknik rollerde hem de dijital dönüşümü yönetecek liderlik kademelerinde de boşluklar oluşmaktadır. Şirketler ve hükümetler, bu açığı kapatmak için eğitim programlarına yatırım yapmaktadır. Schneider Electric, 2025 yılına kadar 1 milyon genci enerji yönetimi konusunda eğitmeyi hedeflemektedir (Vermot-Desroches, 2025).

Bir diğer konu, dijitalleşme ile birlikte değişen iş kültürü ve yeni anlayışların tanıtılmasıdır. Yukarıda bahsedildiği üzere Petrol ve Gaz sektörünün %96 gibi yüksek bir oranda mevcut iş gücünü yetkinleştirme stratejisini benimsemesine rağmen Enerji Teknolojisi sektöründeki işverenlerin %81'inin beceri eksikliğini dönüşümün önündeki bir numaralı bariyer olarak görmesi, bu stratejinin uygulamada yetersiz kaldığını veya istenen hızda ilerlemediğini göstermektedir (DEF, 2025).

Buradan, taahhüt edilen eğitim yatırımlarının çıktıya dönüşme hızında bir eksiklik olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra kurumsal hafızanın ve teknik uzmanlığın sistemli bir şekilde yeni nesillere aktarılmasını sağlayacak bir kültür ve mekanizmanın eksikliği dikkat çekmektedir. Yaşlanan nüfusun işgücü verimliliğini negatif etkilediği tespiti (IMF, 2025), bu hafıza kaybı riskinin somut bir ekonomik göstergesidir.

Boston Consulting Group (BCG) gibi danışmanlık firmaları, kritik bilgi ve uzmanlığın kaybını önlemek için kurumsal bilgi transferi programlarının zorunlu olduğunu belirtmektedir. Bu, belgelerin dijitalleştirilmesi ve kişiselleşmiş bilginin (know-how) aktarımını da içerir (BCG, Managing the Silver Tsunami, 2018). İşte bu noktada üretken YZ emekli olan uzmanların on yıllara dayanan deneyimlerini ve karar alma süreçlerini

simüle edilmiş senaryolara dönüştürerek bir dijital mentor işlevi görebilir.

Çalışan bazında düşünüldüğünde ise McKinsey & Company araştırmaları, yüksek nitelikli yeteneklerin iş tercihlerinde esneklik, anlamlı çalışma ve çevreye duyarlı misyonları önceliklendirdiğini göstermektedir (McKinsey, The Future of Work is Now, 2020). Yani, çalışma saatleri ile ekonomik çıktı arasındaki dengesizlik; çalışanların verimliliğini düşüren bir olgu olarak karşımıza çıkar.

Türkiye örneğinde bu durum, 40 saatlik katı mesaiye tabi kamu sektörü (657 sayılı Kanun) ile esnek ve genellikle yasal 45 saat sınırını aşan özel sektör (4857 sayılı Kanun) ile şekillenmiştir. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) verilerine göre Türkiye'deki çalışma koşullarında verimlilik seviyelerinin nispeten düşük olduğunu ve çalışan başına üretimdeki potansiyel büyümenin zayıf kaldığını ortaya koymaktadır (OECD Economic Surveys: Türkiye, 2025).

Böylesi bir ayrışma ve uzun çalışma kültürü paradoksu, ulusal verimliliği düşüren ve yeteneklerin sürdürülebilirliğini tehdit eden yapısal bir darboğaz olarak öne çıkmaktadır. Böylesi bir ayrışma ve uzun çalışma kültürü paradoksu, ulusal verimliliği düşüren ve yeteneklerin sürdürülebilirliğini tehdit eden yapısal bir darboğaz olarak öne çıkmaktadır.



İşte var olma kültürünün aşılmasında IoT ve buradan gelen veriyi işleyen YZ kilit rol oynamaktadır. Sahadaki varlıkların sensörlerle uzaktan izlenebilmesi ve YZ algoritmalarıyla otonomlaşması, çalışanların fiziksel bulunma zorunluluğunu azaltarak Türkiye'deki uzun çalışma saatlerini verimlilik odaklı hibrit bir modele dönüştürebilir.

1.5. Güncel Regülasyonlar

2025 yılında enerji ve teknoloji şirketleri için siber güvenlik en kritik önceliklerden biri haline gelmiştir. Dijital İşbirliği Örgütü (DiÖ)'nün raporuna göre, siber güvenlik kaynaklarının artırılması, önümüzdeki dönemde en hızlı ivmelenen trendlerden biridir (Digital Economy Trends, 2025). McKinsey verileri organizasyonların, özellikle üretken yapay zekâ kullanımından kaynaklanan siber güvenlik risklerini azaltmak için daha aktif yönetim süreçleri benimsediğini göstermektedir (McKinsey Technology Trends Outlook, 2025).

Ayrıca, nükleer enerji 2025 yılında küresel düzeyde yeniden canlanma sürecine girmiştir. UEA'nın değerlendirmesine göre, 40'tan fazla ülke nükleer enerjiyi stratejilerine dahil etmiştir (UEA, The Path to a New Era for Nuclear Energy, 2025). Yapım aşamasındaki 70 GW'ın üzerinde kapasite, son 30 yılın en yüksek seviyelerinden birini temsil etmektedir. Özellikle Küçük Modüler Reaktörler (SMR), veri merkezlerinin artan enerji talebiyle birlikte önemli yatırım çekmektedir.

ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC), Haziran 2025'te NuScale'in 77 MWe tasarımı için standart tasarım onayı vererek SMR alanında bir ilke imza atmıştır (Nuclear Regulatory Commission, 2025). Örneğin Trump yönetimi, Mayıs 2025'te ABD nükleer kapasitesini 2050'ye kadar dört katına çıkararak 400 GW'a ulaştırmayı hedefleyen bir strateji açıklamıştır. (Hunt, 2025).

İngiltere ise 2,5 milyar sterlinlik SMR destek paketi ile 2030'ların ortalarında ilk ticarileştirmeyi hedeflemektedir. Eyalet düzeyinde 19 eyalette 55 yasa tasarısı SMR gelişimini desteklemek üzere değerlendirilmektedir (MultiState, 2025).

a. ABD

ABD'de enerji politikası, 2025 yılında köklü bir değişim sürecine girmiştir. Trump yönetimi, 20 Ocak 2025'te imzalanan Unleashing American Energy başlıklı yürütme kararı ile fosil yakıt üretimini destekleyen ve çevresel düzenlemeleri gevşeten bir politika benimsemiştir. Bu kararname kapsamında Trump hükümeti, Paris Anlaşması'ndan çekilmiş, Biden döneminin iklim politikalarını iptal etmiş ve LNG ihracat kısıtlamalarını

kaldırmıştır (White House, 2025). Öte yandan, 2022 tarihli Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) kapsamındaki temiz enerji vergi kredileri büyük ölçüde yürürlükte kalmaya devam etmektedir. 1 Ocak 2025'ten itibaren teknoloji-nötr Temiz Elektrik Üretim Vergi Kredisi (45Y) ve Temiz Elektrik Yatırım Vergi Kredisi (48E) yürürlüğe girmiştir. UEA verilerine göre, Temmuz 2025 itibarıyla IRA'nın önemli bölümleri One Big Beautiful Bill Act ile değiştirilmiş veya sonlandırılmıştır; ancak temel yenilenebilir enerji teşvikleri korunmuştur (UEA, 2025). Climate Power'ın Ocak 2025 güncellemesine göre, IRA kapsamında 751 proje ve 422 milyar Amerikan doları yatırımla 400.000'den fazla temiz enerji istihdamı yaratılmıştır (Climate Power, 2025).

b. Çin

Çin, 1 Ocak 2025'te yürürlüğe giren kapsamlı Enerji Yasası ile enerji sektörünü düzenleyen ilk çerçeve mevzuatını hayata geçirmiştir. Yasa, yenilenebilir enerji gelişimini, enerji güvenliğini ve ülkenin 2030 öncesi karbon zirvesi ile 2060 karbon nötrlük hedeflerini desteklemektedir (NEA, 2024). Mevzuat, fosil olmayan enerji kaynaklarını (nükleer, güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal, okyanus) tanımlamakta ve toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin asgari payını belirlemektedir. Ember'in 2025 Çin Enerji Dönüşümü Değerlendirmesi'ne göre, Çin rüzgâr ve güneş kapasitesini üç yılda ikiye katlayarak 1.408 GW'a ulaşmıştır (Yang vd., 2025). 2025'in ilk yarısında rüzgâr ve güneş kapasitesi, kömür kapasitesini geçmiştir. Çin, 2024'te küresel temiz enerji yatırımının %31'ini oluşturan 625 milyar Amerikan dolarlık yatırım yapmıştır. Ülke, 2030 rüzgâr ve güneş kapasitesi hedefini altı yıl önce, 2024'te aşmış ve 2035 için 3,6 TW hedefi açıklamıştır (Yang vd., 2025).

c. Avrupa Birliği

AB'nin Fit for 55 paketinin temel unsurlarından biri olan Karbon Sınır Düzenleme Mekanizması (SKDM), 2023-2025 geçiş döneminin ardından 1 Ocak 2026'da tam operasyonel faza geçecektir (Avrupa Komisyonu, 2025). Mekanizma, AB'ye ithal edilen karbon yoğun ürünlerdeki gömülü emisyonları fiyatlandırarak AB üreticileriyle yabancı üreticiler arasında eşit rekabet koşulları yaratmayı amaçlamaktadır. CBAM kapsamındaki sektörler çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre, elektrik ve hidrojeni içermektedir (Avrupa Komisyonu, 2025). Geçiş döneminde ithalatçılar, mal miktarları, gerçek gömülü emisyonlar, dolaylı emisyonlar ve menşe ülkede ödenen karbon fiyatı hakkında üç ayda bir raporlama yapmakla yükümlüdür. 2026'dan itibaren ithalatçıların AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) fiyatıyla bağlantılı SKDM sertifikaları satın almaları gerekecektir. AB ETS'deki ücretsiz tahsisatlar kademeli olarak kaldırılarak 2034'te

tamamen sonlandırılacaktır. OECD analizlerine göre, SKDM uygulaması AB içinde her 1 ton CO₂ azaltımı için yurtdışına yaklaşık 0,19 ton karbon kaçağını engelleyecektir (OECD, 2025).

2024 Ağustos'ta yürürlüğe giren AB Metan Düzenlemesi, enerji sektöründe metan emisyonlarının azaltılmasına yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2025). Düzenleme, hem AB içindeki tesisler hem de ithalatçılar için zorunlu ölçüm, izleme, raporlama ve doğrulama gereksinimleri getirmektedir. 2025'ten itibaren sızıntı tespit ve onarım yükümlülükleri başlamış olup, petrol ve gaz sektöründe rutin yakma ve salım yasaklanmıştır. 2027'den itibaren yeni ithalat sözleşmelerinde AB eşdeğeri MRV standartlarına uyum zorunlu hale gelecektir (UEA, 2025).

Sonuç olarak, küresel regülasyon ortamındaki bütün bu gelişmeler, Türkiye için çok boyutlu sonuçlar doğurmaktadır. AB SKDM düzenlemesi, Türkiye'nin AB'ye ihracatını doğrudan etkileyecek olup, özellikle çelik, alüminyum ve çimento sektörlerinde karbon ayak izinin azaltılması stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir.

OECD analizine göre, temiz üretim kapasitesine sahip Türkiye gibi ülkeler, AB ithalatçılarının daha karbon yoğun kaynaklardan uzaklaşmasıyla mütevazı kazanımlar elde edebilecektir (OECD, 2025). Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi ve güncellenen Ulusal Katkı Beyanı (NDC) taahhütleri bağlamında, yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması, şebeke altyapısının modernizasyonu ve enerji verimliliği önlemlerinin güçlendirilmesi öncelikli politika alanları olarak öne çıkmaktadır.

DEF'in 2025 raporunda vurgulandığı üzere, bu dönüşümün başarısı büyük ölçüde nitelikli işgücünün yetiştirilmesine ve mevcut çalışanların yeniden yetenek kazandırılmasına (reskilling) bağlıdır (DEF, 2025).

1.6. Genel Değerlendirme

Bu bölümde 2025 yılında enerjide dijitalleşme 6 farklı teknoloji üzerinden incelenmiştir; bunlar sırasıyla YZ, Üretken YZ, IoT, dijital ikizler, V2G teknolojisi ve yerel enerji optimizasyonudur. Bu teknolojilerin enerji sektörüne entegrasyonu, küresel yatırım akışlarında rekor seviyelere ulaşmıştır. 2025 yılında enerji sektörüne öngörülen 3,3 trilyon Amerikan doları sermaye akışının yaklaşık 2,2 trilyon Amerikan doları yenilenebilir enerji, şebeke altyapısı, depolama ve verimliliğe yönelmektedir.

Enerji sektörünün dijitalleşmesi, teknoloji, yatırım ve düzenleme alanlarında hızlı ilerleme kaydetmektedir. Ancak giriş kısmında belirtildiği üzere, sektörün dönüşüm kapasitesini

etkileyen birtakım engeller mevcuttur. Bunlardan ilki enerji altyapı yetersizliğidir.

Fosil yakıt sistemine dayalı mevcut şebeke altyapısının çift yönlü, dağıtık enerji akışı ve değişken yenilenebilir kaynakları yönetmeye uygun olmadığı yönünde raporlar mevcuttur. Öyle ki, enerji yöneticilerinin %73'ü yetersiz şebeke altyapısını elektrifikasyonun önündeki en büyük engel olarak tanımlamaktadır (Siemens, 2025). Gelişmekte olan ülkelerde dijitalleşme yatırımı yetersizliği ise 1,3 trilyon Amerikan doları ekonomik kayıp potansiyeli taşımaktadır (DEF, 2025).

Bir diğer kısıtlama nitelikli işgücünün yetersizliğidir. Enerji teknolojisi sektöründeki işverenlerin %81'i beceri eksikliğini birincil bariyer olarak görmektedir (DEF, 2025). Yaşlanan nüfus demografisi, emekli olacak deneyimli personelin kurumsal bilgisinin kaybını hızlandırmaktadır. Mevcut işgücünün yetkinleştirilmesi programları ise uygulamada istenen hızı yakalayamamaktadır.

Son olarak, bu kısıtlamaların üzerine, regülasyonların sürekli değişmesi ek bir uyum zorluğu yaratmaktadır. Şirketlerin ve ülkelerin bu değişen ortama adaptasyon kapasitesi, altyapı ve insan kaynağı kısıtlamalarına bağlıdır.

Küresel dijitalleşme dinamikleri Türkiye için çok boyutlu kısıtlamalar yaratmaktadır. Birincisi, AB SKDM düzenlemesi Türkiye'nin AB'ye ihracatını doğrudan etkilemektedir. Özellikle çelik, alüminyum ve çimento sektörlerinde karbon ayak izinin azaltılması stratejik zorunluluk haline gelmiştir.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)'nin 2024 Türkiye raporuna göre çimento sektörü için, sektörün toplam emisyonlarının 2040 yılına kadar %29,8, 2053 yılına kadar ise %92,8 oranında azaltılabileceği tahmin edilmektedir (UNFCCC, 2024). İkincisi, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi ve güncellenen NDC taahhütleri bağlamında, yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması, şebeke altyapısının modernizasyonu ve enerji verimliliği önlemlerinin güçlendirilmesi acil politika alanlarıdır.

Ancak bu dönüşüm, raporda vurgulanan insan kaynağı açığından doğrudan etkilenmektedir. Enerji sektöründe hibrid disiplinler arası roller (V2G teknolojisi, yerel enerji optimizasyonu) gerektiren işler, eğitim sistemleri ve kurumsal yapılar tarafından henüz tam olarak karşılanmamaktadır.

Üçüncüsü, OECD verilerine göre Türkiye yıllık 2.283 saate varan çalışma süreleriyle küresel ölçekte en çok çalışan ülkelere biri olmasına rağmen, beraberinde maksimum verimlilik gözlemlenememektedir. Enerji sektöründe yaşanan bu yapısal verimlilik sorunu dijitalleşmeye yönelik yatırımların etkinliğini sınırlamaktadır. Dolayısıyla

Türkiye'nin sektörel dönüşümü kurumsal yapının, çalışma kültürünün ve insan kaynağının kalitesinin iyileştirilmesine bağlıdır.

Özetle, 2025 yılında enerji sektörü altyapı tarafında fiziksel kısıtlar ve artan dijital yük arasında bir denge kurmaya çalışmaktadır. Yatırımlar, donanım ve yazılımın entegrasyonuna odaklanmış durumda ve rekor seviyelere ulaşmıştır.

Regülasyonla bağlayıcı ve cezai yaptırımları olan kurallar bütününe dönüşmüştür. Ancak tüm bu dönüşümün en zayıf halkası, teknolojik hıza yetişmekte zorlanan insan kaynağıdır. Sektörün geleceği, altyapı, yatırım, regülasyon ve insan varlığının senkronize bir şekilde yönetebilme becerisine bağlıdır.



57908-3-112

2. Yapay Zekâ ve Şebeke Operasyonları

Küresel enerji sektörü, dekarbonizasyon, dağıtık yapı ve dijitalleşme gibi inovasyonlarda bir dönüşüm içindedir. Geleneksel tek yönlü elektrik şebekeleri, karmaşık ve çift yönlü veri akışının hakim olduğu siber-fiziksel sistemlere evrilmektedir. Bu dönüşümün merkezinde ise YZ teknolojileri yer almaktadır.

Enerji üretiminden son kullanıcıya kadar uzanan değer zincirinde, veri hacminin ve işlem hızının insan bilişsel kapasitesini aşması YZ entegrasyonunu bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu bölüm, yapay zekânın şebeke operasyonlarındaki teknik derinliğini, küresel sistematik yaklaşımı ve Türkiye'nin mevcut durumunu analiz etmektedir.

1) Üretken YZ

Üretken YZ, Foundation Models (temel modeller) ve Large Language Models (geniş dil modelleri) tabanlı bu sistemler özellikle verinin yetersiz veya hassas olduğu durumlarda kritik rol oynar. Trilyonlarca parametreyi işleyerek metin üretimi, görüntü sentezi ve ses oluşturma gibi alanlarda insan benzeri çıktılar sağlar.

Örneğin, pazarlama ve tasarımda kişiselleştirme sayesinde kullanıcı için özelleştirilmiş içerik ve görseller yaratır. Üretken YZ, bir analiz aracının ötesinde, Ar-GE süreçlerinden müşteri etkileşimine kadar değer zincirinin her halkasında bir co-pilot fonksiyonuna göre değişim maliyetlerinde azalma ve piyasaya çıkış sürelerini radikal biçimde kısaltır. Geleneksel güvenlik duvarlarının yetersiz kaldığı noktalarda YZ, ağ trafiği analizi yaparak anormallikleri gerçek zamanlı tespit eder.

Saldırı tespit sistemleri ve sıfır gün saldırıları gibi daha önce tanımlanmamış tehditleri davranışsal analizle yakalar. Ayrıca işe alım süreçlerinde CV tarama ve aday eşleştirme algoritmalarının kullanımı işe alım süresini kısaltır.

a. Finansal boyutlar: Finansal açıdan yapay zekâ projeleri hem yüksek başlangıç yatırımı hem de devam eden işletme giderleri doğurur. Altyapı tarafında yüksek hesaplama gücü ihtiyacı; grafik işlemci kümeleri, veri merkezleri ya da bulut bilişim hizmetleri üzerinden ciddi maliyetler yaratır. Model eğitimi süreçleri yoğun enerji tüketimi ve hesaplama kapasitesi gerektirir. Buna ek olarak, verinin etiketlenmesi ve temizlenmesi insan emeğine dayalı, maliyetli operasyonlardır.

