

ENERJİ DEPOLAMA YAZI DİZİSİ-4

ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ: KONFIGÜRASYON, PİYASA, İNOVASYON, YAPAY ZEKA VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Gözde DEMİRSOY - Elektrik Elektronik Mühendisi & Enerji Sistemleri Yüksek Mühendisi

gozde.demirsoy@gmail.com

Enerji depolama yazı dizimizin son bölümünde, enerji depolama sistemlerinin konfigürasyonundaki teknoloji seçimi, küresel ve Türkiye pazar dinamikleri, inovasyon trendleri, yapay zeka uygulamaları ve sürdürülebilirlik temaları ele alınmıştır. Bu perspektiflerle enerji depolama teknolojileri bütüncül bir yapıda sunulmuş olup depolama sektörünün teknik, ekonomik, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik odaklı dönüşüm dinamikleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

1. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİSİ SEÇİMİNDE BÜTÜNCÜL YAKLAŞIM

Enerji depolama teknolojisinin seçimi; sadece kapasite ve ilk yatırım maliyeti (CAPEX) gibi klasik mühendislik parametreleriyle değil; teknik performans (çevrim verimi/ömrü, tepki süresi, şarj/deşarj hızı, çalışma sıcaklığı gibi), ekonomik göstergeler (LCOS, OPEX vb.), çevresel etkiler, güvenlik profili ve yasal çerçeve gibi çok boyutlu kriterlerin bir arada değerlendirilmesiyle yapılmalıdır. Seçilecek teknolojinin yüksek çevrim verimi, enerji yoğunluğu ile şarj/deşarj verimi, düşük kendi kendinedeşarj oranı, uzun ömür ve düşük yaşam döngüsü maliyeti sunması esastır [1-2].

Karar alma süreçlerinde, depolama sisteminin sağlayacağı hizmet türü (pik yönetimi, frekans kontrolü vb.) ile şebeke koşullarının bütüncül analizi kritik öneme sahiptir. Enerji depolama yatırımları yalnızca kısa vadeli teknik çözümler değil, uzun vadeli enerji dönüşümü, arz güvenliği ve sürdürülebilirlik hedefleri için stratejik altyapı unsurları olarak konumlandırılmalıdır.

2. KÜRESEL ENERJİ DEPOLAMA GÖRÜNÜMÜ

2.1. Kurulu Kapasite ve Pazar Dinamikleri

Küresel kümülatif enerji depolama sektörü, 2023 itibarıyla yaklaşık 200 GW kurulu güç ve 800 GWh toplam enerji kapasitesine ulaşmıştır. Tarihsel olarak 1990'lara kadar pompaj depolamalı hidroelektrik santraller (PDHES) hakimken 2010 sonrası dönemde lityum-iyon bataryalar yeni ek kapasitenin ana sürükleyicisi olmuştur [3].

Coğrafi dağılımda belirgin bir kutuplaşma mevcuttur; pazar Çin, ABD ve Avrupa ekseninde yoğunlaşmıştır [3]. 2024 yılında küresel pazara 175,4 GWh ek kapasite eklenmiş olup 2025 yılında bu kapasitenin %26,5 artışla 221,9 GWh seviyesine ulaşması beklenmektedir [4,5]. Bununla birlikte, 2024'te gerçekleştirilen COP29'da da yapılan açıklamada küresel depolama kapasitesinin 2030'a kadar 1.500 GW'a çıkacağı ifade edilmiş ki bu seviye 2022 değerlerinin altı katından fazlasına karşılık gelmektedir.

2.2. Uygulama Alanları ve Teknolojik İş Bölümü

Depolama kurulumları, altyapı destek hizmetlerinden ziyade aktif piyasa mekanizmaları tarafından şekillenmektedir. ~170 GW ve ~60 GW seviyelerindeki toptan elektrik piyasaları (arbitraj) ve yan hizmetler (frekans regülasyonu, kara başlatma (black start), tedekleme vb.) pazarı domine ederken, 1.4 GW seviyelerinde kalan iletim ve dağıtım seviyesindeki uygulamalar ise pazarda daha marjinal kalmıştır [3].