Yapay Zekânın Enerji Sektörüne Etkisi

YZ teknolojileri operasyonel verimliliği artırıyor, maliyetleri düşürüyor ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa ediyor.

%93

YZ tahmin doğruluğu
5 dakika güncelleme aralığında

%45

Şebeke stresinde azalma
RL ajanları ile

OPERASYONEL KAZANIMLAR

%26

Tepe saatlerde yenilenebilir enerji kullanım artışı

%40

Drone denetimlerinde maliyet düşüşü

Kaynak: Dünya Ekonomik Forumu (DEF), 2025

TEMEL YAPAY ZEKÂ YETENEKLERİ

01

Yük ve üretim tahmini

02

Sanal güç santralleri (VPP)

03

Pekiştirmeli öğrenme ile yük yönetimi

04

Drone ile YZ denetimi

05

Sentetik veri & senaryo üretimi

06

Siber güvenlik anomali tespiti

07

Kod optimizasyonu & otomasyon

b. Sorumluluk ve mevzuat: Sorumluluk konusuna gelindiğinde, bir yapay zekâ modelinin hatalı karar vermesi durumunda hukuki sorumluluğun geliştiricide mi yoksa kullanıcıda mı olduğu belirsizdir. Karar alma sürecinin açıklanamaması sorunu, yani kara kutu yapısı, mevzuata uyumu zorlaştırır. Kişisel verilerin korunmasına ilişkin düzenlemeler, veri işleme süreçlerine sıkı sınırlar getirirken; Avrupa Birliği'nde yürürlüğe giren yeni yapay zekâ mevzuatı, yüksek riskli sistemler için sertifikasyon, şeffaflık ve insan denetimi zorunlulukları getirmektedir. Fikri mülkiyet hakları ise özellikle üretken yapay zekâ tarafından oluşturulan içeriklerin telif statüsü nedeniyle önemli bir finansal ve hukuki risk alanı oluşturmaktadır.

2) Enerji ve Üretken YZ

Geleneksel modelleme yöntemleri, iklim değişikliğinin getirdiği aşırı hava olayları ve yenilenebilir enerjinin volatil yapısı karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu noktada Üretken YZ teknolojileri devreye girerek şebeke planlamasında devrimsel bir yaklaşım sunmaktadır. ABD'de NREL araştırmacıları, üretken yapay zekâyı hem mevcut veriyi analiz etmek için hem de yıkıcı etkileri olan ekstrem durumları simüle etmek için kullanmaktadır (NREL, Generative Artificial Intelligence for the Power Grid, 2025). Bu algoritmalar tarihsel verilerde bulunmayan ancak fiziksel olarak mümkün olan ekstrem senaryolar için sentetik veri üreterek operatörlerin kriz anlarına hazırlıklı olmasını sağlar. Bu yaklaşım da enerji çözümlerinin hızlı uygulanmasını, kritik altyapının korunmasını ve hem sermaye hem de işletme giderlerinin azaltılmasını hedefler. Operasyonel düzeyde ise IoT sensörlerinden, akıllı sayaçlardan ve meteoroloji istasyonlarından gelen verileri işleyen YZ modelleri, yük ve üretim tahminlerini 5 dakikalık aralıklarla

güncelleyerek %93'e varan doğruluk oranlarına ulaşmaktadır (UnoiaTech, 2025). Aynı çalışmada, akıllı YZ ajanlarının devreye alınmasıyla tepe saatlerde yenilenebilir enerji kullanımının %26 oranında artırılabilirdiği belirtilmiştir (UnoiaTech, 2025). Kısacası, üretken yapay zekânın sağladığı üstün tahmin ve senaryo üretme kabiliyeti, enerji sistemlerinin verimlilik, esneklik ve dayanıklılığını yeni bir seviyeye taşımaktadır.

Dağıtık enerji kaynaklarının artışıyla birlikte şebeke yönetimi, merkezi bir santralden güç basmak yerine, milyonlarca uç noktayı (evler, bataryalar, EV şarj istasyonları) birleştirmeye dönüşmüştür. Pekiştirmeli öğrenme (RL) ajanları, şebeke üzerindeki dinamik yükleri yönetmek için sürekli simülasyon yoluyla öğrenen otonom operatörler olarak görev yapmaktadır.

Bu sistemler aşırı yüklenme riski olan bölgeleri tespit edip enerji akışını alternatif hatlara yönlendirebilmekte veya batarya depolama ünitelerini devreye sokarak şebeke üzerindeki stresi %45 oranında azaltabilmektedir (Unoiatech, 2025). Sanal güç santralleri (VPP) ise YZ'nin binlerce küçük ölçekli üretici ve tüketiciyi bir araya getirerek tek bir büyük santral gibi davranmaları ile meydana gelir. Bu sayede, dağıtık kaynaklar frekans kontrolü ve voltaj regülasyonu gibi yan hizmet piyasalarına katılabilir hale gelir.

AI algoritmaları, bu kaynakların toplam esnekliğini tahmin ederek piyasa optimizasyonunu gerçekleştirir. Örneğin binlerce evdeki çatı güneş paneli ve depolama bataryası bir VPP altında toplanırsa, ihtiyaç anında bu evler eş zamanlı olarak tüketimlerini düşürüp depolanmış enerjiyi şebekeye verebilir; böylece büyük bir santralin frekans dengeleme hizmetine benzer bir katkıyı ortaklaşa sağlamış olurlar.

Yapay zekânın enerji altyapılarına entegre olduğu bir diğer çarpıcı alan, bilgisayarlı görü ve drone tabanlı denetim teknolojileridir. Özellikle geniş coğrafi alana yayılan iletim ve dağıtım hatlarının incelenmesi, geleneksel yöntemlerle hem çok zaman alan hem de tehlikeli ve maliyetli bir işti.

Yapay zekâ destekli drone denetimleri ise bu durumu kökten değiştirmeye aday konumdadır. Özel kameralar taşıyan drone'lar, enerji nakil hatları boyunca uçarak direkler, iletkenler, izolatörler ve çevre koşulları hakkında detaylı görüntüler toplar.

Bu görüntüler gerçek zamanlı olarak veya uçuş sonrası yapay zekâ algoritmaları tarafından analiz edilir. Bilgisayarlı görü algoritmaları, hat üzerindeki fiziksel hasarları (örneğin kopmuş iletken, çatlamış izolatör, eğilmiş direk) otomatik olarak tespit edebildiği gibi, hattın yakınında tehlikeli biçimde yaklaşan ağaç dalları da algılayabilir. Böylece, önceden bir insan ekip tarafından günler süren bir hat devriyesi, YZ destekli



drone ile birkaç saat içinde tamamlanabilir. Örneğin, Estonya’da bir dağıtım şirketinin havai hat denetimleri için YZ tabanlı drone çözümü uygulayan Hepta firmasının vaka analizinde denetim maliyetlerinin %40 azaltıldığı, arıza tespit kalitesinin ise %30 artırıldığı raporlanmıştır (Hepta Insights, 2025).

2.1. Küresel Durum

Enerji sektöründe yapay zekâ entegrasyonu, küresel güç dengelerini yeniden şekillendiren stratejik bir rekabet alanına dönüşmüştür. ABD, Çin ve AB bu alanda farklı stratejik yaklaşımlar benimsemektedirler. Türkiye’nin konumunu değerlendirmek için öncelikle bu üç kutbun dinamiklerini anlamak gerekmektedir.

a. ABD

ABD, YZ alanında tartışmasız küresel lider konumundadır. Oxford Insights Government AI Readiness Index 2024 verilerine göre ABD, 85,05 puanla birinci sırada yer almakta ve özellikle teknoloji sektörü alt endeksinde 83,80 puanla rakiplerinin çok önünde bulunmaktadır (Oxford Insights, 2024). Bu üstünlüğün temeli, NVIDIA, Google, Microsoft ve Amazon gibi şirketlerin oluşturduğu entegre ekosisteme dayanmaktadır. NVIDIA’nın

GPU'ları küresel YZ eğitiminin omurgasını oluştururken, hyperscaler olarak adlandırılan bulut bilişim devleri dünya genelinde hesaplama kapasitesi sunmaktadır. Enerji sektörü özelinde ABD, hem teknoloji üreticisi hem de uygulayıcı konumundadır. Özel sektörde ise Google DeepMind'ın rüzgâr enerjisi tahmin algoritmaları, enerji üretim öngörüsünü yüzde 36 oranında iyileştirmiştir (Dünya Enerji Konseyi, 2025). ABD'nin stratejik avantajı, Ar-Ge derinliği, risk sermayesi erişimi ve yetenek havuzunun benzersiz bileşiminden kaynaklanmaktadır. Ancak, federal düzeyde kapsamlı bir YZ düzenlemesinin bulunmaması sektörel uygulamalarda parçalı bir yapıya yol açmaktadır.

b. Çin

Çin, YZ-enerji entegrasyonunda devlet koordinasyonlu bir kalkınma modeli izlemektedir. ABD yaptırımları sonrası stratejik dönüşüm geçiren Huawei, Digital Power birimi ile enerji sektöründe baskın bir oyuncu haline gelmiştir (Huawei, 2024). Huawei'nin yatırım kolu Habo, tedarik zincirini güvence altına almak için yarı iletkenler, kurumsal hizmetler ve elektronik malzemeler alanlarındaki start-up'lara yatırım yapmakta olup 2023 yılı sonuna kadar büyük çoğunluğu yarı iletken sektöründeki start-up'lara olmak üzere 97 yatırım gerçekleştirmiştir (Lew, 2024; Huawei Central, 2024).

Çin'in stratejik hamlelerinden biri de yarı iletken bağımsızlığı arayışıdır. Bu girişim, enerji yönetim sistemlerinde kullanılan mikrodenetleyicilerde dışa bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir. Çin'in 14. Beş Yıllık Planı, silikon karbür ve galyum nitrür gibi üçüncü nesil geniş bant aralıklı yarı iletkenleri stratejik öncelik olarak belirlemiş olup bu malzemeler enerji verimliliği yüksek güç elektroniği uygulamalarında kritik rol oynamaktadır (Laoyaoba, 2021; Global Policy Watch, 2021).

Çin modeli, devlet desteğinin ölçek ekonomisi yaratmasıyla hızlı ilerleme sağlamakta; ancak yarı iletken ekipmanları ve ilgili bileşenlerin hâlâ büyük ölçüde ithalata bağımlı olması nedeniyle teknolojik bağımsızlık hedefinin beş yıl içinde tam olarak gerçekleşip gerçekleşmeyeceği belirsizliğini korumaktadır (Chiang, 2024; Centre for Emerging Technology and Security, 2024).

c. AB

Avrupa Birliği, enerji sektöründe YZ entegrasyonunu stratejik öncelik olarak belirlemiş ve bu alanda düzenleyici liderlik yaklaşımını benimsemiştir. EU AI Act kapsamında elektrik şebekeleri dahil kritik altyapılar yüksek riskli olarak sınıflandırılmış, risk değerlendirmesi, şeffaflık ve insan denetimi zorunlu kılınmıştır (Avrupa Parlamentosu, 2025). AB'nin somut projeleri arasında TwinEU öne çıkmaktadır. Pan-Avrupa dijital

Şekil 3: Yapay Zekâda AB, ABD ve Çin Rekabeti

Yapay Zekâ Liderlik Endeksi

Oxford Insights Government AI Readiness Index 2024'e göre küresel liderlik dağılımı. Puanlama 0–100 aralığındadır.

85.1

ABD

Teknolojik Hegemonya

76.6

Çin

Sistemik Mobilizasyon

~72

AB

Düzenleyici Liderlik

STRATEJİK GÜÇ ALANLARI

 **ABD**
Teknolojik Hegemonya

- NVIDIA GPU ekosistemi ve küresel YZ eğitim liderliği
- Google DeepMind ile ileri model geliştirme
- Risk sermayesi erişiminde ve büyüklüğünde lider konum
- Küresel yetenek çekimi ve açık inovasyon ekosistemi

 **Çin**
Sistemik Mobilizasyon

- Huawei Digital Power: Enerji sektöründe YZ ile dijital dönüşüm
- Habo: 97 startup yatırımı (yan iletken odaklı)
- RISC-V konsorsiyumu: Çip bağımsızlığı ve yerli ekosistem inşası
- Devlet destekli, ölçek odaklı sanayi mobilizasyonu

 **AB**
Düzenleyici Liderlik

- EU AI Act: Enerji YZ = yüksek risk sınıfında düzenleme
- TwinEU: 25.2M€, 75 partner, 15 ülke iş birliği
- Iberdrola: İlk ISO/IEC 42001 sertifikası alan enerji şirketi
- Hollanda 2032: 18.000 teknisyen açığı için ulusal dönüşüm planı

Kaynak: Oxford Insights Government AI Readiness Index 2024

ikiz konseptini hayata geçiren bu proje, 25,2 milyon euro bütçe, 75 partner ve 15 ülke katılımıyla 2024–2026 döneminde yürütülmekte olup proje kapsamında 15 Dağıtım Sistemi Operatörü ve 15 İletim Sistemi Operatörü yer almaktadır (E.DSO, 2024).

Üye devletler düzeyinde de dikkat çekici ilerlemeler kaydedilmektedir. Almanya'da E.ON, envelio teknolojisiyle 55 milyon bileşen ve 180.000'den fazla ölçüm cihazını kapsayan dijital ikiz oluşturmuş ve 2024'te 410.000'den fazla şebeke bağlantı talebi saniyeler içinde işlenmiştir (Smart Energy International, 2024).

TenneT 2024'te 10,6 milyar euro yatırım gerçekleştirmiş ve 10 yıllık planında 200 milyar euro hedeflemiştir. İspanya'da Iberdrola, Bilbao'daki Global Smart Grids Innovation Hub'da 120'den fazla proje ve 130 milyon euro değerinde yatırımla YZ teknolojileri geliştirmekte olup Şubat 2024'te ISO/IEC 42001 AI Yönetim Sistemi sertifikasını dünyada ilk alan şirket olmuştur (Iberdrola, 2024).

AB'nin karşılaştığı zorluklar arasında TSO ve DSO veri alışverişinde standardizasyon eksikliği, GDPR uyumu gereksinimleri ve nitelikli işgücü açığı yer almakta olup

Hollanda’da 2032’ye kadar 18.000 teknisyen açığı beklenmektedir (ENTSO-E, 2025).

2.2. Türkiye’de YZ ve Enerji Sektörünün Dönüşümü

Genel açıdan bakıldığında Türkiye, 2021 yılında yayınladığı Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi ile YZ alanında yol haritasını ortaya koymuş ve enerji sektörü de öncelikli uygulama alanlarından biri olarak tanımlanmıştır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve ilgili bakanlıklar dijital şebeke, akıllı sayaç ve enerji depolama gibi alanlarda düzenlemeler yaparak YZ uygulamalarının önünü açmaya çalışmaktadır. Örneğin, Türkiye’nin lider elektrik dağıtım ve perakende şirketlerinden Enerjisa Enerji, yapay zekâ teknolojilerini iş süreçlerine entegre ederek belirgin verimlilik artışları elde etmiştir. Şirket, enerji talep tahmini, sayaç arıza tahmini, şebeke bakım optimizasyonu uzun dönem talep projeksiyonu gibi süreçlerde YZ’yi yoğun şekilde kullanmaktadır (Enerjisa, 2025).

Bir diğer dikkat çekici yerli örnek, Türkiye’nin büyük sanayi kuruluşlarından Tüpraş’tır. Tüpraş, Kırıkkale ve İzmit rafinerilerinde Boston Dynamics tarafından geliştirilen otonom robot Spot’u kullanarak YZ destekli saha devriyesi ve ekipman denetimi yapmaya başlamıştır (Ekonomist, 2022). Bu uygulama ile hem iş güvenliği artırılmış hem de insan kaynağı verimliliği yükselmiştir.

Oxford Insights’in Government AI Readiness Index 2024 çalışması 188 ülkeyi; kamu kapasitesi, teknoloji sektörü, veri ve altyapı açılarından değerlendirir. Türkiye bu çerçevede 60,63 puanla 53. sıradadır. Bu sonuç Türkiye hiç çabalamıyor demek değildir; fakat çabanın ölçeklenmiş, kurumsallaşmış ve bütün aktörleri aynı anda yükselten bir kapasiteye dönüşmekte zorlandığını gösterir.

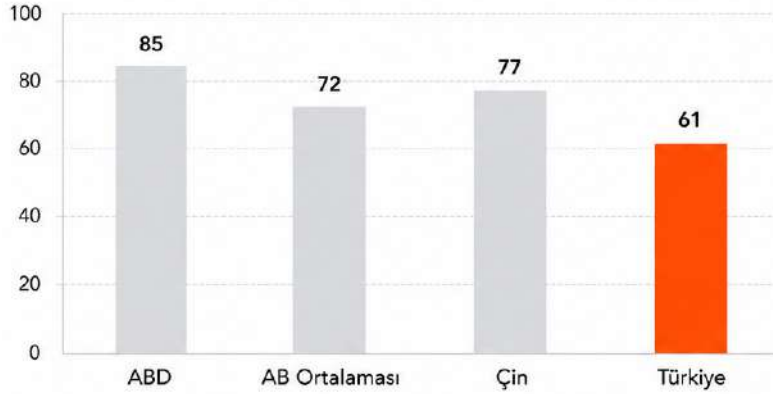
Türkiye’nin toplam puanı, bölgesinde üst gruba yakın bir konumda olduğunu; özellikle strateji, kurum içi dijitalleşme hamleleri ve bazı sektörlerdeki hızlanmanın ölçülebilir hale geldiğini ima eder. Aynı raporda, Türkiye’nin üç sütununda dengeli bir liderlik üretmediğini de gösterir: Türkiye’nin sütun puanları Hükümet 70,73, Teknoloji sektörü 45,13, Bilgi ve altyapı ise 66,02 olarak görünür, asıl frenin teknoloji sektörü olduğu ve bu kapasitenin kamuya-özel sektöre yayılması tarafında yoğunlaştığı gözlemlenebilir. Grafikten yola çıkarak;

İlk olarak, hükümet ve düzenleyiciler strateji konusunda tam olsa dahi strateji varlığı tek başına yeterli sayılmamaktadır. Etik-yönetişim, uyarlanabilirlik, veri yönetimi ve kamu içi dijital kapasite birlikte çalışır. Türkiye’de sorun genelde veri paylaşımı,

Şekil 4: Oxford Insights Devletlerin YZ Hazırlık Endeksi ve Türkiye, 2024

Türkiye'nin Yapay Zekâ Hazırlık Düzeyi

Oxford Insights Government AI Readiness Index 2024 karşılaştırması
Puanlama 0–100 aralığındadır.



Türkiye Sütun Puanları

70,73

Yönetişim

45,13

Teknoloji Sektörü

66,02

Bilgi & Altyapı

Yapısal Sorunlar

01

Veri Egemenliği

Yerel bulut sağlayıcı eksikliği
ve küresel platform bağımlılığı.

02

Beyin Göçü

Bilişim mezunlarının
%6,7'si yurt dışında çalışıyor.

03

GPU Altyapısı

Yüksek performanslı
hesaplama kapasitesi sınırlı.

04

Dijital Olgunluk

Küresel ortalamanın
altında performans.

denetim, hesap verebilirlik gibi uygulama mekanizmalarının parçalı kalmasıdır. Bu parçalanma, kamu tarafında pilotların çoğalmasına rağmen ülke ölçeğinde tekrar edilebilir çözümler üretmeyi zorlaştırır.

Özel sektör ve sektör birlikleri ve birbirinden farklı hazırlığa sahip olmaları bir diğer problem olarak karşımıza çıkar. Digitopia'nın Türkiye Dijital Olgunluk Raporu 2024 verisi, Türkiye'nin dünya ortalamasının gerisinde kaldığını ve farkın 2021'de -0,09 iken 2024'te -0,12'ye açıldığını bildirmektedir (Digitopia, 2024).

Aynı kaynak, ayrıca ekonomik belirsizliklerin yatırımı yavaşlattığını, YZ hazırlığının yeterli olmadığını ve dönüşüm vizyonunun stratejik öncelik haline gelmediğini not eder. Endekste en kritik kırılma olgun teknoloji pazarı, AR-GE derinliği, insan kaynağı ve kamuya çözüm üretebilme kapasitesidir.

Türkiye'de güçlü vitrini olan girişimler bulunsa da bu kapasite tüm sektörlerde ürünleşmiş, güvenilir, regülasyonla uyumlu biçimde yayılmayınca endeks puanına sınırlı yansır. YZ'nin gerçek etkisi, regüle sektörlerde ölçekli entegrasyon ile ortaya çıkar. Bu aktörler

veri paylaşımı, siber güvenlik, operasyonel risk ve sorumluluk rejimi nedeniyle daha yavaş hareket eder; Türkiye’de algıdaki hız ile sahadaki hız arasındaki makasın bir kısmı buradan doğar.

Türkiye’nin enerji sektöründe YZ entegrasyonundaki yapısal sorunlar bürokratik engeller olarak karşımıza çıkmaktadır. Kurumsal geri kalmışlık, özellikle kamu kurumlarında (TEİAŞ, EÜAŞ) YZ adaptasyonunu yavaşlatmaktadır. Özel sektörün hızlı ilerleyişi ile kamu kurumlarının temkinli yaklaşımı arasındaki uçurum derinleşmektedir. Veri yönetişimi ve paylaşım kültürü eksikliği kritik bir engeldir.

KVKK’nın bireysel veri korumaya odaklanması, şirket ve stratejik veriler için YZ kullanımını belirsiz kılmaktadır. Kurumlar arası veri entegrasyonu yetersiz olup Ortak Avrupa Enerji Veri Alanı benzeri bir yapı mevcut değildir. Venture capital fonlarına erişim düşük, YZ unicorn sayısı sınırlıdır. Bu durum Oxford Insights Teknoloji Sektörü alt endeksindeki 45.13 skorla yansıtmaktadır (2025). Bununla birlikte, uluslararası işbirliği fırsatları mevcuttur. Kasım 2025’te imzalanan Güney Kore–Türkiye anlaşması nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve yapay zeka alanlarında stratejik işbirliği mutabakatı içermektedir (Cumhurbaşkanlığı, 2025).

UNDP–EBRD–Enerjisa girişimi, Skills for an Inclusive Future (S4IF) ağı kapsamında enerji sektöründe yeşil ve dijital becerilerin geliştirilmesini hedeflemektedir (UNDP, 2024). TÜBİTAK Yapay Zeka Enstitüsü, üniversite araştırma laboratuvarları ve kamu araştırma merkezleri ile özel sektör arasında işbirliğini koordine ederek yapay zeka alanındaki bilgi birikiminin ekosisteme aktarılmasını sağlamaktadır (TÜBİTAK, 2023).

2024 yılına ait uluslararası endeksler, Türkiye’nin YZ hazırlık seviyesini, potansiyelinin ve jeopolitik iddiasının altında, orta-alt ligde konumlandırmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere Oxford Insights Government AI Readiness Index 2024 sonuçlarına göre Türkiye, 188 ülke arasında 53. sırada yer almaktadır (Oxford Insights, 2024).

Bu sıralama, Türkiye’yi Brezilya, Polonya ve Hindistan gibi gelişmekte olan piyasa rakiplerinin gerisine düşürmekte ve savaş halindeki Ukrayna’nın hemen üzerinde konumlandırmaktadır (PA Turkey, 2025). Endeksin detaylarına inildiğinde, Türkiye’nin yaklaşık 50 puanlık skorunun, küresel ortalamanın üzerinde olsa da teknolojik liderlik iddiası taşıyan bir G20 ülkesi için yetersiz olduğu görülmektedir.

Benzer bir karamsar tablo Tortoise Global AI Index 2024 verilerinde de gözlemlenmektedir. Türkiye, bu endekste ilk 40 ülke arasına girmekte zorlanmakta; İsrail, Singapur ve Güney Kore gibi benzer ölçekli veya bölgesel rakiplerinin çok gerisinde kalmaktadır (Tortoise Media, 2024). Stanford Üniversitesi tarafından yapılan daha dar kapsamlı

ve 36 ülkeyi içeren YZ Yetenekleri sıralamasında ise Türkiye 31. sırada yer alarak, akran grubu içerisindeki en zayıf halkalardan biri olarak işaretlenmektedir (Turkish Minute, 2024). Bu veriler, Türkiye'nin YZ stratejisinin kağıt üzerinde var olduğunu ancak uygulama, altyapı ve yetenek yönetimi konularında ciddi koordinasyon eksiklikleri yaşadığını ve uygulama boşluğu ile karşı karşıya olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin düşük sıralamasının temel nedeni, Teknoloji Sektörü ve Veri & Altyapı sütunlarındaki zafiyetlerdir (Oxford Insights, 2024). YZ modellerinin eğitilmesi için gereken devasa hesaplama gücü ve veri merkezi altyapısı konusunda Türkiye dışa bağımlıdır. Ülke içinde global ölçekte rekabet edebilecek yerli bir bulut sağlayıcısının bulunmaması, Türk girişimlerinin ve kurumlarının verilerini ABD merkezli (AWS, Azure, Google) sunucularda işlemesini zorunlu kılmaktadır.

Bu durum, sadece ekonomik bir maliyet yaratmakla kalmamakta, aynı zamanda veri egemenliği açısından da stratejik bir risk oluşturmaktadır. ABD'nin teknoloji sektöründeki 83.80'lik puanına karşılık Türkiye'nin bu alandaki düşük performansı, katma değer altyapıyı sağlayan ülkelerde kalmasına neden olmaktadır (Oxford Insights, 2024).

Türkiye, Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi 2021-2025 belgesi ile bu alandaki yol haritasını çizmiş ve 2024 yılında güncellenen eylem planları ile hedeflerini revize etmiştir. Stratejik öncelikler incelendiğinde, YZ uzmanlarını yetiştirme konusundaki niceliksel başarıya rağmen, nitelikli iş gücünün sektörde tutulması hususunda hedeflerin gerisinde kalındığı görülmektedir. Araştırma ve girişimcilik tarafında TÜBİTAK'ın YZ Ekosistem Çağrısı gibi mekanizmalarla Ar-Ge desteklense de, özel sektörün Ar-Ge harcamalarındaki payı hâlâ OECD ortalamalarının altındadır. Ayrıca Veri Vatani doktrini gereği verinin yurt içinde kalması hedeflenmekle birlikte, yerel veri merkezi kapasitesinin ve GPU (grafik işlem birimi) altyapısının yetersizliği bu hedefin önündeki en büyük engel olarak durmaktadır.

Türkiye'nin en büyük stratejik rezervi olan genç nüfus, eğitim alanında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Yükseköğretim Kurulu (YÖK) verilerine göre Türkiye, Avrupa'da bilişim, bilgisayar mühendisliği ve bilgi teknolojileri alanında en fazla mezun veren 3. ülke konumundadır. YÖK'ün 20 üniversitede YZ temelli ön lisans ve lisans programları açması ve her öğrencinin mezun olana kadar en az bir YZ dersi alması hedefi, dijital okuryazarlık açısından kritiktir. Stanford AI Index raporu da Türkiye'nin YZ alanındaki yetenek yoğunluğu ve kadın mezun oranı üzerinden şekillenen cinsiyet eşitliği açısından Avrupa'da öne çıktığını belirtmektedir (Stanford, 2025).

Buna karşın, Türkiye'nin bir yetenek fabrikası gibi çalışması, mezunlarını yerel ekonomide tutma konusundaki başarısızlığıyla bir beyin göçü paradoksuna dönüşmektedir. TÜİK 2024 Yükseköğretim Beyin Göçü İstatistikleri, bilişim ve iletişim teknolojileri mezunlarının %6,7'sinin yurt dışına göç ettiğini göstermektedir (TÜİK, 2024). Bu durum, Türkiye'nin YZ geliştirmekten ziyade YZ geliştiricisi ihraç eden bir ülke konumuna düşmesi riskini barındırmaktadır.

Teknik altyapı ve hesaplama gücü tarafında ise YZ modellerinin eğitimi için gerekli olan yüksek başarımlı hesaplama altyapısı Türkiye'nin en zayıf noktasıdır. TÜBİTAK bünyesindeki TRUBA, akademik çalışmalar için GPU kümeleri sunsa da, NVIDIA H100 gibi son teknoloji çiplerin küresel tedarik sıkıntısı ve yüksek maliyetleri kapasitenin kısıtlı kalmasına neden olmaktadır.

Amazon, Google veya Microsoft gibi devlerin Türkiye'de henüz fiziksel bir bölge kurmamış olması, KVKK uyumluluğu gerektiren finans ve sağlık gibi kritik sektörlerin en gelişmiş bulut YZ servislerine erişimini zorlaştırmaktadır. Yerli veri merkezleri kapasite arttırsa da YZ eğitimi için gereken devasa ve birbirine bağlı GPU kümeleri henüz küresel rekabet için istenen seviyeye ulaşamamıştır.

2.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Sonuç

Dört aktörün konumları karşılaştırıldığında belirgin bir hiyerarşi ortaya çıkmaktadır. ABD teknoloji üretimi, AR-GE kapasitesi ve risk sermayesi erişiminde tartışmasız liderdir ancak federal düzeyde düzenleyici çerçeve eksikliği parçalı bir yapıya yol açmaktadır. Çin devlet koordinasyonlu sistemik mobilizasyonla hızla ilerlemekte ve yaptırımlar karşısında yerli ekosistem inşasına odaklanmakta ancak ileri düzey teknolojilerde dışa bağımlılık sürmektedir.

AB düzenleyici liderlik ve kurumsal koordinasyonla öne çıkmakta ancak ABD ve Çin'e kıyasla teknoloji üretiminde geride kalmaktadır. Türkiye ise stratejik farkındalığa sahip olmakla birlikte uygulama kapasitesinde ciddi açıklar barındırmakta ve sistemik dönüşümü gerçekleştirememektedir.

Bununla birlikte Türkiye'nin göz ardı edilmemesi gereken yapısal avantajları şunlardır:

- 1) Genç ve sayısal olarak güçlü mühendislik havuzu,
- 2) Yenilenebilir enerji kapasitesindeki hızlı büyüme,
- 3) Coğrafi konumun sağladığı enerji transit merkezi potansiyeli ve

4) Uluslararası ortaklıklar.

Sonuç olarak küresel enerji-YZ rekabetinde ABD teknolojik hegemonya, Çin sistemik mobilizasyon, AB ise düzenleyici yetkinlikle öne çıkmaktadır. Türkiye bu üç kutbun her birinden dersler çıkararak kendine özgü bir yol haritası oluşturabilecektir. Böylece münferit başarı hikayelerinin ötesine geçilip altyapı güçlendirilebilir, sektörler arası iletişim güçlenebilir ve yetişmiş insan kaynağı başarılı bir şekilde ülkede tutulabilir.

Şekil 5: Küresel Endekslerde Türkiye'nin Yapay Zekâ Konumu

Türkiye'nin Yapay Zekâ Konumu

Küresel endekslerde Türkiye'nin yapay zekâ ekosistemindeki konumu ve rekabet gücünü etkileyen temel unsurlar.





3. Nesnelerin İnterneti (IoT)

IoT, enerji sektöründe köklü bir dönüşüm yaratarak elektrik şebekelerinin izlenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının yönetimi ve enerji verimliliğinin artırılması konularında kritik bir teknolojik altyapı sunmaktadır. Küresel IoT pazarı 2024 yılında 30 milyar ABD doları değer ulaşmış olup 2030 yılına kadar yıllık %13-14 bileşik büyüme oranıyla genişlemesi beklenmektedir (Precedence Research,2025).

Bu bölümde IoT teknolojilerinin enerji sektöründeki küresel uygulamaları ve Türkiye'deki mevcut durum ve gelecek perspektifler kapsamlı şekilde ele alınmaktadır. IoT'nin enerji sektörüne sağladığı fayda operasyonel verimlilik, maliyet düşüşü ve sistem esnekliği eksenlerinde toplanır. IoT tabanlı sensörler ve akıllı sayaçlar şebeke ekipmanlarının gerçek zamanlı izlenmesini sağlar.

Gerilim dalgalanmaları, frekans sapmaları ve aşırı yüklenmeler anlık olarak tespit edilir. Bu sayede arızaya dayalı bakım yerine kestirimci bakım uygulanır, kesinti süreleri düşer. Ayrıca, batarya hücre sıcaklığı, şarj-deşarj döngüleri ve yaşlanma oranları IoT ile izlenir. Bu sayede batarya ömrü uzar, güvenlik riskleri düşer. Büyük ölçekli depolama tesislerinde yük kaydırma ve pik dengeleme daha etkin yapılır.

3.1. Küresel Durum ve Pratik Gerçeklikler

Enerji sektöründe IoT uygulamaları, dijitalleşme stratejilerinin merkezinde yer almaktadır. Precedence Research verilerine göre küresel IoT pazarı 2024 yılında 30.21 milyar ABD doları büyüklüğe ulaşmış olup 2034 yılına kadar 111,41 milyar ABD doları değere çıkması öngörülmektedir (Precedence Research,2025).

Bölgesel dağılım incelendiğinde Kuzey Amerika pazarın %37'sine sahipken, Asya-Pasifik bölgesi %16,03 yıllık büyüme oranıyla en hızlı gelişen pazar konumundadır (Precedence Research, 2025).

Akıllı şebeke IoT pazarı ise daha da yüksek büyüme potansiyeli taşımaktadır. Markets and Data araştırmasına göre, akıllı şebeke pazarı 2024 yılında 52,19 milyar ABD doları değere ulaşacak olup bu durum %19,61 yıllık bileşik büyüme oranına karşılık gelmektedir (Markets and Data, 2023). Uluslararası Enerji Ajansı, dijital teknolojilerin 2050 yılına kadar küresel şebeke yatırımlarında 1,8 trilyon ABD doları tasarruf sağlayabileceğini vurgulamaktadır (UEA, 2023).

Gelişmiş sayaç altyapısı, enerji IoT uygulamalarının temel bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Küresel gelişmiş sayaç altyapısı pazarı 2024 yılında 21,46–28,8 milyar ABD doları aralığında değerlendirilmektedir (Mordor Intelligence, 2024).

Dünya genelinde 1,2 milyar adet akıllı sayaç kurulumu gerçekleşmiş olup elektrik sayaçları toplam pazarın %53.7'sini oluşturmaktadır. Çin Devlet Şebekesi Şirketi dünyanın en büyük akıllı sayaç altyapısını işleterek 26 eyalette 500 milyonu aşkın akıllı sayaç kurulumu tamamlamıştır. Şirket ayrıca dijital platformları üzerinden 1,1 milyar kayıtlı kullanıcıya hizmet vermektedir (Matribcg, 2024).

AB'de akıllı sayaç penetrasyonu ülkeden ülkeye önemli farklılıklar göstermektedir. İsveç, Finlandiya ve İspanya %100 penetrasyon oranına ulaşırken, Almanya hâlâ %1 seviyesinde kalmaktadır (Berk Insight, 2024).

2019 yılında yürürlüğe giren Temiz Enerji Paketi, üye devletlerin olumlu maliyet-fayda analizi sonrasında yedi yıl içinde tüketicilerin en az %80'ine akıllı sayaç kurması gerektiğini öngörmektedir (European Commission, 2019).

AB'de 2025–2029 döneminde yaklaşık 90 milyon ilave akıllı elektrik sayacı kurulması planlamakta olup toplam yatırımın 47 milyar euro değere ulaşması beklenmektedir. Aralık 2025'te açıklanan EU Grid Package, 2030 yılına kadar şebeke altyapısına 585 milyar euro yatırım gerektiğini vurgulamaktadır (European Commission, 2019).

ABD'de akıllı sayaç penetrasyon 2023 yılı itibarıyla %80 seviyesine ulaşmış olup 2029 yılına kadar %94 hedeflenmektedir (Smart Energy International, 2024). Federal Enerji Düzenleme Komisyonu, Eylül 2020'de yayımlanan Order 2222 ile dağıtık enerji kaynaklarının toplu olarak elektrik piyasalarına katılımını mümkün kılmıştır (FERC, 2020).

Bu düzenleyici ve teknolojik çerçeve, akıllı şebeke yatırımlarının yalnızca sistem entegrasyonunu değil, somut operasyonel kazanımları da beraberinde getirdiğini göstermektedir. Örneğin, Duke Energy şirketinin akıllı şebeke yatırımları sayesinde 400.000 elektrik kesintisi önlenmiş ve 1,4 milyon saat güç kaybından tasarruf sağlanmıştır (Duke Energy, 2024).

Uç bilişim ise enerji IoT'sinde kritik bir teknoloji olarak gelişmektedir. Gridspertise dünya genelinde 100 milyon uç bilişim özellikli akıllı sayaç teslimatın gerçekleştirmiştir. Uç bilişim özellikli akıllı sayaç teslimatını gerçekleştirmiştir (Gridspertise, 2024). Uç bilişim çözümleri bulut tabanlı sistemlere kıyasla arıza tespit gecikmelerini %85'e kadar azaltmaktadır. Düşük Güçlü Geniş Alan Ağları ve 5G bağlantısı, uzak bölgelerdeki enerji altyapısının izlenmesinde yaygınlaşmaktadır. Örnek vermek gerekirse Hindistan'da

Airtel ve Secure Meters, Bihar eyaletinde 1,3 milyon IoT akıllı sayaç konumlandırılmıştır (Smart Energy International, 2023).

Enerji IoT pazarında başlıca teknoloji platformları şu şekilde sıralanmaktadır:

Siemens MindSphere: Bulut tabanlı IoT işletim sistemi olarak dijital ikiz, uç zekâ ve artırılmış gerçeklik yetenekleri sunmaktadır. Microsoft Azure ve AWS üzerinde entegre çalışan platform, ABI Research değerlendirmesinde akıllı üretim platformu liderliğine sahiptir (Siemens, 2024).

ABB Ability: 70.000'i aşkın kontrol sistemi ile 70 milyon cihazı birbirine bağlayan platform, dijitalleşmiş kamu hizmetlerinde %10'un üzerinde verimlilik artışı sağlamaktadır (ABB, 2024). Verdantix Spark Matrix 2025'te Endüstriyel IoT Platformları kategorisinde ilk üç lider arasında yer almaktadır

Huawei Akıllı Şebeke Çözümleri: Bulut-boru-uç-cihaz mimarisiyle Spark teknolojisini kullanan platform, Çin Devlet Şebekesi Hunan ve Şaanxi bölgelerinde yaygın şekilde konumlandırılmıştır (Huawei Enterprise, 2024).