Teknolojik dağılımda net bir iş bölümü görülmektedir [3]:

- **Pompaj HES ve Mekanik Sistemler:** Yüksek kapasite ve atalet gerektiren toptan elektrik piyasaları ve yan hizmetler gibi alanları domine etmektedir.

- **Lityum-İyon Bataryalar:** Modüler yapıları sayesinde şebeke kısıt ve tıkanıklık yönetimi ile dağıtım seviyesindeki güvenilirlik alanlarında birincil çözümdür.

- **Akışkan Bataryalar ve Termal Depolama:** Uzun süreli enerji sağlama yetenekleriyle, dağıtım seviyesindeki güvenilirlik uygulamalarında stratejik alternatifler sunmaktadır.

2.3. Bölgesel Pazar Eğilimleri

Küresel enerji depolama pazarı, bölgelere göre değişen büyüme hızları ve yatırım eğilimleriyle farklılaşan dinamik bir görünüm sergilemektedir.

- **Avrupa:** 2024'te 19,1 GWh'lık yeni enerji depolama kapasitesi ile %12,4 büyüyen pazarın, 2025'te %41 artışla 27 GWh yeni kapasite eklemesi öngörülmektedir. İtalya, Almanya ve İngiltere pazarın liderleridir. Aynı yıl Avrupa enerji depolama pazarında ilk kez sayaç önü (FTM) ve sayaç arkası (BTM) pazarlarının kurulum kapasiteleri eşitlenmiş ve büyüme motoru kademeli olarak BTM'den FTM pazarlarına doğru kaymıştır[4].

- **Amerika Kıtası:** 2024'te 41,3 GWh yeni kurulu kapasite ekleyerek %53 büyüyen pazarda ABD (özellikle Kaliforniya ve Teksas) ve Şili başı çekmektedir. ABD'de ortalama depolama süresi 3 saatin üzerine çıkmıştır. ABD ve Şili depolama pazarları FTM projeleri tarafından yönlendirilmektedir. 2025 yılında ABD'nin yıllık kapasite artışının %20'nin üzerinde kalacağı, Şili'nin 3 GWh'nin üzerinde yeni kapasite eklemesi beklenmektedir [4].

- **Orta Doğu ve Afrika:** 2024 yılı itibarıyla bölgenin toplam kurulu kapasitesi 2,7 GWh seviyesine ulaşmıştır. 2025 yılında %381 gibi rekor bir artışla 13 GWh seviyesine ulaşması beklenen bölgede, Suudi Arabistan ve BAE projeleri öne çıkmaktadır [4].

2.4. Teknoloji Bazında Maliyet Eğilimleri (LCOS)

Statista'nın verileri, kum ısı depolamanın 4-10 USD/kWh ile en düşük maliyetli teknoloji oldu-

ğunu, CAES'in maksimum 300 USD/kWh 'da olduğunu, pompaj hidro depolamanın ise yaklaşık 60 USD/kWh seviyesinde daha rekabetçi bir maliyet profili sunduğunu göstermektedir. Batarya depolama maliyetleri ise son on yılda %84 düşüş göstermiştir olup 100-150 USD/kWh bandındadır [6-7]. 2023 ve 2030 LCOS (Düzgünleştirilmiş Depolama Maliyeti) projeksiyonlarına göre [8]:

- Kısa süreli uygulamalarda Lityum-iyon (LFP) bataryalar maliyet avantajını korumaktadır.

- 100 saat üzeri uzun süreli depolamalarda (LDES) ise Hidrojen ile Pompaj HES ve CAES (Sıkıştırılmış Hava) gibi mekanik depolama çözümleri ekonomik üstünlüğe sahiptir.

- DOE'nin "Long Duration Storage Shot" hedefleri doğrultusunda, 10 saat ve üzeri süre depolama sağlayabilen teknoloji maliyetlerinin 2030'a kadar %90 düşürülmesi amaçlanmaktadır.

2.5. Teknolojik Gelişmeler ve İnovasyonlar

Sektör, sadece maliyet düşüşüne değil, malzeme çeşitliliğine de odaklanmaktadır:

- **Sodyum-İyon Bataryalar:** Lityum rezervlerine alternatif olarak yükselen bu teknolojiye Çin liderdir. 2034'e kadar pazarın yıllık %45 büyümesi beklenmektedir. [9,10] Çinli pil üreticisi CATL firması elektrikli araçlar için daha hızlı şarj olan ve daha uzun menzil giden sodyum-iyon bataryaları piyasaya sürmüştür.