Şekil 6: Enerji Sektöründe Nesnelerin İnterneti

Enerjide Nesnelerin İnterneti

Akıllı sayaçlar, sensörler ve bağlı altyapılarla şekillenen yeni enerji mimarisi

1.2 Milyar

Küresel akıllı sayaç kurulumu

500M+

Çin SGCC akıllı sayaç ağı

%80

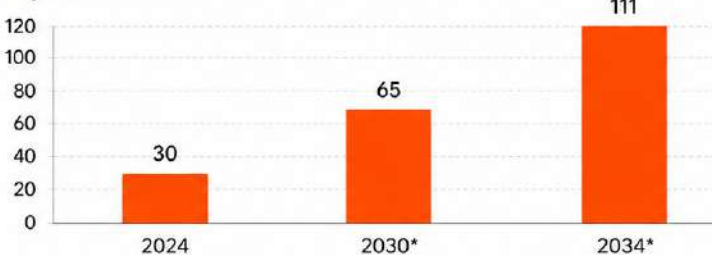
ABD akıllı sayaç penetrasyonu

1.8T \$

2050'ye kadar potansiyel şebeke tasarrufu

Küresel IoT Pazarı Büyüklüğü

Milyar cihaz



Dönüşümü Hızlandıran Dinamikler

Akıllı sayaçların yaygınlaşması, IoT tabanlı şebeke yönetimi ve gerçek zamanlı veri analitiği, operasyonel verimliliği artırırken enerji sistemlerinin esnek ve dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır.

Önde Gelen Enerji IoT Platformları

Siemens MindSphere

Bulut tabanlı IoT işletim sistemi ve dijital ikiz entegrasyonu.

ABB Ability

70.000+ kontrol sistemi ve milyonlarca bağlı cihaz.

Huawei Smart Grid

Dağıtık enerji yönetimi ve şebeke optimizasyon platformu.

Kaynak: IoT Analytics, SGCC, EIA, McKinsey, BCG

IoT cihazlarının yaygınlaşması, enerji sektöründe siber saldırı yüzeyini önemli ölçüde genişletmektedir. CSO Online verilerine göre IoT veri iletimlerinin %90'ından fazlası şifresiz gerçekleşmektedir (ASIS International, 2024). 2025 Ukrayna elektrik şebekesi saldırısı ve 2011 Saudi Aramco saldırısı gibi olaylar kritik altyapı güvenliğinin önemini gözler önüne sermektedir.

Düşük donanım kapasiteleri, güncellenmeyen firmware'ler ve standartlaştırılmamış iletişim protokolleri bu riskleri daha da artırmaktadır. Altyapı yetersizlikleri yalnızca teknik düzeyle sınırlı değildir. Nitelikli siber güvenlik personeli eksikliği, enerji şirketlerinin olaylara müdahale kapasitesini zayıflatmaktadır. Ayrıca regülasyonların parçalı yapısı ve zorunlu siber güvenlik standartlarının sınırlı uygulanması, şirketler arasında asimetrik güvenlik seviyelerine yol açmaktadır. Bu durum sistem genelinde zincirleme kırılabilirlikler üretmektedir.

Türkiye, enerji IoT uygulamalarında küresel liderlerle karşılaştırıldığında belirgin bir mesafe açığı bulunmaktadır. Akıllı sayaç penetrasyonu açısından Çin (%93+), ABD (%80) ve AB ortalamasının (%65) gerisinde kalan Türkiye, mevcut düşük penetrasyon oranından 2035 yılına kadar %80 hedefine ulaşmayı planlamaktadır. Küresel IoT enerji pazarının 2034'e kadar 111 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir.

Türkiye'nin hızla büyüyen yenilenebilir enerji kapasitesi (özellikle rüzgâr ve güneş), IoT tabanlı izleme ve yönetim sistemleri için geniş bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Inavitas, Reengen, Carbiot ve diğer girişimler, Türkiye'nin enerji IoT alanında rekabetçi çözümler geliştirebileceğini göstermektedir. AB standartlarına uyum çalışmaları, Türkiye'nin uluslararası birlikte çalışabilirlik standartlarını benimsemesini hızlandırabilir fakat planlanan 4,3 milyar Euro yatırım, AB (584 milyar euro) ve ABD (30 milyar dolar) ile karşılaştırıldığında sınırlı kalmaktadır. Finansman mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Eski SCADA sistemleri ve mekanik sayaçların yüksek oranı, dönüşüm maliyetlerini artırmaktadır. 2023 yılında yayımlanan Siber Güvenlik Yetkinlik Modeli Yönetmeliği önemli bir adım olmakla birlikte, uygulamanın izlenmesi ve yaptırımların güçlendirilmesi gerekmektedir. Son olarak dijital beceri açığı, özellikle IoT güvenliği ve veri analitiği alanlarında kritik bir darboğaz oluşturmaktadır.

3.2. Türkiye’deki Mevcut Durum ve Örnek Uygulamalar

28 Aralık 2023 tarihinde EPDK tarafından yayımlanan Elektrik Piyasası Ölçüm Sistemleri Yönetmeliği (Resmi Gazete Sayı: 32413), sektör için temel çerçeveyi oluşturmuştur (EPDK, 2023). EPDK Kurulu, 4 Aralık 2025 tarihinde “Akıllı Sayaç Sistemlerinin Yaygınlaştırılmasına ve Kullanımına İlişkin Usul ve Esaslar” başlıklı yeni düzenlemeyi kabul etmiştir (Anadolu Ajansı, 2025).

Türkiye genelinde yaklaşık 42,5 milyon elektrik sayacı bulunmaktadır. 2035 yılına kadar 50 milyon aboneye ulaşılması ve %80 akıllı sayaç penetrasyonu hedeflenmektedir. Bu hedef için toplam 4,3 milyar Euro (21 milyar TL) yatırım öngörülmektedir (Balkan Green Energy News, 2023). Netaş NEOS OSOS platformu, Türkiye elektrik dağıtımının %14’ünü yöneten bulut tabanlı çözümüyle sektörde öncü konumdadır (Netaş, 2024).

EPDK, 6 Haziran 2023 tarihinde Enerji Sektöründe Siber Güvenlik Yetkinlik Modeli Yönetmeliği’ni yayımlamıştır (Resmi Gazete Sayı: 32213). Yönetmelik; elektrik dağıtımı, doğal gaz dağıtımı, elektrik iletimi, doğal gaz/ham petrol iletimi, doğal gaz depolama, elektrik üretimi ve rafinerileri kapsamaktadır (EPDK, 2023). Temel gereklilikler arasında zorunlu Endüstriyel Kontrol Sistemleri (EKS) güvenlik değerlendirmeleri, sektör kritiklik sınıflandırma sistemi ve Enerji Piyasası Bildirim Sistemi üzerinden EPDK’ya periyodik raporlama yer almaktadır. 2025 değişikliğiyle denetçilere ISO 27001 Lead Auditor veya CISA sertifikasyonu zorunlu kılınmış, uyum tarihi 1 Mart 2026 olarak belirlenmiştir (Gündem Enerji,2025).

Enerjisa Enerji (AYEDAŞ, Başkent EDAŞ, Toroslar EDAŞ), Türkiye’nin en büyük elektrik dağıtım grubu olarak 10 milyonu aşkın müşteriye hizmet vermektedir. 2025 yılı yatırım hedefi 21-24 milyar TL olarak belirlenen şirket, Schneider Electric ve Inavitas ortaklığıyla EcoStruxure ADMS (Gelişmiş Dağıtım Yönetim Sistemi) SCADA yenileme projesini yürütmektedir (Enerjisa, 2025). Şirket ayrıca 2025 yılında Sorumlu Yapay Zekâ Politikası’nı açıklamıştır.

Boğaziçi Elektrik Dağıtım AŞ (BEDAŞ), Alcatel-Lucent Teletaş ortaklığıyla Otomatik Sayaç Okuma sistemini (OSOS) devreye almıştır. BEDAŞ, Türkiye’deki en yüksek elektronik sayaç sayısına (4 milyon) sahiptir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), ulusal elektrik iletim sistemini gelişmiş SCADA sistemleriyle işletmektedir. ICCP protokol entegrasyonu, MPLS üzerinden kiralık hatlar aracılığıyla 19200 Baud birincil kanallarla sağlanmaktadır. Milli Yük Tevzi Merkezi, 7/24 sistem izleme ve talep-arz dengelemesi yaparak Yük Tevzi Bilgi Sistemi’ni SCADA/EMS ile entegre etmektedir.

TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi, 2024 yılında Dünya Ekonomik Forumu (WEF) Küresel Deniz Feneri Ağı'na uçtan uca tedarik zinciri dijital dönüşümü nedeniyle seçilmiştir (Fortune Türkiye, 2024). Şirket, dijital dönüşüm projelerine yaklaşık 18 milyon ABD doları yatırım yaparak yıllık 30 milyon ABD doları verimlilik potansiyeli elde etmiştir (Tüpraş, 2024)

Başkent EDAŞ, Ankara dahil 7 ilde yaklaşık 4,6 milyon aboneye hizmet vermektedir. Schneider Electric EcoStruxure ADMS projesini DMS (Dağıtım Yönetim Sistemi) ve DERMS (Dağıtık Enerji Kaynakları Yönetim Sistemi) bileşenleriyle yürüten şirket, 3,5 milyon elektronik sayaç ve %99 OSOS/elektronik kapsama oranına sahiptir (Gazete Anadolu, 2024).

3.3 Genel değerlendirme

Enerji sektörü, geleneksel kas gücü odaklı yapısından sıyrılarak verinin merkezde olduğu dinamik bir zekâ ekosistemine evrilmektedir. Özellikle uç bilişim ve 5G gibi teknolojiler sayesinde arıza tespit sürelerinin %85 gibi radikal oranlarda düşmesi, operasyonel verimliliği bambaşka bir boyuta taşımaktadır. Bu süreç hem maliyetlerin düşmesini sağlamakta hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ve enerji tasarrufu gibi kritik alanlarda sisteme hayati bir esneklik kazandırmaktadır.

Türkiye özelinde 2035 yılına kadar hedeflenen %80 akıllı sayaç penetrasyonu, ülkenin bu teknolojik yarışta geri kalmama konusundaki kararlılığını yansıtmaktadır. Ancak bu hedefin önünde onlarca yıllık SCADA altyapısının modernizasyonu ve AB veya ABD ölçeğindeki devasa yatırım bütçeleriyle olan finansal makas gibi somut engeller bulunmaktadır. EPDK'nın son dönemde hayata geçirdiği regülasyonlar bu dönüşümün hukuki zeminini sağlamlaştırsa da sahadaki uygulamaların hızı ve yerli yazılım çözümlerinin bu sürece ne kadar entegre edilebileceği, Türkiye'nin bölgesel bir enerji merkezi olup olamayacağını belirleyecek ana faktör olacaktır.

Teknolojik dönüşümün en hassas noktasını ise siber güvenlik ve nitelikli insan kaynağı oluşturmaktadır. IoT veri iletimlerinin büyük bir kısmının hâlâ şifresiz gerçekleşmesi, enerji altyapılarını siber saldırılara karşı açık bir hedef haline getirirken bu karmaşık sistemleri yönetecek dijital yetkinlik açığı da ciddi bir darboğaz yaratmaktadır.

Dolayısıyla veriyi okuyabilen, analiz eden ve en önemlisi bu veri ağlarını savunabilen uzman bir iş gücünün yetiştirilmesi şarttır. Sonuç olarak Türkiye, enerji IoT'sini bir dijital savunma ve verimlilik stratejisi olarak gördüğü ölçüde küresel enerji liginde stratejik bir oyuncu haline gelecektir.

Şekil 7: Enerjide Siber Güvenlik ve IoT Riskleri

Enerjide Siber Güvenlik ve IoT Riskleri

Bağlı enerji altyapılarında güvenlik, insan kaynağı ve modernizasyon gereksinimleri

%90+

IoT veri iletimlerinin büyük bölümü şifrelenmeden gerçekleşiyor.

%70

Enerji sektörüne yönelik siber saldırılarda yıllık artış.

01

Eski Altyapı

- SCADA sistemlerinin yaşlanması
- IoT entegrasyon zorlukları
- Mekanik sayaç bağımlılığı

02

Siber Güvenlik

- Şifresiz IoT iletişimleri
- Firmware güncelleme eksiklikleri
- Standart dışı protokoller

03

İnsan Kaynağı

- IoT/OT güvenlik uzmanı açığı
- Dijital beceri eksikliği
- Yetkinlik dönüşümü ihtiyacı

Akıllı Sayaç Penetrasyonu

Akıllı sayaçların toplam sayaçlara oranı



Kaynak: CSO Online, 2024; Energy Cybersecurity Reports, 2024



4. Dijital İkizler

Dijital ikiz kavramı ilk kez 2002 yılında Michigan Üniversitesinden Dr. Michael Grieves tarafından ortaya atılmış olmakla birlikte, bu teknolojinin enerji sektöründe yaygınlaşması son on yılda gerçekleşmiştir (TÜBİTAK Bilim Genç, 2025).

Dijital ikiz, en basit tanımıyla fiziksel bir varlığın, sistemin veya sürecin gerçek zamanlı verilerle beslenen sanal bir kopyasıdır. Ancak bu tanımı yalnızca bir kopya olarak düşünmek, teknolojinin sunduğu olanakları daraltır. Dijital ikizler; bir rüzgâr türbininin, güneş santralinin veya ulusal elektrik şebekesinin hem görüntüsünü hem de işleyişini, sıcaklığını, titreşimini, performans değişimlerini ve hatta gelecekte nasıl davranacağını modelleyebilen dinamik sistemlerdir.

Bir enerji santralinde dijital ikiz, fiziksel varlıklara (türbinlere, panellere, transformatörlere) yerleştirilen sensörler aracılığıyla her saniye veri toplar. Bu veriler bulut sistemine aktarılır ve orada yapay zekâ algoritmaları tarafından işlenir. Sonuçta ortaya, gerçek varlığın davranışlarını birebir taklit eden sanal bir ikiz çıkar. Örneğin, bir rüzgâr türbininin dijital ikizi “Rüzgâr hızı aniden artsa türbin nasıl tepki verir?” sorusunu gerçek dünyada risk almadan yanıtlayabilir.

4.1. Küresel Durum ve Stratejik Projeler

Dijital ikiz pazarı, enerji sektöründe en hızlı büyüyen teknoloji segmentlerinden birini oluşturmaktadır. GM Insights raporuna göre küresel dijital ikiz pazarı 2024 yılında 13,6 milyar ABD doları değerindeyken, 2034 yılına kadar 428,1 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir; bu durum yıllık %41,4'lük bileşik büyüme oranına karşılık gelmektedir (GM Insights, 2025).

Enerji sektörüne özgü dijital ikiz pazarına bakıldığında ise Market.us verilerine göre elektrik sektöründeki dijital ikiz pazarı 2024 yılında 2,4 milyar ABD doları değerindeyken 2034 yılında 37,3 milyar ABD dolarına ulaşması öngörülmektedir; bu da %31,4'lük bir yıllık bileşik büyüme oranını temsil etmektedir (Market.us, 2025).

Growth Market Reports analizine göre ise dijital ikiz enerji santrali pazarı 2024 yılında 1,84 milyar ABD doları seviyesinden 2033 yılına kadar 5,16 milyar ABD dolarına yükselecektir (Growth Market Reports, 2025). Bu rakamların arkasındaki itici güçler şunlardır:

- 1) Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşması şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakların şebekeye entegrasyonu, geleneksel yönetim araçlarının kapasitesini aşan bir koordinasyon gerektirmektedir.
- 2) Yaşlanan enerji altyapısı öngörücü bakım çözümlerine olan talebi artırmıştır.
- 3) Dekarbonizasyon hedefleri operatörleri daha verimli ve esnek sistemlere yönlendirmektedir. Dijital ikizler tam da bu üç ihtiyacın kesişim noktasında konumlanmaktadır.

Bölgesel dağılım incelendiğinde Kuzey Amerika'nın 2024 yılında %34,2'lik payla pazara hakim konumda olduğu görülmektedir (Market.us, 2025). ABD'nin bu liderliği, gelişmiş BT altyapısı, güçlü bulut bilişim kapasitesi ve enerji şirketlerinin dijital dönüşüme erken yatırım yapmasından kaynaklanmaktadır.

Asya-Pasifik bölgesi ise en hızlı büyüyen pazar konumundadır; Çin, Hindistan ve Japonya yeni enerji üretim kapasitesi, şebeke modernizasyonu ve dijital dönüşüm girişimlerine yapılan büyük ölçekli yatırımlarla öne çıkmaktadır. Avrupa pazarı 2024'te 410 milyon ABD doları değere ulaşmış olup bölgenin çeşitli enerji karması, iddialı dekarbonizasyon hedefleri ve şebeke güvenilirliğine yönelik güçlü düzenleyici vurgusu bu büyümeyi desteklemektedir (Growth Market Reports, 2025).

Dijital ikizlerin en çarpıcı uygulama alanlarından biri yenilenebilir enerji sistemleridir. Rüzgâr türbinleri ve güneş santralleri, doğası gereği değişken koşullarda çalışır; bu durum hem performans optimizasyonunu hem de bakım planlamasını zorlaştırır. Dijital ikizler bu belirsizliği yönetilebilir kılmaktadır.

GE Renewable Energy, 2015 yılında dünyanın ilk dijital rüzgâr çiftliğini kurarak bu alanda öncü olmuştur (GE, 2015). Şirketin Dijital Rüzgâr Çiftliği konsepti, her türbin için benzersiz koşullara göre optimize edilmiş 20'ye kadar farklı konfigürasyon oluşturabilmektedir. Türbinlere yerleştirilen sensörler, nacelle yöneliminden jeneratör torkuna, kanat ucu hızından sıcaklık dağılımına kadar düzinelerce parametreyi sürekli izlemektedir. Bu veriler GE'nin Predix yazılım platformunda gerçek zamanlı olarak analiz edilmektedir (Wind Power Engineering, 2019).

Sonuçlar dikkat çekicidir: GE'nin kurulumlarında yıllık enerji üretimi %5 ila %7 oranında artmıştır (Wind Power Engineering, 2019). Harvard Business Review'da yayımlanan bir analize göre bu teknoloji, bir rüzgâr çiftliğinin enerji üretimini %20'ye kadar artırabilmekte ve 100 megawattlık bir çiftliğin ömrü boyunca 100 milyon ABD doları ek değer yaratabilmektedir (HBR, 2015).

Dijital ikizlerin rüzgâr enerjisindeki bir diğer katkısı iz etkisi optimizasyonudur. Bir türbinin yarattığı türbülans, arkasındaki türbinlerin performansını olumsuz etkiler. Dijital ikiz, her türbinin çevresiyle ve komşu türbinlerle etkileşimini simüle ederek kanat açıları ve yönelim ayarlarını optimize edebilmektedir. Siemens Gamesa, Nisan 2025'te Danimarka'da bir rüzgâr çiftliğinin dijital ikizini başarıyla devreye alarak gerçek zamanlı izleme, öngürücü bakım ve türbin performansı optimizasyonu sağlamıştır (Technavio,2024).