- **Katı Hal Bataryalar:** Toyota ve BMW gibi devler, 1.000 km menzil sunan ve güvenliği artıran bu teknolojiye yatırım yapmaktadır. Theion (Almanya) şirketi, elektrikli araçlar ve havacılık için katı hal kükürt pilleri geliştirmektedir.

- **Redoks akışlı piller:** XL Batteries (ABD) firması, maliyetleri düşürmek için tuzlu su bazlı akış pilleri üretmektedir [11].

- **PDHES:** Bir Texas girişimi, eski petrol kuyularını PDHES için yeniden kullanmaktadır. İtalya merkezli Sizable Energy, okyanus derinliğini kullanarak yenilikçi bir pompajlı hidroelektrik depolama sistemi geliştirmiş ve 8 milyon dolarlık yatırım almıştır. Bununla birlikte PDHES sistemlerinin artık yalnızca yeni yapım değil "yenileme / retro fit" düzeyinde de kullanıl-

maktadır; özellikle terk edilmiş madenler, yer altı mekanları, eski hidro santraller PDHES'e dönüştürülmektedir [37 12].

- **CAES:** Çin Jintan Tuz Mağarası Projesi kapsamında 700 MW gücünde ve 2.8 GWh depolama kapasitesine sahip dünyanın en büyük basınçlı hava enerji depolama (CAES) tesisini inşa etmektedir [13].
- **Hidrojen:** GRZ Technologies (İsviçre) katı hal hidrojen depolama sistemleri üretmektedir. Toyota ve BMW'nin hidrojen yakıt hücreli otomobiller için projeleri bulunmaktadır.
- **Çimento ve Beton Tabanlı Uygulamalar:** Bilim insanları, betonun ve çimentonun enerji depolama aracı olarak kullanılabileceği yeni yaklaşımlar geliştirmiştir. Shewanella oneidensis bakterileriyle elektroaktif bir ağ oluşturarak betonu biyohibrid bir süperkapasitöre dönüştürmüştür. Çimento tabanlı uygulamalarda ise karbon fiber takviyeli anot-katot mimarisiyle metrekarede yaklaşık 7 Wh düzeyinde enerji yoğunluğuna ulaşılmaktadır [14,15].
- **Taşıttan şebekeye (Vehicle to Grid (V2G)) sistemler:** V2G uygulaması, yalnızca elektrikli taşıtta uygulanan, temel olarak araçtan dağıtım şebekesine direkt olarak güç akışı sağlanan bir sistemdir. V2G sistemine sahip elektrikli araçlar, yenilenebilir kaynaklar için yedekleme kaynağı sunmaktadırlar. Bu özellikler, frekans ve gerilimin kontrolü, döner yedek dahil olmak üzere yardımcı servisler sağlayabilir [16]. ABD'de SCE ve PG&E'nin BMW işbirliğiyle yürüttüğü pilot şarj-zamanlama programları ile Avrupa'da MyWheels-Renault ortaklığının iki yönlü şarj entegrasyon projesi, hem farklı ülkelerde V2G uygulamalarının sahada test edildiğini hem de Audi, Volkswagen, Hyundai ve Nissan gibi üreticilerin çift yönlü şarj donanımını araç platformlarına entegre ederek teknolojiyi ticarileştirmeye yönelik Ar-Ge çalışmalarını hızlandırdığını göstermektedir.
- **Hibrit enerji depolama sistemleri:** Farklı enerji depolama teknolojilerinin birlikte ve birbirini tamamlayacak biçimde kullanılması, tekil sistemlerin yetersiz kaldığı durumlarda performans ve esneklik artışı sağlayan hibrit enerji depolama sistemleri (HESS) yakla-

sımı olarak tanımlanmaktadır. Almanya'da 20 MW hibrit ısı-batarya sistemi, İngiltere'de RedT'nin li-ion/vanadyum akış batarya kombinasyonu, ABD'de Duke Energy'nin ultrakapasitör-batarya hibriti ve ulusal çaplı EES entegrasyon modeli gibi farklı ülke uygulamaları, çoklu depolama teknolojilerinin birlikte kullanıldığında şebeke esnekliği, güvenirliliği ve arz sürekliliğini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir [17].