Güneş enerjisi sistemlerinde dijital ikizler benzer avantajlar sunmaktadır. Huawei'nin dijital ikiz destekli güneş invertörleri, enerji veriminde %10 ila %20 iyileştirme ve duruş süresiyle %25'e varan azalma sağlamıştır (ScienceDirect,2025). California'daki Topaz Güneş Çiftliği örneğinde dijital ikiz kullanımıyla güneş panellerinin performansı iki katına çıkarılmış ve bakım maliyetler üçte bir oranında düşürülmüştür (Softeq,2025). Dijital ikizler, panel kirlilik analizi, gölgeleme tespiti ve ekipman degradasyonu izlemesi gibi işlevlerle güneş santrallerinin verimliliğini ve ömrünü arttırmaktadır.

Konvansiyonel ve yenilenebilir enerji santralleri, yüksek sermaye yoğunluklu varlıklar olarak operasyonel verimlilik ve bakım maliyetleri açısından sürekli optimizasyon baskısı altındadır. Dijital ikizler bu alanda dönüştürücü bir rol oynamaktadır. Siemens, gaz türbinleri için dijital ikizler uygulamış olup bu sanal modeller türbin performansını simüle etmekte, arızaları önceden tahmin etmekte ve bakım programlarını optimize etmektedir (Appinventiv, 2025).

Shell, petrol platformları ve rafinerilerinden oluşan geniş varlık portföyünde dijital ikizler kullanarak ekipman performansını tahmin etmekte, üretim süreçlerini optimize etmekte ve güvenliği artırmaktadır; bu yaklaşım operasyonel maliyetleri düşürmüştür ve ekipman arızası riskini minimize etmiştir (Appinventiv, 2025). Duke Energy, dijital ikizi şebekesinin sanal bir temsilini oluşturmak için kullanmakta; bu sayede çeşitli senaryoları simüle edebilmekte, potansiyel arızaları öngörebilmekte ve şebeke güvenilirliğini artırabilmektedir (Appinventiv, 2025).

ABD'de dijital ikizler enerji sisteminin dayanıklılık, piyasa entegrasyonu ve siber güvenlik hedefleriyle doğrudan ilişkilendirilmiştir. ABD Enerji Bakanlığı, dijital ikizleri özellikle aşırı hava olayları, iklim kaynaklı riskler ve siber tehditler karşısında şebeke esnekliğini artıran kritik bir araç olarak konumlandırmaktadır (GM Insights, 2025). NREL gibi federal araştırma merkezleri, iletim hatları, dağıtım şebekeleri ve enerji depolama sistemleri için yüksek çözünürlüklü dijital ikiz modelleri geliştirmektedir (Market.us, 2025).

Piyasa boyutunda FERC Order 2222 ile dağıtık enerji kaynaklarının toptan elektrik piyasalarına katılımı mümkün hale gelmiş, bu düzenleme milyonlarca küçük ölçekli üretim ve depolama biriminin koordinasyonunu zorunlu kılmıştır (FERC, 2020). Bu karmaşık yapının yönetimi, geleneksel SCADA sistemlerinin ötesinde, dijital ikiz tabanlı simülasyon ve optimizasyon araçlarını gerekli kılmaktadır.

Duke Energy ve Southern Company gibi büyük operatörler, dijital ikizleri yalnızca varlık yönetimi için değil, aynı zamanda piyasa senaryolarının simülasyonu, talep tarafı katılımı ve kesinti önleme stratejileri için kullanmaktadır (Appinventiv, 2025). Bu yönüyle ABD yaklaşımı, dijital ikizleri veri yoğun ve piyasa temelli bir karar destek altyapısı olarak konumlandırmaktadır (Market.us, 2025).

Asya-Pasifik bölgesinin itici gücü olarak Çin, devasa yenilenebilir enerji kapasitesini yönetmek için dijital ikizleri stratejik bir zorunluluk olarak konumlandırmış ve bu alanda en hızlı büyüyen pazar haline gelmiştir (Al-Shetwi, 2025). State Grid Corporation of China (SGCC), dünyanın en kapsamlı dijital ikiz şebeke projelerini yürüterek karmaşık iletim hatlarını ve dağıtık enerji kaynaklarını yapay zekâ desteğiyle optimize etmektedir.

Huawei gibi teknoloji devlerinin güneş enerjisi santrallerinde uyguladığı dijital ikiz çözümleri ise enerji verimliliğinde %20'ye varan artışlar sağlayarak ülkenin 2060 karbon nötr hedefine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır (ScienceDirect, 2025).

Çin yaklaşımının ayırt edici yönü, dijital ikizlerin ulusal enerji planlamasıyla doğrudan entegre edilmesidir. Rüzgâr ve güneş üretimi, sanayi talebi ve bölgesel tüketim desenleri tek bir sanal şebeke modeli üzerinde simüle edilebilmekte; bu sayede hem kısa vadeli operasyonel kararlar hem de uzun vadeli altyapı yatırımları optimize edilmektedir (ScienceDirect, 2025).

Huawei gibi teknoloji firmalarının güneş santrallerinde uyguladığı dijital ikiz çözümleri, enerji verimliliğinde %20'ye varan artışlar sağlamış ve Çin'in 2060 karbon nötr hedefinin teknik dayanaklarından biri haline gelmiştir (ScienceDirect, 2025). Bu bağlamda dijital ikizler, Çin'de merkezi planlama ve dekarbonizasyon stratejisinin temel bir bileşeni olarak görülmektedir (Al-Shetwi, 2025).

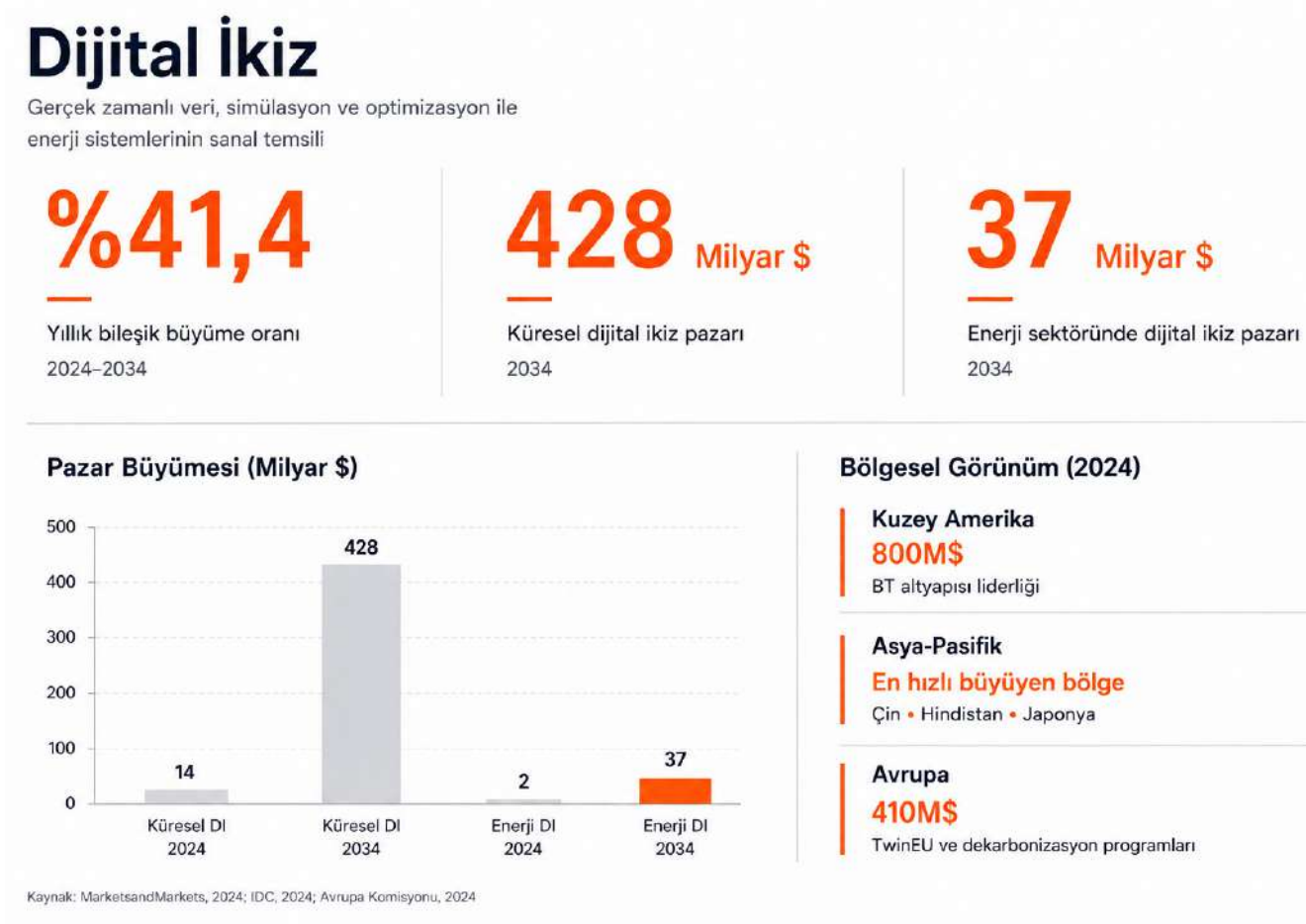
Avrupa Birliği, dijital ikiz teknolojisini enerji dönüşümünün kritik bir kolaylaştırıcısı olarak konumlandırmıştır. Bu vizyonun en somut yansıması TwinEU projesidir. Horizon Europe çerçevesinde finanse edilen TwinEU, pan-Avrupa elektrik şebekesinin dijital ikizini oluşturmayı hedeflemektedir. 25,2 milyon euro toplam bütçe (20 milyon euro AB katkısı), 75 partner ve 15 ülke katılımıyla 2024-2026 döneminde yürütülen proje, Avrupa'nın dijitalleşme ve dekarbonizasyon ikiz dönüşümünü hızlandırmayı

amaçlamaktadır (TwinEU, 2024; European Commission, 2024).

TwinEU'nun yaklaşımı, yerel dijital ikizlerin federasyonuna dayanmaktadır. Her operatör kendi uygulama kararlarını alabilirken, birlikte çalışabilirlik ve ekosistemle veri alışverişi korunmaktadır (Fraunhofer, 2025). Proje kapsamında 15 Dağıtım Sistemi Operatörü (DSO) ve 15 İletim Sistemi Operatörü (TSO) yer almakta; 8 pilot bölgede demonstrasyonlar gerçekleştirilmektedir (E.DSO, 2024; Enlit World, 2025).

TwinEU, siber-fiziksel şebeke dayanıklılığı, gelişmiş tahmin araçları, akıllı koordineli planlama ve artırılmış şebeke gözlemlenebilirliği alanlarında yenilikler geliştirmektedir. Bu proje, Avrupa'nın iddialı iklim hedeflerini karşılamak için kritik olan yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu desteklemektedir (Enlit World, 2025).

Şekil 8: Dijital İkizler ve Küresel Pazar



4.2. Türkiye’deki Mevcut Durum

Türkiye’de dijital ikiz teknolojisi enerji sektöründe henüz erken aşamada olmakla birlikte, özellikle büyük özel sektör oyuncuları aracılığıyla somut adımlar atılmaktadır. Siemens Türkiye, 2025 yılında müşterilerinin operasyonlarında 148 bin ton CO2 eşdeğeri emisyon azaltımına katkı sunmuş; 21,72 milyon euroluk tasarruf potansiyeli ortaya çıkarmıştır (Gazete Anadolu, 2025).

Yıldız Holding bünyesindeki Continental Confectionery Company ile Çorlu’da yürütülen projede, soğutma sistemleri dijital ikiz teknolojileriyle izlenip yönetilmektedir. Petrokimya sektöründe ise Siemens Türkiye ve SOCAR Türkiye, Petkim’in Aliağa tesislerinde enerji altyapısının modernizasyonuna ve dijital izleme sistemleriyle enerji kayıplarının azaltılmasına odaklanmaktadır (Gazete Anadolu, 2025).

Türkiye’de dijital ikiz teknolojinin yaygınlaşması için nitelikli işgücü gelişimi kritik öneme sahiptir. Enerjisa Enerji, UNDP ve EBRD ortaklığıyla başlatılan “Türkiye Enerji Sektöründe Yeşil ve Dijital Becerilerin Geliştirilmesi Ortak Girişimi” bu alanda dikkat çekicidir. COP29’da uluslararası arenada duyurulan bu girişimin ilk somut çıktısı olan “Türkiye’nin Enerji İş Gücünde Yeşil ve Dijital Beceriler: İkiz Dönüşüm Rehberi” raporu, sektörün dijital ve yeşil dönüşüme uyumu için kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır (Yeni Birlik, 2025).

Rapor, Türkiye’nin 2053 net sıfır hedefiyle uyumlu olup dijital ikizler gibi ileri teknolojilerin benimsenmesinde insan kaynağının merkezi rolünü vurgulamaktadır (UNDP Türkiye, 2024). Ayrıca TEİAŞ, iletim şebekesinin planlama süreçlerinde ileri şebeke modelleme araçlarını kullanırken; Zorlu Enerji, yenilenebilir enerji santrallerinde kestirimci bakım amacıyla dijital ikiz tabanlı çözümleri değerlendirmektedir (TEİAŞ, 2024; Zorlu Enerji, 2024).

Dijital ikizlerin enerji sektöründe yaygınlaşması, teknolojinin potansiyeline rağmen çeşitli engellerle karşı karşıyadır. Bu engellerin anlaşılması, hem politika yapıcılar hem de sektör oyuncuları için stratejik öneme sahiptir. Enerji sistemleri devasa hacimde veri üretmektedir.

Bir rüzgâr çiftliğindeki tek bir türbin saniyede yüzlerce veri noktası oluşturabilir; bu verilerin toplanması, depolanması, işlenmesi ve analiz edilmesi ciddi altyapı yatırımı gerektirmektedir (Toobler, 2025). Daha da önemlisi, farklı kaynaklardan gelen verilerin (SCADA sistemleri, akıllı sayaçlar, meteoroloji verileri, piyasa verileri) entegrasyonu standartlaşma eksikliği nedeniyle zorlaşmaktadır. IET Smart Grid dergisinde yayımlanan

incelemeye göre, enerji şebekeleri yenilenebilir ve geleneksel kaynaklar gibi çeşitli kaynaklardan veri birleştirmek zorundadır; her birinin kendine özgü operasyonel karakteristikleri vardır (Al-Shetwi, 2025). Enerji sektöründeki altyapının önemli bir kısmı onlarca yıl önce inşa edilmiştir ve dijital ikiz entegrasyonu için tasarlanmamıştır. Bu eski sistemlerin modernizasyonu veya dijital ikizlerle uyumlu hale getirilmesi hem maliyetli hem de teknik açıdan karmaşıktır. Energy Reports dergisinde yayımlanan bir çalışma, mevcut enerji altyapılarının dijital ikiz entegrasyonu için güncellenmesi gerektiğini ve bu durumun uygulama zorluklarına yol açtığını vurgulamaktadır (Sleiti vd., 2022).

Bir dijital ikizin değeri, fiziksel ikizini ne kadar doğru temsil ettiğine bağlıdır. Model doğruluğunun sağlanması ve sürdürülmesi sürekli kalibrasyon, doğrulama ve güncelleme gerektirmektedir. Fiziksel sistemdeki değişiklikler (bileşen değişimi, aşınma, çevresel değişimler) dijital modele yansıtılmalıdır. IET Smart Grid incelemesine göre, model doğruluğu dijital ikiz teknolojisinin temel zorluklarından birini oluşturmakta olup sürekli öğrenme (lifelong learning) yaklaşımları bu sorunu çözebilecek potansiyele sahip olmakla birlikte önemli güçlükler barındırmaktadır (Al-Shetwi, 2025). Dijital ikizler, enerji sistemlerinin siber saldırı yüzeyini genişletmektedir.

Fiziksel varlıklarla sürekli veri alışverişinde bulunan bu sanal modeller, yeni güvenlik açıkları oluşturmaktadır. ISC2'nin analizine göre, erişim kontrolü dijital ikizlerde kritik öneme sahiptir; zayıf erişim kontrolleri yetkisiz değişikliklere olanak tanıyabilir ve örneğin bir elektrik şebekesini kontrol eden dijital ikiz düzgün korunmazsa, yetkisiz erişim operasyonları sektöre uğratabilir veya güvenlik tehlikeleri yaratabilir (ISC2, 2024).

2024 yılında ABD Enerji Bakanlığı'nın Elektrik Ofisi, şebeke güvenliği ve dayanıklılığını artırmak için dijital ikiz teknolojisinden yararlanan bir proje için Southern Company Services'a 2,4 milyon ABD doları tahsis etmiştir (GM Insights, 2025). Bu yatırım, dijital ikizlerin güvenlik aracı olarak potansiyelini göstermekle birlikte, aynı zamanda siber güvenlik endişelerinin ciddiyetini de yansıtmaktadır.

Dijital ikiz uygulamaları önemli bir başlangıç yatırımı gerektirmektedir: sensör altyapısı, veri toplama sistemleri, bulut veya uç bilişim kapasitesi, yazılım lisansları ve entegrasyon hizmetleri. Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki kamu hizmetleri ve küçük-orta ölçekli enerji şirketleri için bu maliyetler caydırıcı olabilmektedir. Bununla birlikte, dijital ikizlerin sağladığı operasyonel tasarruflar ve verimlilik kazanımları orta-uzun vadede bu yatırımların geri dönüşünü sağlayabilmektedir.

4.3. Genel Değerlendirme

Dijital ikiz teknolojisi; yenilenebilir enerjinin değişkenliği, yaşlanan altyapı ve dekarbonizasyon baskısı gibi yapısal zorlukların çözümünde kritik bir araçtır. Türkiye açısından değerlendirildiğinde, bu teknolojinin benimsenmesi başlangıç aşamasında olsa da Siemens Türkiye'nin pilot projeleri ve Enerjisa-UNDP-EBRD girişimi gibi adımlar umut vericidir.

Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi dijital ikiz teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Veri yönetişimi eksikliği, standartlaşma sorunları ve nitelikli işgücü açığı aşılması gereken yapısal kısıtlamalardır.

AB'nin TwinEU projesi, ulusal dijital ikizlerin federasyonu yoluyla kıtasal ölçekte entegrasyonun mümkün olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak dijital ikizler, yapay zekâ ve IoT ile birlikte geleceğin akıllı ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin temelini atacaktır.

Türkiye'nin bu dönüşümde konumunu güçlendirmesi altyapı yatırımları, düzenleyici çerçeve gelişimi ve insan kaynağı kapasitesinin eş zamanlı ilerlemesine bağlıdır.



5. Araçtan Şebekeye Teknolojileri (V2G)

V2G kavramı, elektrikli araçların yalnızca enerji tüketen birer ulaşım aracı değil, aynı zamanda elektrik şebekesiyle çift yönlü etkileşime giren aktif enerji varlıkları olarak konumlandırılmasını ifade eder. V2G sistemlerinde elektrikli araç bataryaları, düşük talep ve düşük fiyat dönemlerinde şebekeden enerji depolarken; yüksek talep, pik saatler veya sistem stresinin arttığı anlarda depoladıkları enerjiyi şebekeye geri verebilmektedir. Bu yaklaşım, enerji sistemine merkezi olmayan, dağıtık ve mobil bir depolama katmanı eklemektedir. Dolayısıyla V2G, yalnızca bir şarj teknolojisi değil, enerji sisteminin esneklik mimarisini yeniden tanımlayan yapısal bir araçtır.

V2G'nin temel işlevi, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan oynaklığı karşısında şebeke kararlılığını desteklemektir. Güneş ve rüzgâr üretiminin talep ile zaman uyumsuzluğu, klasik üretim-planlama araçlarının yetersiz kalmasına yol açmaktadır. V2G bu sorunu, talep tarafını pasif bir alıcı olmaktan çıkararak aktif bir dengeleme unsuru haline getirir.

Bir V2G sisteminin çalışabilmesi için dört temel teknik bileşenin birlikte işlemesi gerekmektedir: çift yönlü şarj altyapısı, iletişim protokolleri, kontrol-optimizasyon yazılımı ve piyasa entegrasyonu.

Çift yönlü şarj altyapısı, V2G'nin fiziksel temelini oluşturur. Geleneksel AC şarj sistemleri yalnızca tek yönlü enerji akışına izin verirken, V2G için DC tabanlı ve çift yönlü invertörlere sahip şarj istasyonları gereklidir. Bu altyapı, bataryadan şebekeye enerji akışını güvenli biçimde yönetirken harmonik bozulmaların ve gerilim dalgalanmalarının önüne geçer (U.S. Department of Energy, 2023). İletişim katmanında ISO 15118 standardı kritik rol oynar. Bu standart, araç ile şebeke arasında otomatik kimlik doğrulama, batarya durumu paylaşımı, şarj sınırları ve fiyat sinyallerinin gerçek zamanlı iletilmesini mümkün kılar.

Kontrol ve optimizasyon katmanında yapay zekâ, binlerce aracın bir araya getirilerek tek bir büyük batarya gibi hareket etmesini sağlayan VPP modelini kullanır. Karar alma süreçleri, milisaniyeler içinde tepki verilmesini gerektiren durumlarda uç bilişim teknolojileriyle desteklenir. Bu süreçte siber güvenlik, enerji arz güvenliği açısından hayati önemdedir; blokzinciri tabanlı şifreleme yöntemleri, hem veri güvenliğini hem de araç sahiplerine yapılacak ödemelerin şeffaflığını garanti altına alır.

V2G teknolojisi enerji sistemine dört temel hizmet sağlamaktadır:

1. Frekans regülasyonu: Şebeke dengesini koruyarak ani dalgalanmalara hızlı yanıt verir.
2. Pik yük dengeleme: Yüksek talep saatlerinde şebeke üzerindeki baskıyı azaltır.
3. Yenilenebilir enerji entegrasyonu: Güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakların etkin kullanımını sağlar.
4. Acil durum yedekleme: Kesinti anlarında kritik altyapıların enerji ihtiyacını karşılar.

Şekil 9: Araçtan Şebekeye Pazarı

Araçtan Şebekeye (V2G)

Elektrikli araçların enerji sistemine esneklik sağlayan yeni rolü

4.2 Milyar \$

2024 V2G pazarı

70 Milyar \$

2035 öngörüsü

%30+

Yıllık bileşik büyüme oranı (YBBO)

V2G'nin 4 Temel Fonksiyonu

01



**Frekans
Regülasyonu**
Ani dalgalanmalara
hızlı yanıt

02



**Pik Yük
Dengeleme**
Talep zirvelerinde
destek

03



**Yenilenebilir
Enerji Entegrasyonu**
Güneş ve rüzgâr
fazlasının depolanması

04



**Acil Durum
Yedekleme**
Kritik altyapı
enerji güvenliği

Neden Önemli?

%80'e kadar

Şebeke esnekliği katkısı

Binlerce EV

Dağıtık enerji kaynağına dönüşebilir

Çift yönlü şarj

Yeni enerji piyasalarının temel bileşeni

5.1 Küresel Durum

V2G pazarı, küresel ölçekte hızla büyüyen enerji teknolojileri arasında yer almaktadır. Global Market Insights verilerine göre V2G ve akıllı şarj çözümlerini kapsayan pazarın 2024 yılında yaklaşık 4,2 milyar ABD doları seviyesinde olduğu; 2035 yılına kadar yıllık %30'un üzerinde bileşik büyüme oranıyla 70 milyar ABD dolarını aşmasının beklendiği

belirlenmektedir (GM Insights, 2025).

a. ABD

ABD’de V2G’nin gelişimi bireysel araçlardan ziyade filo bazlı kullanım senaryoları üzerinden ilerlemiştir. Bunun temel nedeni, filo araçlarının kullanım saatlerinin öngörülebilir olması ve batarya döngülerinin merkezi biçimde yönetilebilmesidir. Kaliforniya ve New York, ABD’de V2G uygulamalarının odak noktası haline gelmiştir; bunun temel nedeni bu eyaletlerin eşzamanlı olarak yüksek elektrikli araç penetrasyonuna, ilerlemiş şebeke dijitalleşmesine ve güçlü düzenleyici teşvik mekanizmalarına sahip olmalarıdır.

Kaliforniya, agresif emisyon azaltım hedefleri, yüksek yenilenebilir enerji payı ve sık yaşanan şebeke esneklik sorunları nedeniyle V2G için doğal bir test alanı sunmaktadır. New York ise yoğun kentsel talep yapısı, sınırlı iletim kapasitesi ve gelişmiş yan hizmet piyasaları sayesinde V2G’nin piyasa entegrasyonunun test edilebildiği bir laboratuvar işlevi görmektedir (U.S. Department of Energy, 2023; NREL, 2024).

Özellikle okul servisleri, ABD’de V2G’nin ana uygulama alanı haline gelmiştir. Örneğin Kaliforniya’da San Diego Gas & Electric işbirliği ile yürütülen projelerde, elektrikli okul servisleri gün içinde öğrencileri taşıdıktan sonra öğle ve akşam saatlerinde şebekeye enerji geri beslemesi yaparak frekans regülasyonu hizmeti sunmaktadır.

Bu projelerde elde edilen gelir, okul bölgelerinin elektrikli araç dönüşüm maliyetlerini dengelemekte ve V2G’nin ekonomik fizibilitesini doğrudan kanıtlamaktadır (U.S. Department of Energy, 2023). ABD’de belediye filoları da V2G’nin yaygınlaşmasında kritik rol oynamaktadır. New York eyaletinde Metropolitan Transportation Authority ve Con Edison işbirliği ile yürütülen pilot projelerde, belediye hizmet araçları ve kamu filoları, yoğun talep saatlerinde şebekeye destek vermektedir. Bu uygulamalar, V2G’nin yalnızca teknik olarak değil, yan hizmet piyasalarına entegrasyon açısından da uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Ancak federal düzeyde bağlayıcı bir çerçevenin olmaması, bu uygulamaların eyalet bazında parçalı kalmasına yol açmaktadır. Bu durum ABD modelinin güçlü olduğu kadar kırılgan yönünü de ortaya koymaktadır.

b. Çin

Çin, V2G açısından küresel ölçekte benzersiz bir ölçek potansiyeline sahiptir. Bunun temel nedeni, elektrikli araç sayısının mutlak büyüklük açısından dünyadaki tüm diğer ülkeleri açık ara geride bırakmasıdır. 2023 itibarıyla Çin’de yollarda bulunan elektrikli araç sayısı 20 milyonun üzerine çıkmıştır; bu durum V2G’nin teorik bir teknoloji olmaktan çıkıp sistem düzeyinde test edilebilmesini mümkün kılmıştır (IEA, 2024).

Çin’de V2G, bireysel tüketici tercihlerine bırakılmış bir piyasa aracı olarak değil, şebeke güvenliği ve kentsel enerji yönetiminin bir parçası olarak ele alınmaktadır. SGCC, Pekin, Şanghay ve Shenzhen gibi mega kentlerde gerçek zamanlı V2G tabanlı pik yük yönetimi projeleri yürütmektedir.

Örneğin Pekin’de 2022–2023 yaz döneminde uygulanan pilot projede, kamu filolarına ve taksi şirketlerine ait yaklaşık 5.000 elektrikli araç merkezi bir kontrol platformu üzerinden koordine edilmiş; bu araçlar akşam saatlerinde şebekeye geri besleme yaparak klima kaynaklı talep artışını dengelemiştir (State Grid Corporation of China, 2023). Proje sonucunda ilgili bölgelerde pik yük talebinde %15’e varan azalma sağlandığı raporlanmıştır (SGCC, 2023).

Şanghay’da ise V2G uygulamaları daha çok kentsel şarj altyapısı ve ticari filolar üzerinden yürütülmektedir. Şehirde BYD elektrikli otobüs filosu, gece düşük talep saatlerinde şarj edilmekte, gündüz saatlerinde ise kısıtlı ölçekli geri besleme ile dağıtım şebekesine destek vermektedir. Bu uygulama, özellikle yoğun yaz aylarında yerel trafolardaki aşırı yüklenme riskini azaltmıştır (BYD, 2023; China Energy News, 2024).

Çin modelinin ayırt edici yönü, V2G’nin acil durum ve kriz yönetimi bağlamında fiilen kullanılmasıdır. 2022 yılında Sichuan eyaletinde yaşanan aşırı sıcak hava dalgası ve buna bağlı elektrik arz krizinde, elektrikli araçlar mobil enerji kaynağı olarak konumlandırılmış; hastaneler, telekomünikasyon merkezleri ve geçici barınma alanlarına V2G uyumlu şarj istasyonları üzerinden enerji sağlanmıştır (Xinhua, 2022; State Grid, 2023).

Bu uygulama, V2G’nin yalnızca ekonomik değil, stratejik bir altyapı aracı olarak değerlendirildiğini açık biçimde göstermektedir. Teknik altyapı tarafında Huawei ve BYD tarafından geliştirilen çift yönlü DC hızlı şarj sistemleri, bu projelerin omurgasını oluşturmaktadır.

Huawei’nin Shenzhen’de kurduğu V2G uyumlu şarj istasyonları, araç–şebeke arasında saniyeler içinde yön değiştirilebilen enerji akışını mümkün kılmaktadır (Huawei Digital Power, 2024). BYD ise filo bazlı V2G uygulamalarını batarya ömrünü minimize eden algoritmalarla entegre ederek sistem güvenilirliğini artırmaktadır (BYD, 2023).

c. Avrupa Birliği

Avrupa Birliği, V2G’yi enerji dönüşümünün kurumsal ve düzenleyici mimarisi içine yerleştiren bölge konumundadır. AB yaklaşımında V2G, üretici kavramının doğal bir uzantısı olarak ele alınmakta; tüketicinin aynı zamanda üretici ve esneklik sağlayıcı

olduğu bir piyasa tasarımı hedeflenmektedir.

Hollanda bu yaklaşımın en ileri örneklerinden biridir. Utrecht ve Amsterdam bölgelerinde yürütülen projelerde, elektrikli araçlar agregatörler aracılığıyla yan hizmet piyasalarına katılmakta ve frekans kontrolü sağlamaktadır. Araç sahipleri, batarya kullanım sınırları ve gelir paylaşımı açısından sözleşmelerle korunmaktadır.

Almanya’da V2G, yenilenebilir enerji entegrasyonu bağlamında ele alınmaktadır. Özellikle rüzgâr üretiminin yüksek olduğu kuzey bölgelerinde, elektrikli araçlar aşırı üretim dönemlerinde enerji depolamakta; talebin arttığı zamanlarda ise şebekeye geri vermektedir.

Danimarka’da ise V2G, ada işletimi ve mikroşebeke senaryolarında test edilmektedir. Bornholm Adası’nda yürütülen projelerde, elektrikli araçlar yerel şebekenin kararlılığını sağlamak için aktif rol oynamaktadır. Avrupa Komisyonu, bu tür uygulamaları esneklik piyasaları ve temiz enerji paketleri kapsamında desteklemekte ve V2G’yi sistem entegrasyonunun kilit araçlarından biri olarak tanımlamaktadır (European Commission, 2024).

Genel olarak bu üç bölge karşılaştırıldığında net bir ayrım ortaya çıkmaktadır. ABD V2G’yi ticari fizibilite ve piyasa temelli çözümler üzerinden ilerletmektedir. Çin V2G’yi ölçek, kamu koordinasyonu ve enerji güvenliği perspektifiyle ele almaktadır.

Avrupa Birliği ise V2G’yi regülasyon, piyasa tasarımı ve sistem entegrasyonu çerçevesine oturmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar, V2G’nin tek bir evrensel modelinin olmadığını ve teknolojinin ülke bazlı enerji sistemleri ve yönetim yapılarıyla birlikte şekillendiğini göstermektedir.

5.2. V2G: Mevcut Durum ve Yapısal Engeller

Türkiye’de V2G henüz kavramsal aşamadadır. Elektrikli araç sayısı hızla artsa da şarj altyapısı büyük ölçüde tek yönlüdür. Daha kritik sorun ise mevzuattır. Elektrikli araçların şebekeye enerji satışı hukuki olarak tanımlı değildir. Yani, dağıtım şirketleri açısından araçlar hâlâ yalnızca yük olarak görülmektedir. Buna rağmen Türkiye’nin yapısal avantajları göz ardı edilemez. Yenilenebilir enerji kapasitesi hızla büyümektedir ve bu büyüme esneklik ihtiyacını artırmaktadır. V2G, pahalı batarya santrali yatırımlarına alternatif bir yol sunar. Ayrıca genç nüfus ve dijitalleşmeye yatkın kullanıcı profili, talep tarafı katılımını kolaylaştırır. Engeller üç düzeydedir: i) Regülasyon eksikliği ve belirsizlik, ii) dağıtım şebekelerinin dijital olgunluk sorunu ve iii) batarya ömrü ve kullanıcı teşviklerinin net olmaması.

i. Regülasyon eksikliği ve hukuki belirsizlik

Türkiye’de V2G’nin önündeki en kritik engel, elektrikli araçların enerji piyasası mevzuatında şebeke aktörü veya mobil depolama varlığı olarak tanımlanmamış olmasıdır. Mevcut düzenlemelerde elektrikli araçlar yalnızca nihai tüketici statüsündedir; bu nedenle bir araç bataryasından şebekeye enerji satışı, yan hizmet sunumu veya esneklik piyasalarına katılım hukuki olarak mümkün değildir. EPDK’nın yürürlükteki düzenlemeleri elektrik üretimi ve depolamayı lisanslı, sabit tesisler üzerinden tanımlamakta; mobil depolama niteliği taşıyan araç bataryaları bu tanımın dışında kalmaktadır (EPDK, 2024).

Bu hukuki boşluk, dağıtım şirketleri açısından da yapısal bir kilitlenme yaratmaktadır. Dağıtım şirketleri mevcut regülasyon çerçevesinde risk almamakta; elektrikli araçları şebeke planlamasında yalnızca yük artırıcı unsur olarak ele almaktadır. V2G senaryoları yatırım planlarına, tarife yapılarına veya şebeke kodlarına dahil edilmemektedir.

Türkiye’de V2G’ye özgü bir yönetmelik bulunmadığı gibi, Avrupa Birliği’nde olduğu üzere esneklik piyasaları, tüketiciler tanımları veya agregatör lisansları da henüz mevzuata entegre edilmemiştir. Bu durum mevcut durumu bir bekleme rejimi haline getirmektedir: regülasyon olmadığı için piyasa oluşmamakta, piyasa oluşmadığı için de regülasyon ertelenmektedir.

ii. Şebeke dijitalleşme yetersizliği ve operasyonel kısıtlar

V2G yalnızca şarj istasyonu yatırımıyla sınırlı bir konu değildir; esas belirleyici unsur, dağıtım şebekesinin dijital olgunluk düzeyidir. Türkiye’de dağıtım şebekelerinin önemli bir bölümü çift yönlü ve eş zamanlı enerji akışını güvenli biçimde yönetecek ölçüm, izleme ve kontrol altyapısına sahip değildir. Akıllı sayaç penetrasyonu sınırlı kalmakta; gerçek zamanlı veri toplama ve işleme yeteneği dağıtım bölgeleri arasında homojen değildir. Bu durum V2G uygulamalarında lokal aşırı yüklenme, voltaj dalgalanması ve koruma sistemlerinin tetiklenmesi gibi ciddi operasyonel riskler doğurmaktadır.

Uluslararası deneyimler, V2G’nin ancak gelişmiş SCADA sistemleri, dağıtık enerji kaynakları yönetim sistemleri (DERMS) ve dijital ikiz entegrasyonu ile güvenli biçimde ölçeklenebildiğini göstermektedir (IEA, 2024).

Türkiye’de bazı dağıtım şirketleri akıllı şebeke ve dijitalleşme odaklı pilot projeler

piyasa temelli uygulamalara dönüşmemiştir.

5.3. Genel Değerlendirme

V2G teknolojisi, yenilenebilir enerji düzensizliği ve artan şebeke karmaşıklığı karşısında mobil esneklik ve yedek güç sağlayan stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçları pasif tüketim unsurları olmaktan çıkararak akıllı şebekelerin dağıtık, dinamik ve mobil enerji depolama birimlerine dönüştürmektedir. Bu yönüyle V2G, iklim kriziyle mücadele, enerji arz güvenliği ve ekonomik verimlilik eksenlerinde şekillenen sistemik bir dönüşüm aracıdır.

Küresel deneyimler, V2G'nin tek tip bir model üzerinden değil, ülkelerin enerji piyasası olgunluğu ve stratejik önceliklerine göre farklılaşan yaklaşımlar üzerinden geliştiğini göstermektedir. ABD, öngörülebilir filo kullanımları üzerinden ekonomik fizibiliteyi kanıtlayan pragmatik bir yol izlerken; Çin, merkezi planlama gücüyle V2G'yi kentsel enerji güvenliği ve afet dayanıklılığı aracı olarak konumlandırmaktadır.

Avrupa Birliği ise süreci regülasyonlar, piyasa entegrasyonu ve tüketiciler hakları üzerinden kurumsallaştırmaktadır. Bu farklı modeller, V2G başarısının yalnızca teknolojik kapasiteye değil, doğru mevzuat mimarisi ve iş modeline bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye açısından tablo, yüksek potansiyel ile yapısal hazırlıksızlık arasında sıkışmıştır. Artan yenilenebilir enerji kapasitesi ve Togg öncülüğünde büyüyen elektrikli araç pazarı V2G için doğal bir zemin sunmaktadır. Ancak regülasyonun teknolojinin gerisinde kalması, bu potansiyelin atıl kalmasına yol açmaktadır.

Elektrikli araçların mevzuatta hâlen yalnızca tüketici olarak tanımlanması ve mobil depolama statüsünün bulunmaması, V2G'nin ticari olarak başlamasının önündeki temel bariyerdir. Buna ek olarak dağıtım şebekelerinin dijital olgunluk eksikliği, ölçeklenme riskini artırmaktadır. Türkiye için V2G, parçalı pilot projelerden ziyade ulusal ölçekte bir enerji verimliliği ve esneklik stratejisi olarak ele alınmalıdır.