- **Organik pil:** Bilim insanlarının su bazlı elektrolitler ve pedot polimerleriyle geliştirdiği tamamen organik, düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir batarya yapısı, vanadyum redoks akış pillerine kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olsa da yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjiyi güvenli ve ekonomik biçimde depolayabilmesi sayesinde elektrikli araçlardan şebeke ölçeğine kadar geniş bir kullanım potansiyeli sunmaktadır [18].
- **Bazalt çakıl taşlarında depolama:** GridScale'in bazalt granülleriyle ısıyı 600 °C seviyelerine kadar depolayan ve şarj-deşarj döngüsünde kompresör-türbin çiftini kullanarak yaklaşık yüzde 60 round-trip verimliliğe ulaşabilen termal depolama mimarisinin 2 MW elektrik üretim kapasitesine ve 20 MWh çıkışa sahip olması beklenmektedir [19].

3.TÜRKİYE ENERJİ DEPOLAMA GÖRÜNÜMÜ

3.1. Mevzuat ve Stratejik Hedefler

Türkiye'de enerji depolama alanına yönelik düzenlemeler, Elektrik Piyasası Kanunu'ndan yan hizmetler, bağlantı, şebeke ve ölçüm sistemlerine ilişkin teknik yönetmeliklere uzanan kapsamlı mevzuat seti ile EPDK'nın depolamalı üretim, müstakil depolama ve piyasa işleyişine dair kararlarının bütünleşmesi sonucunda, yatırım süreçleri, operasyonel entegrasyonu ve piyasa mekanizmalarını tanımlayan çok katmanlı bir çerçeve oluşturmuştur.

Buna paralel olarak, oluşturulan eylem, kalkınma, strateji ve enerji planları ile yol haritaları, enerji depolamayı arz güvenliği, sistem esnekliği, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve yeni nesil teknolojilerin geliştirilmesi açısından stratejik bir politika eksenini olarak konumlandırmaktadır. Bu bağlamda, 2030 yılına kadar 2,1 GW batarya ka-

pasitesinin devreye alınması; 2035 yılına kadar 7,5 GW lisans sahibi düzeyinde ve 1,7 GW talep tarafı katılımıyla toplam 9,3 GW depolama gücüne ulaşılması beklenmektedir [20].

3.2. Mevcut Durum

Strategy&PwC raporuna göre, ülke genelinde yapılan 2.700'ün üzerindeki önlisans başvurusunun toplamda 160 GW düzeyinde kurulu güce ve yaklaşık 230 milyar ABD doları toplam yatırım büyüklüğüne karşılık gelmektedir.

TESAB tarafından yayımlanan Türkiye Enerji Depolama Analiz Raporu'na göre ise, Haziran 2025 itibarıyla Türkiye'de toplam 33 GW kurulu güce sahip 673 depolamalı elektrik üretim projesine önlisans verilmiştir. Bu projelerin 262'si ve 18.3 GW'ı rüzgar (Tekirdağ liderliğinde), geri kalan 411 proje ve 14.6 GW'ı ise güneş (Ankara liderliğinde) tabanlıdır [20].

3.3 Gelecek Projeksiyonu

Belirlenen kapasite hedefleri, enerji depolamanın politika yapımındaki stratejik rolünü pekiştirirken; Türkiye'nin gelecekteki şebeke esnekliği ve arz güvenliği gereksinimlerinin karşılanabilmesi için uzun vadeli kapasite projeksiyonlarının sistem planlaması çerçevesinde bütüncül olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Strategy&PwC raporu, Türkiye enerji depolama pazarının belirlenen hedeflere bağlı olarak önümüzdeki on yılda güçlü bir büyüme eğilimine sahip olduğunu göstermektedir. Raporda ayrıca Türkiye enerji depolama pazarının 2032 itibarıyla yıllık 400-500 milyon ABD doları aralığında bir satış hacmine erişebileceği öngörülmekte olup bu büyüme yenilenebilir enerji üretiminin sistem içindeki payının artması, elektrikli araç altyapısının yaygınlaşması ve bataryaya ihtiyacın artması, sanayide enerji güvenliği ve kesintisizlik talebinin güçlenmesi ile depolamayı destekleyen düzenleyici çerçevenin gelişmesi gibi temel faktörlerle ilişkilendirilmektedir [20].

3.4. Öne Çıkan Yerli Gelişmeler ve Projeler

Türkiye, enerji depolamada sadece pazar değil, aynı zamanda üretim üssü olma yolunda olup öne çıkan yerli gelişmeler ve projeler aşağıda özetlenmiştir:

- **Aspilsan Enerji:** Türkiye'nin ilk silindirik lityum-iyon pil üretim tesisini kurarak ihracatçı konuma geçmiştir.
- **Pomega (Kontrolmatik):** Ankara Polatlı'da Türkiye'nin ilk özel sektör Lityum Demir Fosfat (LFP) pil hücresi Gigafabrikasının temeli atılmıştır.
- **Progresiva Enerji (Silivri Projesi):** Türkiye'nin ilk müstakil Lityum-iyon enerji depolama tesisi (250 MW / 1000 MWh) olarak Silivri'de kurulmaktadır.
- **Yerli Lityum:** Eti Maden, sıvı bor atıklarından lityum karbonat üretimini laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirmiştir [55]. Eskişehir / Kırka'da 10 ton/yıl kapasiteli bir pilot tesis tamamlanmış; 2025 yılı içinde ihalesi planlanan 600 ton/yıl kapasiteli ticari tesisin kurulum süreci başlatılmıştır.
- **Togg ve Siro:** Batarya hücresi ve modül üretimi konusunda Gemlik'te yapılan yatırımlar otomotiv endüstrisi ile enerji sektörünü birleştirmektedir.
- **Aggreko:** Aggreko, Türkiye'nin ilk şebeke bataryasını başarıyla devreye almıştır. Çorum/Alaca kasabası yakınlarındaki bir trafo merkezinde konuşlandırılan 500 kW'lık, bir saatlik Li-ion batarya sistemi ile elektrik ağındaki şebeke istikrarını artırmak hedeflenmektedir.
- **Sodyum-iyon batarya:** Türkiye'nin ilk yerli sodyum-iyon bataryası Batron Enerji ve Salty Enerji arasındaki stratejik iş birliği kapsamında üretilmiştir.
- **Süperkapasitör:** Aliaga RES'te ve bir sanayi tesisinde 2 MW kapasiteli süperkapasitör sistemi devreye alınmıştır.
- **Termal Enerji Depolama PCM (Faz Değiştiren Malzemeler):** Kızıldere 2 Jeotermal Santrali'nde geliştirilen sistem ile termal enerji depolanacaktır.
- **Lisanslı depolama üretim yatırımları:** Konya Kulu'daki ilk lisanslı depolamalı GES'ten, Kırşehir Mucur'daki Türkiye'nin ilk rüzgar+güneş hibrit santraline entegre depolama yapısına sahip Geycek RES'e; önlisans sürecini tamamlayarak üretim lisansı alan ilk depolamalı yenilenebilir enerji projesi olan

Mersin RES'ten, kabulleri yapılan hibrit doğal gaz-güneş depolama tesisi Bandırma Doğal Gaz Santrali ile Türkiye'nin en büyük rüzgâr santraline entegreli depolama projesi Soma RES'e uzanan bu yatırımlar, depolamalı üretim modellerinin Türkiye'de farklı santral türlerinde ölçeklenerek fiili uygulama aşamasına geçtiğini göstermektedir.

- **Atık Geri Dönüşüm Tesisi:** 2004 yılında Kocaeli'nin Kartepe ilçesinde kurulan Exitcom Recycling Elektronik Atık Geri Dönüşüm Tesisi'nde elektronik ürünler geri dönüştürülerek lityum, kobalt, grafit hammaddelerini elde edilmektedir.

4. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM VE YAPAY ZEKA

Enerji depolama sistemlerinin karmaşık geleceksel yönetim yöntemlerini yetersiz kılmaktadır. yapay zeka (YZ) ve dijital ikiz teknolojileri, bu sistemleri "enerji depolayan bir ünite" olmaktan çıkarıp "akıllı bir varlığa" dönüştürmektedir.