Bu çerçevede araç bataryalarının mobil depolama varlığı olarak mevzuata dahil edilmesi, çift yönlü DC şarj altyapısının teşvik edilmesi ve ISO 15118 gibi V2G standartlarının ulusal ölçekte benimsenmesi kritik önemdedir. Bu dönüşümün başarılması halinde Türkiye, milyarlarca dolarlık sabit depolama yatırımı ihtiyacını azaltarak enerji arz güvenliğini mobil varlıklar üzerinden sağlayan yenilikçi bir model geliştirebilir



6. Yerel Enerji Optimizasyonu

yürütmektedir; ancak bu çalışmalar doğrudan V2G senaryolarını hedeflememekte, elektrikli araçları aktif şebeke varlığı olarak konumlandırmamaktadır. V2G'ye özgü senaryo modellemeleri, şebeke kodu güncellemeleri ve operasyonel prosedürler bulunmamaktadır. Bu nedenle teknik kapasite yetersizliği, regülasyon eksikliğiyle birleşerek V2G'nin sistem düzeyinde denenmesini dahi zorlaştırmaktadır.

iii. Batarya ömrü, ekonomik teşvikler ve kullanıcı davranışı

V2G'nin toplumsal kabulü açısından en kritik unsur, batarya aşınması ile ekonomik fayda arasındaki dengedir. Elektrikli araç bataryası, aracın en pahalı bileşeni olup kullanıcı açısından temel bir varlık riskidir. V2G kapsamında bataryanın daha sık şarj-deşarj döngüsüne girmesi, teorik olarak batarya ömrünü kısaltabilmektedir.

Bu risk kullanıcıya bırakıldığında gönüllü V2G katılımı ciddi biçimde düşmektedir (IEA, 2024). Türkiye'de bu riski dengeleyecek herhangi bir teşvik mekanizması bulunmamaktadır. Elektrikli araç sahiplerine V2G karşılığında garanti edilmiş bir gelir, batarya aşınma tazminatı veya özel tarife indirimini sunulmamaktadır. Bu nedenle rasyonel bir kullanıcı açısından V2G, getirisi belirsiz, riski ise net bir faaliyet olarak algılanmaktadır.

Avrupa'da bu sorun agregatörler ve esneklik piyasaları üzerinden çözülmekte; araç sahipleri şebekeyle doğrudan muhatap olmamakta, batarya kullanımı sözleşmelerle sınırlandırılmakta ve gelir paylaşımı yapılmaktadır. Türkiye'de ise agregatör yapısı henüz tanımlı değildir ve bu tür sözleşmesel mekanizmalar mevcut değildir.

Buna karşın Türkiye'nin önemli bir avantajı, Togg ve Siro (Togg - Farasis ortaklığı) etrafında şekillenen yerli araç ve batarya ekosistemidir. Togg'un yazılım odaklı mimarisi, V2G ve V2H fonksiyonlarını teknik olarak destekleyebilecek kapasiteye sahiptir. 2025 itibarıyla Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı desteğiyle bazı organize sanayi bölgelerinde mikro şebeke odaklı pilot V2G çalışmaları başlatılmış; Enerjisa gibi büyük aktörler elektrikli otobüs filolarının şebeke dengeleme aracı olarak kullanılmasına yönelik simülasyonlar yürütmüştür (Yeni Birlik, 2025). Ancak bu girişimler henüz ölçeklenmiş,

Yerel enerji optimizasyonu, enerjinin üretildiği noktada veya bu noktaya en yakın yerde (örneğin bir fabrikanın çatısı, konut siteleri veya yerel enerji toplulukları) tüketilmesini teşvik eden; böylece enerjinin uzun mesafelerden taşınması sırasında oluşan kayıpları ve ana şebeke üzerindeki yükü minimize etmeyi hedefleyen stratejik bir yaklaşımdır.

Bu sistemler, yerel mikro şebekeler ve enerji toplulukları aracılığıyla tüketicilerin aynı

zamanda aktif birer üreticiye dönüşmesini sağlayarak enerji bağımsızlığını artırmakta ve merkezi altyapı maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunmaktadır. Yerel enerji optimizasyonu, enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir.

2024 yılında küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 4.448 GW seviyesine ulaşırken; konut, ticari ve endüstriyel alanlardaki dağıtık uygulamalar toplam güneş enerjisi genişlemesinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır (UEA, 2024).

Bu dönüşüm süreci; mikro şebekeler, sanal güç santralleri, eşten eşe (P2P) enerji ticareti ve üretici modelleri gibi yenilikçi sistemler aracılığıyla şekillenmektedir.

Türkiye’de ise lisanssız elektrik üretimi düzenlemelerindeki güncellemeler, sayıları 46’ya ulaşan enerji kooperatifleri ve akıllı şehir projeleri ile yerel enerji optimizasyonuna yönelik stratejik adımlar atılmaktadır.

6.1. Küresel Durum ve Projeler

a. ABD

ABD, mikro şebeke teknolojilerini hem kırsal erişim hem de şebeke esnekliği açısından önceliklendirmektedir. ABD Enerji Bakanlığı (DoE), Microgrid Capital Cost Reduction programı kapsamında, 2031 yılına kadar mikro şebeke sermaye maliyetlerini yüzde 15 oranında azaltmayı ve proje devreye alma sürelerini %20 oranında kısaltmayı hedeflemektedir (U.S. Department of Energy, 2024).

Çatı güneş panelleri, elektrikli araçlar ve akıllı termostatlara gibi dağıtık kaynakların dijital bir platformda birleştirilmesiyle oluşturulan VPP’ler, ABD enerji piyasasında giderek daha fazla yer tutmaktadır. Brattle Group tarafından yapılan araştırmaya göre, 60 GW kapasiteli bir VPP kurulumu, geleneksel doğal gazlı pik santrallerine kıyasla %40-60 daha düşük maliyetlidir ve ABD’de yıllık şebeke maliyetlerinde 10 milyar dolar tasarruf potansiyeli sunmaktadır (The Brattle Group, 2024).

Ayrıca DoE verilerine göre, 400 MW’lık bir VPP’nin net maliyeti kW/yıl başına 43 dolar iken, eşdeğer bir gaz santralinin maliyeti 99 dolar seviyesindedir. Örneğin, zorlu coğrafi koşullara sahip Alaska’da 187’den fazla bağımsız mikro şebeke bulunmaktadır. Özellikle Kuzey Kutup Dairesi’ndeki Shungnak ve Kobuk projeleri, 225 kW güneş enerjisi ve 384 kWh batarya depolama kapasitesi entegrasyonu ile dikkat çekmektedir.

Bu sistemler, dizel jeneratörleri geçici olarak kapatabilme (diesel-off) yeteneğine sahiptir ve 450 sakin için yılda yaklaşık 200.000 dolar yakıt tasarrufu sağlamaktadır (National Renewable Energy Laboratory, 2024).

b. Çin

Çin, mikro şebeke uygulamalarını Karbon Nötr 2060 hedefleri doğrultusunda endüstriyel parklar ve limanlar gibi büyük tüketim noktalarına entegre etmektedir. Çin Sanayi ve Bilgi Teknolojileri Bakanlığı (MIIT), Ocak 2026'da yürürlüğe giren yeni yönergelerle, endüstriyel parklarda kurulacak yeni yenilenebilir enerji projelerinin, ürettikleri elektriğin en az yüzde 60'ını yerel olarak tüketmelerini zorunlu kılmıştır (Xinhua, 2026).

Suqian Akıllı Mikro Şebekesi kullanıcı tarafındaki en büyük mikro şebeke uygulamalarından biridir. 3400 metrekaarelik alana yayılan tesis; 5,15 MW fotovoltaiik (PV) kapasitesi, 20 MWh enerji depolama ünitesi ve Araçtan Şebekeye (V2G) uyumlu çift yönlü şarj istasyonları ile entegre bir yapı sunmaktadır (Xinhua, 2024).

Ayrıca, blokzinciri teknolojisi, Çin'deki dağıtık enerji ticaretinin temel altyapısını oluşturmaktadır. Bu teknoloji, şeffaflık ve akıllı sözleşmeler aracılığıyla enerjinin komşular arasında güvenli ticaretini mümkün kılmaktadır (Ahmad vd., 2022).

c. Avrupa Birliği

Avrupa, yerel enerji optimizasyonunu Enerji Toplulukları kavramı üzerinden, vatandaş katılımını esas alarak yürütmektedir. İngiltere'nin Oxfordshire bölgesindeki Hook Norton Projesi, topluluk ölçeğinde mikro şebeke uygulamasının başarılı bir örneğidir. 12 adet uygun fiyatlı konut, 100 kWh merkezi batarya ve 68 kWp çatı güneş paneli entegrasyonu ile ülkenin küçük ölçekli ilk akıllı mikro şebekesini oluşturmuştur.

Proje, sakinlere piyasa fiyatlarının altında enerji sağlamaktadır (Hook Norton Community Land Trust, 2024). Avrupa'nın en büyük VPP yapılarından biri olan Next Kraftwerke (Almanya), 2025 yılı itibarıyla 14375 bağlı varlık ve 15541 MW ağ kapasitesine ulaşmıştır. Bu sistem, binlerce küçük üreticiyi tek bir santral gibi yöneterek toptan elektrik piyasalarına erişim sağlamaktadır (Next Kraftwerke, 2025).

Avrupa merkezli akademik literatür, VPP'lerin türetici işletme maliyetlerini yaklaşık yüzde 31,2 oranında azaltabildiğini ve şebekedeki tepe-çukur yük farkını yüzde 30 oranında düşürebildiğini ortaya koymaktadır (Rodriguez-Garcia et al., 2025).

6.2. Türkiye'deki Mevcut Durum ve Uygulamalar

EPDK tarafından lisanssız elektrik üretimi yönetmeliğinde 14 Mayıs 2024 tarihinde yapılan değişikliklerle mesken aboneleri için 10 kW, işletmeler için ise 5 MW kapasite sınırları belirlenmiştir (EPDK, 2024). Mahsuplaşma sistemi, aylık bazda üretim-tüketim

dengelemesi sunarken; ihtiyaç fazlası üretim YEKDEM kapsamında 10 yıl boyunca satın alınmaktadır.

2024 yılı YEKDEM listesi, 778 santral ve 17624 MW kurulu güç kapasitesini kapsamaktadır. Türkiye’de toplam 46 adet enerji kooperatifi bulunmakta olup, mevcut güneş kapasitesi 20 MW düzeyindedir. 2033 yılı hedefi ise 200 kooperatif ve 500 MW kapasiteye ulaşmaktır.

Akademik düzeyde ise Gazi Teknopark’ta Başkent EDAŞ ve TÜBİTAK SEAS projesi kapsamında kurulan Türkiye’nin ilk akıllı mikro şebekesi, doğrusal programlama modelleriyle yıllık bazda ciddi enerji tasarrufu sağlamaktadır.

2024-2030 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı doğrultusunda İstanbul’da yürütülen Build4GreenIST projesi yapay zekâ destekli enerji yönetimi sunarken; İzmir’deki akıllı aydınlatma sistemleri yüzde 35 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

Donanım maliyetlerindeki düşüşe rağmen, projenin toplam maliyetini yukarı çeken yumuşak maliyetler kritik bir bariyerdir. İzin süreçleri, müşteri kazanımı ve ara bağlantı giderleri, özellikle küçük ölçekli projelerde toplam maliyetin yüzde 30’una varan bir paya sahiptir (NREL, 2020).

Ayrıca, mikro şebeke projeleri altyapı seviyesinde getiri sunarken girişim sermayesi seviyesinde risk taşıdığı için finansmana erişimde zorlanmaktadır; batarya depolama sistemlerinin geri dönüş süresi tepe yük tıraşlama senaryolarında 4,8 yıla kadar düşse de tam entegre sistemlerde bu süre uzamaktadır (NREL, 2024).

Mevcut şebekeler, dağıtık kaynakların çift yönlü güç akışını yönetecek kapasiteye sahip değildir. Avrupa’da veri merkezlerinin şebekeye bağlanma süresi yer yer 7-10 yılı bulurken, şebeke darboğazları yenilenebilir enerji kurulumlarını yavaşlatmaktadır (Ember, 2025).

Teknik açıdan, invertör tabanlı kaynakların artışı şebeke ataletini (inertia) zayıflatarak frekans kararlılığını tehdit etmektedir. Buna ek olarak, dijitalleşen enerji sistemleri siber saldırılara açık hale gelmiştir; bulut tabanlı kontrol sistemlerine yönelik siber tehditler, sistem güvenliğini riske atmaktadır.

Türkiye’de yerel enerji optimizasyonunun önündeki en büyük engel, fiziksel kapasite yetersizliğidir. TEİAŞ’ın 2025 yılı verilerine göre, birçok bölgede dağıtım seviyesinden lisanssız üretim için tahsis edilebilir kapasite sıfır noktasına inmiştir (TEİAŞ, 2025).

Mevzuat tarafında ise Mayıs 2024'te yapılan yönetmelik değişiklikleriyle mahsuplaşma süreçlerindeki belirsizlikler ve bürokratik bağlantı süreçleri yatırımcı iştahını baskılamaktadır.

6.3. Genel Değerlendirme

Yerel enerji optimizasyonu, enerji sistemlerinin merkeziyetçi yapıdan dağıtık ve esnek bir mimari model içinde dönüşümünün kritik bir bileşenidir. Küresel düzeyde mikro şebekeler, sanal güç santralleri ve üretici modelleri üzerinden yaşanan teknolojik ilerleme, yerel enerji sistemlerinin hem teknik açıdan olgunlaştığını hem de ticari açıdan rekabetçi hale geldiğini göstermektedir.

ABD'de VPP sistemlerinin geleneksel pik santrallerine göre yüzde 40-60 daha düşük maliyetle kurulabilmesi ve Avrupa'da Next Kraftwerke gibi yapıların 15 GW'ı aşan kapasiteye ulaşması, dağıtık sistemlerin ölçeklenebilirliğini somut verilerle ortaya koymaktadır. Çin'in endüstriyel parklarda yüzde 60 yerel tüketim zorunluluğu getirmesi ise bu dönüşümün düzenleyici düzeyde de desteklendiğini göstermektedir.

Yerel enerji optimizasyonu sistemlerinin küresel yaygınlığa ulaşması önünde kritik yapısal engeller bulunmaktadır. Yumuşak maliyet bileşenleri, özellikle küçük ölçekli projelerde donanım maliyetlerinin sağladığı düşüşü dengelemekte ve projelerin ekonomik fizibilitesini olumsuz etkilemektedir. Finansal açıdan, mikro şebekeler altyapı düzeyinde getiri sağlarken girişim sermayesi seviyesinde risk taşıdığı için yatırımcı çekmekte zorlanmaktadır. Teknik düzeyde ise invertör tabanlı kaynakların artışı şebeke ataletini azaltarak frekans kararlılığını tehdit etmekte; mevcut dağıtım şebekeleri çift yönlü güç akışını yönetecek yeterli kapasiteye sahip olmamaktadır. Avrupa'da veri merkezlerinin şebekeye bağlanma süresinin 7-10 yıla ulaşması ve şebeke darboğazlarının yenilenebilir enerji kurulumlarını yavaşlatması, altyapı modernizasyonunun aciliyetini vurgulamaktadır. Ayrıca, dijitalleşme ile birlikte artan siber güvenlik tehditleri, bulut tabanlı kontrol sistemlerinin güvenilirliğini sorgulanır hale getirmektedir.

Türkiye özelinde durum daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. 2024 yılındaki yönetmelik değişiklikleri kapasite sınırlarını artırmış olsa da, TEİAŞ verilerine göre birçok bölgede dağıtım seviyesinden tahsis edilebilir kapasite sıfır seviyesine inmiştir. Bu fiziksel altyapı darboğazı, düzenleyici açılımların pratikte hayata geçmesini engellemektedir. Mahsuplaşma sistemindeki belirsizlikler ve bürokratik bağlantı süreçleri yatırımcı

iştahını baskılarken, 46 kooperatif ve 20 MW mevcut kapasiteyle 2033'te hedeflenen 200 kooperatif ve 500 MW'lık hedefe ulaşılması oldukça iddialı görünmektedir.

Gelecek perspektifinde, yerel enerji optimizasyonunun başarısı üç temel eksen de belirlenecektir:

şebeke modernizasyonu ve akıllı altyapı yatırımlarının hızlandırılması. Özellikle gelişmekte olan pazarlarda, dağıtık kaynakların entegrasyonunu mümkün kılan dijital kontrol sistemleri ve esnek şebeke teknolojileri olmaksızın kapasite artışı sürdürülebilir olmayacaktır.

Hibrit santral modelleri ve depolamalı üretim sistemlerinin yaygınlaştırılması. Bu modeller hem şebeke darboğazlarını aşmaya hem de invertör tabanlı kaynakların atalet problemine çözüm sunmaya yardımcı olabilir.

Düzenleyici belirsizliklerin giderilmesi ve yumuşak maliyetlerin azaltılması. İzin süreçlerinin standartlaştırılması, ara bağlantı prosedürlerinin basitleştirilmesi ve mahsuplaşma mekanizmalarının netleştirilmesi, yatırımların önünü açacak kritik adımlardır.

Sonuç olarak, yerel enerji optimizasyonu teknolojik olarak olgunlaşmış ve ekonomik olarak rekabetçi hale gelmiş olsa da, altyapı, düzenleme ve finansman bariyerleri bu sistemlerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefine ulaşabilmesi için bu engellerin sistematik bir şekilde ele alınması ve yerel enerji ekosisteminin merkezi planlamanın bir parçası olarak konumlandırılması gerekmektedir.



7. Sonuç

Enerji sistemleri artık sadece üretim kapasitesiyle değil, bu kapasiteyi gerçek zamanlı yöneten dijital zekâ ile de rekabet etmektedir. Şebekeye entegre edilen yenilenebilir kaynaklar, elektrikli araçlar, depolama üniteleri ve veri merkezleri enerji akışını daha değişken ve karmaşık hale getirmektedir.

Bu karmaşıklığı yönetebilme gücü yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), dijital ikizler ve ileri şebeke yazılımları gibi teknolojilerin ölçekli biçimde uygulanmasına bağlıdır. Bu nedenle enerji dijitalleşmesi, ülkelerin enerji güvenliği, maliyet kontrolü ve dönüşüm hızını belirleyen stratejik bir kapasite göstergesine dönüşmüştür.

Küresel ölçekte yatırım rakamları incelendiğinde Çin'in mutlak üstünlüğü dikkat çekmektedir. Çin Devlet Şebeke Kurumu (SGCC), sadece 2025 yılı için 93,2 milyar dolarlık rekor bir yatırım hacmi açıklamıştır.

Çin'in 14. Beş Yıllık Planı (2021-2025) kapsamında şebeke modernizasyonu için ayrılan 442 milyar dolarlık kaynak, yerini 2026-2030 dönemini kapsayan 15. Beş Yıllık Plan'a bırakmaktadır. Bu yeni dönemde yatırım miktarının yüzde 40 artışla 574 milyar dolara yükselmesi öngörülmektedir. Avrupa Birliği ise 2030 yılına kadar şebeke yatırımları için 584 milyar euro taahhüt etmiş olup bunun 170 milyar euro tutarındaki kısmı doğrudan akıllı sayaçlar ve dijital şebeke yönetimine ayrılmıştır.

ABD tarafında ise federal programlar aracılığıyla 2030 yılına kadar toplam 83 milyar dolarlık bir yatırım teşvik edilmektedir. Şebeke Dayanıklılığı ve İnovasyon Ortaklıkları (GRIP) programı beş yıl için 10,5 milyar dolar tahsis etmiş ve 2025 sonu itibarıyla bu kaynağın büyük bölümü 50 eyaletteki projelere aktarılmıştır.