Yapay zeka ve dijital ikiz teknolojilerinin enerji depolamadaki temel kullanım alanları aşağıdaki başlıklar altında detaylandırılmaktadır:

- **Durum Tespiti ve Operasyonel Optimizasyon (SOC/SOH):** Depolama sistemlerinin şarj/deşarj, yaşlanma ve kalan ömürlerinin belirlenmesi ve operasyonel kararların optimize edilmesi amaçlanmaktadır.
- **Kestirimci Bakım:** Arıza, sıcaklık, performans kaybı ve termal kaçak risklerini önceden tahmin edilerek bakımın öngörüye dayalı yapılması hedeflenmektedir.
- **Algoritmik Ticaret (Arbitraj):** Elektrik fiyatı, talep, yenilenebilir enerji üretimi, şebeke tıkanıklığı ve frekans dengesizliğinin yüksek doğrulukla modellenerek otonom alım-satım yapılması ve böylelikle gelirin artırılması amaçlanmaktadır.
- **Kapasite Planlama (LDES):** Mevsimsel üretim varyanslarını analiz edilerek optimal sistem tasarımının yapılması hedeflenmektedir.
- **Güvenlik:** Depolama sistemlerinde otonom ve güvenli işletme, saldırı tespiti, risk azaltma ve otonom kontrol stratejilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.
- **AR-GE:** on binlerce materyalin yapay zeka

destekli otomatik tarama ve moleküler düzeyde simülasyon tabanlı sentez yöntemleriyle değerlendirilmesi, deneysel süreçlerin optimize edilmesini sağlayarak yeni malzeme tespitini ve ticarileşme sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır.

Örnek uygulamalarda; Borusan Ventures destekli Tyba platformu ve 3E firmasının FULLEST projesi, dijital ikizler ve YZ optimizasyonu ile depolama sistemlerinin performansını ve karlılığını maksimize etmektedir.

Smart Innovation Norway'nın "AI Battery Optimizer"ı, EcoFlow'un öngörücü YZ tabanlı ev içi depolama yönetimi ve Avrupa'da Ego Energy'nin gerçek zamanlı BESS optimizasyon mimarisi gibi uygulamalar, yapay zekanın şarj-deşarj zamanlamasından piyasa katılımına, varlık ömrü yönetiminden mikro-döngülerin önlenmesine kadar batarya operasyonlarını hem teknik hem ticari açıdan eşzamanlı optimize ederek enerji maliyetlerini düşürdüğünü ve uzun vadeli değer yaratımını artırdığını göstermektedir. Bu yaklaşımlar, BESS işletimini sezgisel karar süreçlerinden çıkarıp milisaniye ölçeğinde işleyen veri odaklı, öngörücü ve bütünlük bir optimizasyon çerçevesine dönüştürmektedir.

Sonuç olarak, yapay zeka ve dijitalleşme enerji depolama sistemlerinin tasarımı, işletimi, durumsal izleme-bakımı, güvenlik yönetimi ve piyasa entegrasyonu dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsünü yeniden şekillendirerek bu sistemleri daha düşük maliyetli, daha uzun ömürlü, daha güvenilir ve daha esnek yapılara dönüştürmektedir.

5. ÇEVRESEL ETKİLER, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GERİ DÖNÜŞÜM

Enerji depolamanın yaygınlaşması, madencilik ve atık yönetimi kaynaklı yeni çevresel riskleri ile geri dönüşüm konularını beraberinde getirmektedir.

5.1. Kritik Mineraller ve Tedarik Zinciri

Lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi kritik minerallerin tedariği, yüksek su tüketimi ve çevresel kirlilik yaratmaktadır. Tedarik zincirinin (rafine lityumun %60'ı, katot materyallerinin %70'i, dünya doğal grafit üretiminin %79'u, dünya grafit işleme kapasitesinin %90'ından fazlası) Çin'de yo-

ğunlaşması, enerji güvenliği açısından jeopolitik riskler oluşturmaktadır. [21] Bu durum, kobaltsız LFP bataryalara ve sodyum-iyon gibi alternatif kimyasallara yönelimi hızlandırmaktadır.