Türkiye'nin bu alandaki yatırımları ise küresel devlerle kıyaslandığında oldukça mütevazı kalmaktadır. Yıllık yaklaşık 1-2 milyar dolarlık dijitalleşme yatırımı, Çin'in yıllık harcamasının kabaca 88 kat daha küçüğüdür. Ancak Ağustos 2025 tarihinde Dünya Bankası tarafından TEİAŞ'ın şebeke dönüşüm projesi için onaylanan 625 milyon euro tutarındaki kredi, Türkiye'nin bu alandaki en somut ve büyük ölçekli yakın dönem adımıdır.

Türkiye, genel gecikmeye rağmen enerji verimliliğinde dünya lideri seviyesinde bir performans sergilemiştir. 2022 yılında elde edilen yüzde 6,2'lik enerji yoğunluğu azaltımı, küresel ortalamanın üç katıdır. Yenilenebilir enerji kapasitesinin kurulu güçteki payının yüzde 56'ya ulaşması, Türkiye'yi Avrupa'da 5. sıraya taşımıştır. Ayrıca yerli üretim kapasitesinde çeşitli şirketlerin aylık 400 bin adet akıllı sayaç üretim hacmi ve batarya üretiminde son yıllarda artan yatırımlar önemli avantajlardır.

Ancak bu güçlü yönlerin dijital bir üst yapı ile birleştirilmesi noktasında altı temel teknoloji alanında eksiklikler sürmektedir:

- Şebeke yatırımlarında Çin ile aradaki 88 katlık fark, fiziksel altyapının dijital yükü taşımasını zorlaştırmaktadır.

- Akıllı sayaç penetrasyonundaki 80 puanlık fark, talep tarafı yönetimini engellemektedir.

- STEM mezunları arasındaki yüzde 9,6'ya varan beyin göçü, dijital dönüşümü yönetecek insan kaynağını eritmektedir.

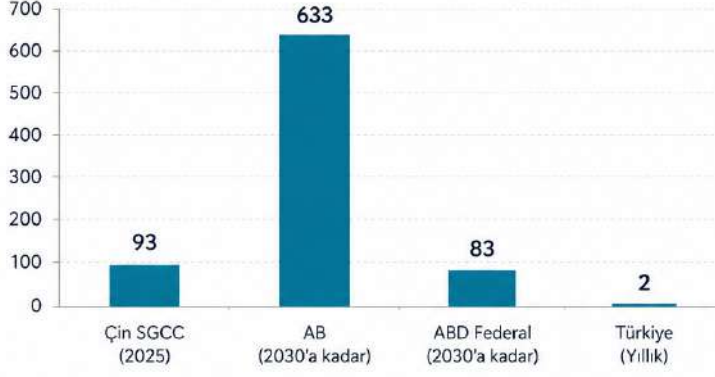
Karşılaştırmalı analiz, enerjide dijitalleşme alanlarında Türkiye ile küresel liderler arasında genişleyen bir teknoloji açığını ortaya koymaktadır. Çin'in sadece şebeke altyapısı için yıllık 90 milyar dolara yaklaşan yatırım ölçeği, Türkiye'nin milyar dolarlık mobilizasyon çabalarından temelde farklı bir stratejik taahhüdü temsil etmektedir. Bununla birlikte, Türkiye'nin enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji dağıtımındaki başarıları, düzenleyici çerçeveler ve yatırımlar uyumlu hale getirildiğinde hızlı iyileşme kapasitesini göstermektedir.

Türkiye için üç stratejik öncelik ortaya çıkmaktadır. Birincisi, akıllı sayaç dağıtımının zorunlu zaman çizelgeleriyle hızlandırılması, on yıl içinde 60-80 puanlık penetrasyon açığını kapatabilir. İkincisi, bekleyen YZ yasasının enerjiye özgü hükümlerle yasalaştırılması, özel yatırımı engelleyen düzenleyici boşluğu giderecektir. Üçüncüsü, ABD'nin GRIP programına benzer özel bir şebeke dijitalleştirme fonunun kurulması, AB rekabetçiliğine yaklaşmak için gereken 10 katlık yatırım artışını tetikleyebilir.

Şekil 10: Karşılaştırmalı Analiz

Küresel Yapay Zekâ Pazar Büyüklüğü

(Milyar \$)



Kritik Farklar

Çin vs Türkiye	88x	yatırım farkı
AB DI Bütçesi	170 Milyar€	dijitalleşmeye ayrılmış
ABD GRIP	10.5 Milyar\$	5 yılda 50 eyalet
DB TEİAŞ Kredisi	625M€	TR'nin en büyük adımı

6 Teknoloji Alanında Açık

Teknoloji	Küresel Lider	Türkiye	Fark
YZ Benimseme	%65 (Küresel GenAI)	%7.5	~57 puan
Akıllı Sayaç	%98.6 (Çin)	<%20	~80 puan
V2G	30 pilot (Çin)	Kavramsal	Başlangıç
Dijital İkiz	TwinEU 25M€	Pilot	Büyük açık

Kaynak: McKinsey, BloombergNEF, IEA, Dünya Bankası, Kurum Raporları

Kaynakça

- ABB. (2024). Control systems and device connectivity platform.
- Ahmad, A., vd. (2022). Blockchain technology for distributed energy trading.
- Al-Shetwi, A. (2025). Integration of digital twins within smart grid infrastructure.
- Anadolu Ajansı. (2025). Akıllı sayaç sistemlerinin yaygınlaştırılmasına ve kullanımına ilişkin usul ve esaslar.
- ANS Nuclear Newswire. (2024a). Amazon Web Services buys Talen Energy Cumulus data center campus.
- ANS Nuclear Newswire. (2024b). X-energy Amazon-led 500 million Series C-1 round.
- Appinventiv. (2025). Digital twins in the energy sector.
- Argonne National Laboratory. (2025). AI-supported predictive maintenance for solar reliability: Cost reduction analysis. U.S. Department of Energy.
- Asao, K., vd. (2025). The impact of aging and AI on Japan labor market: Challenges and opportunities. International Monetary Fund.
- ASIS International. (2024). Cybersecurity vulnerabilities in IoT energy applications.
- Autoweek. (2024). BMW, Ford, Honda, and Nissan launch ChargeScape virtual power plant joint venture.
- Avrupa Komisyonu. (2019). Clean energy for all Europeans package.
- Avrupa Komisyonu. (2024). EU action plan on digitalising the energy system.
- Avrupa Komisyonu. (2025a). Carbon border adjustment mechanism: Full operational phase and transition reporting.
- Avrupa Komisyonu. (2025b). EU methane regulation for the energy sector: Monitoring, reporting, and verification.
- Avrupa Parlamentosu. (2025). EU AI Act: First regulation on artificial intelligence.
- Balkan Green Energy News. (2023). Turkey to invest 4.3 billion euros in smart meters by 2035.
- BCG. (2018). Managing the silver tsunami: Institutional knowledge transfer.

Berk Insight. (2024). Smart metering in Europe.

Bird & Bird. (2025). German Bundestag passes German NIS-2 implementation act: Cybersecurity in energy.

Bloomberg. (2021). Sinopec plans to spend 4.6 billion on hydrogen energy by 2025.

Bloomberg. (2025). State Grid China vows record 90 billion investment to back clean energy.

BloombergNEF. (2024). Electric vehicle outlook 2024.

BloombergNEF. (2025). Energy transition investment trends 2025.

Business Wire. (2025). Nuvve acquires Fermata Energy assets to strengthen V2G position.

BYD. (2023). Commercial fleet V2G implementation and battery optimization.

Caixin Global. (2020). Sinopec capital sets up fund to back hydrogen energy supply chain.

Capgemini. (2024). The state of generative AI in energy and utilities 2024 survey.

Centre for Emerging Technology and Security. (2024). China quest for semiconductor self-sufficiency.

Centrica. (2024). Centrica acquires owner of leading digital platform ignition ENSEK acquisition.

Chiang, H. (2024). China three-way recipe for semiconductor autonomy and global industry impact.

China Daily. (2024). State Grid investment hits record 600 billion yuan to boost renewable integration.

China Energy News. (2024). V2G applications and urban charging infrastructure in Shanghai.

Climate Power. (2025). New report: More than 400000 new clean energy jobs created since IRA passage.

CNBC. (2024). Tech giants like Microsoft, Amazon, Google, and Meta invest heavily in nuclear energy for AI.

CRI Online. (2025). State Grid AI Guangming Model wins top honor at World AI conference.

Crunchbase News. (2024). AI and energy startups secure major funding rounds in Q4.

Cumhurbaşkanlığı. (2025). Türkiye-Güney Kore ortak bildirisi: Bir kardeşlik mirası, gelecek için bir vizyon.

Data Center Frontier. (2024). Amazon invests in X-energy, targeting 5 GW of new power projects.

Deloitte. (2025). Renewable energy industry outlook 2025.

Digitopia. (2024). Türkiye dijital olgunluk raporu 2024.

Dijital İşbirliği Örgütü. (2025). Digital economy trends 2025: Sustainable intelligent ecosystems.

Duke Energy. (2024). Smart grid investments and operational efficiency.

Dünya Ekonomik Forumu. (2025a). Future of jobs report 2025.

Dünya Ekonomik Forumu. (2025b). The top 5 energy technology trends of 2025.

Dünya Enerji Konseyi. (2025). DeepMind ve Google rüzgar santrallerinin enerji üretimini tahmin etmek için AI kullanıyor.

Ebrahimi, M., vd. (2025). The integration of digital twins within smart grid infrastructure.

E.DSO. (2024). TwinEU project overview: Digital twins for European grids.

Ekonomist. (2022). Tüpraş rafinerilerinde robotik dönüşüm: Spot sahada.

Ember. (2025). European grid bottlenecks and renewable energy deployment.

Enerjisa Enerji. (2025). 2024 yılı faaliyet raporu: Enerjide dijital dönüşüm ve yapay zeka.

Enlit World. (2024). Capgemini report on generative AI adoption in energy.

Enlit World. (2025). TwinEU to create European electricity grid digital twin.

ENTSO-E. (2025). Workforce challenges and digital transformation in the European energy sector.

EPDK. (2023). Elektrik piyasası ölçüm sistemleri yönetmeliği.

EPDK. (2024). Lisanssız elektrik üretimi yönetmeliği değişiklikleri.

Equinor. (2024). Strategic investments in energy technology startups.

FERC. (2020). Order 2222: Participation of distributed energy resource aggregations in markets.

Fortune Business Insights. (2025). Internet of Things IoT market size, share, industry analysis.

Fortune Türkiye. (2024). Tüpraş WEF Küresel Deniz Feneri Ağına seçildi.

Fraunhofer. (2025). Digital twin federation and interoperability in TwinEU.

Gazete Anadolu. (2024). Başkent EDAŞ akıllı şebeke ve OSOS yatırımları.

Gazete Anadolu. (2025). Siemens Türkiye dijital ikiz teknolojileri ve emisyon azaltım projeleri.

GE. (2015). Digital wind farm overview.

Global Policy Watch. (2021). China 14th five-year plan: Spotlight on semiconductors.

GM Insights. (2025a). Digital twin market size and growth forecast 2024-2034.

GM Insights. (2025b). Vehicle-to-grid V2G market size and trends.

Google. (2024). Google and Kairos Power sign the world first corporate agreement to purchase energy from SMRs.

Gridspertise. (2024). Edge computing solutions for smart meters.

Growth Market Reports. (2025). Digital twin power plant market analysis.

Gündem Enerji. (2025). Enerji sektöründe siber güvenlik yetkinlik modeli güncellemeleri.

HBR. (2015). How digital twins are transforming wind energy.

Hepta Insights. (2025). Case study: AI-driven drone inspections for power grid reliability in Estonia.

Hook Norton Community Land Trust. (2024). Community microgrid project overview.

Huawei. (2024). Huawei launches its innovative intelligent VPP and SmartDC solutions.

Huawei Central. (2024). Huawei invests more in Hubble subsidiary to meet AI chips demand.

Huawei Digital Power. (2024). Bidirectional DC fast charging and V2G solutions.

Huawei Enterprise. (2024). Smart grid solutions and IoT architecture.

Hunt, A. (2025). US nuclear capacity expansion strategy.

Iberdrola. (2024). Iberdrola becomes first company worldwide to obtain ISO IEC 42001 AI management system certification.

Infosys. (2024). Generative AI in the energy sector: Optimization and forecasting.

IRENA. (2024). Local energy optimization and transmission loss reduction.

ISC2. (2024). Security vulnerabilities in energy sector digital twins.

Japan Times. (2025). Japan demographic shift: Elderly population reaches new records.

Laoyaoba. (2021). Third-generation semiconductor listed as one of China top priorities.

Latief, A. (2024). Smart energy acquisitions in the European utility sector.

Lew, M. (2024). Huawei investment strategies in semiconductors.

Market.us. (2025). Global digital twins in power market size, share analysis report.

Markets and Data. (2023). Smart grid market outlook and projections.

Matribcg. (2024). State Grid Corporation of China smart meter deployment.

McKinsey & Company. (2020). The future of work is now: Employee preferences and mission-driven work.

McKinsey & Company. (2025a). McKinsey technology trends outlook 2025.

McKinsey & Company. (2025b). The state of AI in 2025: Generative AI breakout year.

Mordor Intelligence. (2024). Advanced metering infrastructure market size.

MultiState. (2025). State-level legislation supporting SMR development in the US.

National Renewable Energy Laboratory. (2024). Alaska microgrid implementations.

NEA. (2024). Energy law of the People Republic of China.

NETA World Journal. (2025). Reframing the energy workforce crisis: A call to action.

Netaş. (2024). NEOS OSOS platform solutions for electricity distribution.

Next Kraftwerke. (2025). Virtual power plant capacity and operations.

NRC. (2025). Standard design approval for NuScale 77 MWe SMR design.

NREL. (2020). Microgrid soft costs analysis.

NREL. (2023). Digital twin and AI: Control room of the future.

NREL. (2024). Financial analysis of battery storage and microgrids.

NREL. (2025). Generative artificial intelligence for the power grid: Simulation and synthetic data.

NREL News. (2023). Autonomous control systems for future energy grids.

OECD. (2025a). Economic and environmental impacts of the EU carbon border adjustment mechanism.

OECD. (2025b). OECD economic surveys: Türkiye 2025.

Oxford Insights. (2024). Government AI readiness index 2024.

PA Turkey. (2025). Turkey position in global AI readiness indexes.

Pan, C. (2022). Tencent joins open-source chip design community RISC-V to mitigate sanctions.

PR Newswire. (2024). National Grid Partners hits 450 million investment milestone in AI and energy transition.

Precedence Research. (2025). Global IoT in energy market size and forecast.

Reuters. (2021). Cummins and Sinopec form green hydrogen joint venture.

Rodriguez-Garcia, M., vd. (2025). Virtual power plants and prosumer cost reduction analysis.

ScienceDirect. (2025). Digital twins in solar power generation and grid integration.

SGCC. (2019). White paper on ubiquitous power internet of things construction.

SGCC. (2023). V2G pilot projects and peak load management in Beijing.

SGCC. (2024). Grid Mind: Data-driven autonomous control framework for power systems.

Siemens. (2024). MindSphere IoT operating system capabilities.

Siemens. (2025). Infrastructure transition monitor 2025: AI to power the next phase

of clean energy.

Sleiti, A., vd. (2022). Modernization challenges for digital twin integration in legacy energy grids.

Smart Energy International. (2023). IoT smart meter deployment in India.

Smart Energy International. (2024). E.ON digital twin transformation with envelio.

Softeq. (2025). Digital twin implementation at Topaz Solar Farm.

SolarQuarter. (2024). BP, Shell, TotalEnergies, and Equinor commit 500 million for energy access.

Stanford University. (2025). Artificial intelligence index report 2025.

State Grid Corporation of China. (2023). Energy crisis management and V2G deployment in Sichuan.

Sustainability Magazine. (2024). Big oil 500m commitment to global energy access.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). Ulusal akıllı şehirler stratejisi ve eylem planı.

Technavio. (2024). Siemens Gamesa digital twin implementation in Denmark.

TEİAŞ. (2024). İletim şebekesi planlama ve akıllı modelleme araçları.

TEİAŞ. (2025). Tahsis edilebilir lisanssız üretim kapasite verileri.

TenneT. (2024). Integrated annual report 2024: Powering the transition.

The Brattle Group. (2024). Real reliability: The value of virtual power plants.

Toobler. (2025). Data management challenges in digital twin infrastructure.

Tortoise Media. (2024). The global AI index 2024.

TrendForce. (2025). Huawei Hubble invested in AI and software start-ups.

TÜBİTAK. (2023). TÜBİTAK yapay zeka ekosistemine imzasını atıyor.

TÜBİTAK Bilim Genç. (2025). Dijital ikiz teknolojisinin doğuşu ve enerji sektöründeki yeri.

TÜİK. (2024). Yükseköğretim beyin göçü istatistikleri 2023.

Tüpraş. (2024). Dijital dönüşüm ve verimlilik raporu.

Turkish Minute. (2024). Stanford university AI talent rankings analysis for Turkey.

TwinEU. (2024). Pan-European digital twin project framework.

UEA. (2023). Unlocking smart grid opportunities in emerging markets.

UEA. (2024). Renewables 2024: Analysis and forecast.

UEA. (2025a). Energy and AI: A strategic review.

UEA. (2025b). Global energy review 2025.

UEA. (2025c). The path to a new era for nuclear energy.

UEA. (2025d). World energy employment report 2025.

UEA. (2025e). World energy outlook 2025.

UNDP. (2024). EBRD, UNDP, and Enerjisa Enerji announce initiative to promote green skills.

UNDP Türkiye. (2024). Türkiye enerji iş gücünde yeşil ve dijital beceriler: İkiz dönüşüm rehberi.

UNFCCC. (2024). Turkey report on emission reduction projections for the cement sector.

UnoiaTech. (2025). AI agents in energy: Load forecasting and grid stability analysis.

U.S. Department of Energy. (2023). Bidirectional charging and V2G technical requirements.

U.S. Department of Energy. (2024). Microgrid capital cost reduction program.

Utility Dive. (2025). Constellation Energy and Microsoft PPA for the restart of Three Mile Island Unit 1.

Vermot-Desroches, G. (2025). Schneider electric: Upskilling 1 million youth by 2025.

White House. (2025). Executive order on unleashing American energy.

Wind Power Engineering. (2019). GE digital wind farm data and performance analysis.

Xinhua. (2019). State grid ubiquitous power internet of things vision.

Xinhua. (2022). Sichuan power grid uses EVs for emergency backup.

Xinhua. (2023). Sinopec green hydrogen plant in Inner Mongolia starts operation.

Xinhua. (2024). Suqian smart microgrid and V2G integration.

Xinhua. (2026). MIIT guidelines for renewable energy consumption in industrial parks.

Yang, L., vd. (2025). China energy transition review 2025.

Yeni Birlik. (2025). Enerjisa ve Togg V2G pilot uygulamaları.

Zorlu Enerji. (2024). Yenilenebilir enerji santrallerinde kestirimci bakım ve dijital ikiz uygulamaları.



Enerjide Dijitalleşme Derneği

İnönü Mah. 1748. Sok. No. 1
Yenimahalle / Ankara
www.edider.org

Görüş ve önerileriniz için info@edider.org
adresi üzerinden iletişime geçebilirsiniz.