5.2. İkinci Ömür ve Döngüsel Ekonomi

Elektrikli araç bataryaları, kullanılabilir kapasiteleri %70-80 seviyesine düştüğünde araç performansı için yetersiz kabul edilerek kullanım dışı bırakılmaktadır [100]. Söz konusu bataryalar, sabit depolama sistemlerinde "ikinci ömür" olarak değerlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım, kullanım ömrünü 7-10 yıl daha uzatmakta, batarya maliyetlerini %30-70 oranında düşürmekte ve karbon ayak izini zamana yaymaktadır [22].

5.3. Geri Dönüşüm ve Kentsel Madencilik

Batarya atıklarının yönetimi için üç ana teknoloji öne çıkmaktadır [23]:

1. Pirometalurji: Yüksek enerji tüketmektedir ancak basittir. Ticari olarak mevcuttur.

2. Hidrometalurji: Düşük enerji ile %95 üzeri litium geri kazanımı sağlamaktadır. Ayrıca değerli metallerde yüksek saflık elde edebilme, daha düşük enerji tüketimi, çıkan ürünlerin katot üretiminde kullanılabilmesi ve ticari olarak mevcut olması nedeniyle endüstride en hızlı benimsenen teknoloji konumundadır.

3. Doğrudan Geri Dönüşüm: Malzemenin katot yapısını bozmadan yenilenmesini hedefler, en çevreci yöntemdir. Düşük maliyetine rağmen ticari ölçekte yaygınlaşmamıştır.

Endüstriyel uygulamalara bakıldığında Tesla'nın %92'nin üzerinde materyal geri kazanım oranına ulaştığı, AB'nin ise 2025 yılında yürürlüğe giren metodoloji ile 2025, 2027 ve 2031 yıllarına ilişkin zorunlu geri dönüşüm hedefleri getirdiği görülmektedir [24,25].

5.4. Düzenleyici Çerçeve ve Batarya Pasaportu

AB'nin Batarya Yönetmeliği, ABD'nin IRA kapsamındaki kritik mineral teşvikleri ve Çin'in NEV geri dönüşüm zorunlulukları, enerji depolama alanında tedarik zinciri şeffaflığı, karbon ayak izi yönetimi ve geri kazanım oranlarını merkeze alan sürdürülebilirlik odaklı düzenlemelerin küresel ölçekte standartlaştığını göstermektedir.

Bu çerçevenin tamamlayıcısı niteliğindeki Batarya Pasaportu uygulaması ise, ise pilot uygulama ve geçiş döneminde olup kimyasal bileşimden geri dönüştürülmüş içeriğe kadar izlenebilirliği dijital olarak güvence altına alarak hem üreticiler hem düzenleyiciler için şeffaflık, hesap verilebilirlik ve döngüsel ekonomiye geçiş açısından kritik bir doğrulama altyapısı sunmaktadır [26].

6. SONUÇ

Enerji depolama teknolojileri, hızlanan maliyet düşüşleri, teknolojik yenilikler ve dijitalleşme dinamiklerinin etkisiyle köklü bir dönüşüm sürecine girmiş; pazar yapısı tekil çözümlerle sınırlı kalmayıp uygulama özelinde süre, güç ve esneklik gereksinimlerine göre şekillenen hibrit mimariler yönünde çeşitlenmiştir. Önümüzdeki dönemde sektörün gelişim yönü yalnızca teknik kapasite artışına değil, aynı zamanda tedarik zinciri güvenliğine, döngüsel ekonomi ilkelerine ve yapay zeka destekli akıllı işletme modellerine bağlı olarak şekillenecek; böylece enerji depolama, pasif bir altyapı unsuru olmaktan çıkarak sürdürülebilir, esnek ve karbonsuz enerji sistemlerinin en kritik stratejik bileşenlerinden biri haline gelecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kocaman, B. (2021). ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ. Ankara: Iksad Yayınevi.
- [2] İnternet: Şebeke arz güvenliğinde elektrik depolama sistemlerinin şebeke entegrasyonu ve gelecek vizyonu. Web: <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2019/02/Dr.-Faz%C4%B1l-KAYTEZ-ODTU-MD-sunumu.pdf> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.
- [3] İnternet: Statistics. Web: <https://gesdb.sandia.gov/statistics.html> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.
- [4] İnternet: Şebeke arz güvenliğinde elektrik depolama sistemlerinin şebeke entegrasyonu ve gelecek vizyonu. Web: <https://www.infolink-group.com/energy-article/energy-storage-topic-global-energy-storage-market-review-outlook> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.
- [5] Dyczkowska, J. A., Panek, A., & Chamier-Gliszczyński, N. (2025). Identification of Energy Storage in Distribution Channels. Energies, 18(18), 4981. <https://doi.org/10.3390/en18184981>.
- [6] İnternet: The Big Picture. Web: <https://em->

ber-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025/the-big-picture/ 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[7] İnternet: Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour: BloombergNEF. Web: <https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[8] İnternet: LCOS Estimates. Web: <https://www.pnnl.gov/projects/esgc-cost-performance/lcos-estimates> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[9] İnternet: Sodyum-iyon Bataryada Koreli Ve Çinli Devlerden Güç Birliği. Web: <https://enerjidonusumu.com/sodyum-iyon-bataryada-koreli-ve-cinli-devlerden-guc-birligi/> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[10] İnternet: What Is The Current Average Cost Of Energy Storage Systems In 2025. Web: <https://bslbatt.com/blogs/current-average-energy-storage-cost-2025/> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[11] İnternet: The energy storage sector is evolving rapidly with advancements in lithium alternatives, hydrogen storage, and solid-state batteries. Web: <https://conexsol.com/top-10-energy-storage-trends-in-2025-future/> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[12] İnternet: Pumped Storage Hydropower. Web: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[13] İnternet: Dünyanın en büyük basınçlı hava enerji depolama tesisi kuruluyor. Web: <https://www.donanimhaber.com/dunyanin-en-buyuk-basinc-li-hava-enerji-depolama-tesisi-kuruluyor--185714> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[14] İnternet: Beton, Enerji Depolama Çözümü Olma Yolunda Gelişiyor. Web: <https://enerjidonusumu.com/eritilmis-tuzla-enerji-depolamada-devrim-ci-teknoloji-gelistirildi> 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[15] İnternet: İsveçli bilim insanları çimento tabanlı bir batarya geliştirdi. Web: <https://www.isvecgundemi.com/teknoloji/isvecli-bilim-insanlari-cimento-tabanlı-bir-batarya-gelistirdi-h22868.html> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[16] İnternet: Akıllı Şebekelere Elektrikli Araçların Entegrasyonu Ve Taşıttan Şebekeye V2g Uygulamaları. Web: https://www.emo.org.tr/ekler/f13bc4c93579242_ek.pdf adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[17] İnternet: Enerji depolama teknolojilerindeki son gelişmeler. Web: <https://thinktech.stm.com.tr/tr/enerji-depolama-teknolojilerindeki-son-gelis-meler> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[18] İnternet: Sektörün Geleceğini Değiştireceği Söylenen, Tümüyle Organik Pil Geliştirdi. *Türkiye'nin ilk yerli sodyum-iyon (Na-Ion) bataryası Batron Enerji ve Salty Enerji arasındaki stratejik iş birliği kapsamında* Web: <https://www.webtekno.com/enerji-depolayabilen-organik-pil-h100803.html> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[19] İnternet: Denmark tests storage technique using basalt granules. Web: <https://www.en-former.com/en/denmark-tests-storage-technique-using-basalt-granules/> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[20] İnternet: TÜRKİYE ENERJİ DEPOLAMA ANALİZ RAPORU 2025. Web: <https://tesab.org.tr/turkiye-enerji-depolama-analiz-raporu-2025/> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[21] İnternet: China dominates global trade of battery minerals. Web: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65305> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[22] İnternet: Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. Web: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[23] X. Yu, W. Li, V. Gupta, and H. Gao, "Current challenges in efficient lithium-ion batteries' recycling: A perspective," Global Challenges, vol. 6, no. 12, p. 2200099, Sep. 2022, doi: 10.1002/gch2.202200099.

[24] İnternet: Tesla claims 92% battery cell material recovery in new recycling process. Web: <https://electrek.co/2021/08/09/tesla-battery-cell-material-recovery-new-recycling-process> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[25] İnternet: Batteries. Web: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.

[26] İnternet: Battery Passport. Web: <https://www.globalbattery.org/battery-passport/> adresinden 23 Kasım 2025'te alınmıştır.