TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI
SAVUNMA SANAYİİ
BAŞKANLIĞI

SSB

BATARYA TEKNOLOJİLERİ

OTAĞ SONUÇ RAPORU

Eylül 2026

TASNİF DIŞI



“Çalışmadan, yorulmadan, üretmeden rahat yaşamak isteyen toplumlar önce haysiyetlerini, sonra hürriyetlerini ve daha sonra da istiklal ve istikballerini kaybetmeye mahkûmdur.”

M. Atatürk



“Türkiye, savunma sanayiindeki tüm stratejik ihtiyaçlarını kendisi tasarlayabilir, geliştirebilir, üretebilir ve bunların ihracatını yapabilir hale gelene kadar durmayacağız, dinlenmeyeceğiz, gece gündüz çalışacağız.”

Recep Tayyip ERDOĞAN
Cumhurbaşkanı

BATARYA TEKNOLOJİLERİ OTAĞ SONUÇ RAPORU YOL HARİTASI SAYIN BAŞKAN ÖN SÖZÜ



Geleceğin harekât ortamı; kara, hava, deniz, siber ve uzay alanlarının eş zamanlı, bağlantılı ve bütünleşik şekilde kullanıldığı çok alanlı bir yapıya doğru gelişmektedir. Böylesine dinamik ve hızla dönüşen bir ortamda Türkiye; kritik teknolojilerini özgün olarak geliştiren ve küresel rekabette gücünü sürekli artıran, nitelikli insan kıymetini yetiştiren ve fikrî mülkiyetini üreten bir ülke olma hedefiyle kararlılıkla ilerlemektedir.

Savunma sanayiimiz, bu yolculukta ülkemizin bağımsızlığının temel dayanaklarından biri olduğu kadar, geleceğimizi kendi irademiz ve kabiliyetlerimizle şekillendirme vizyonumuzun da en güçlü unsurlarındandır. Bu anlayış doğrultusunda; Ar-Ge yatırımlarımızın niteliğini ve etkisini artırmayı, teknoloji üretme kapasitemizi sürekli ileriye taşımayı ve sahip olduğumuz insan kıymetini stratejik hedeflerimiz doğrultusunda geliştirmeyi öncelikli görüyoruz.

Başkanlığımız Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı koordinasyonunda oluşturulan Odak Teknoloji Ağları (OTAĞ) yapıları; mevcut ve planlanan sistem ihtiyaçlarımızı, geleceğin harekât ortamını ve gelişen teknoloji eğilimlerini birlikte değerlendirerek teknoloji yol haritalarımızın şekillendirilmesine katkı sağlamaktadır. Alanında tecrübeli kurumlarımızın, akademisyenlerimizin, uzmanlarımızın, Başkanlığımızın ilgili daire başkanlıklarının ve Türk Silahlı Kuvvetlerimizin temsilcilerinin aynı hedef etrafında buluştuğu bu yapılar, savunma sanayii ekosistemimizin sahip olduğu ortak aklın ve güçlü iş birliği kültürünün somut bir göstergesidir. Geleceğin harekât ortamına yönelik yürüttüğümüz bu çalışmalarla savunma sanayii ekosistemimizin teknolojik derinliğini artırırken, ülkemizin stratejik bağımsızlığını ve sürdürülebilir küresel rekabet gücünü de tahkim ediyoruz.

Çok alanlı harekât ortamında kara, hava, deniz, siber ve uzay sistemlerinin görev etkinliği; platformların genel performansı ile bu platformlara kararlı güç sağlayan ve operasyonel sürekliliği destekleyen alt sistemlerin yetkinliğinin birlikte geliştirilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu doğrultuda batarya teknolojileri, modern savunma sistemlerinin görev süresini, operasyonel dayanıklılığını ve sahadaki etkinliğini doğrudan destekleyen stratejik teknoloji alanlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır.

Modern harekât ortamının artan performans beklentileri, askerî batarya sistemlerinde teknoloji seviyesini sürekli daha ileriye taşımaktadır. Taktik sahadaki platform ve teçhizatlarda kullanılan batarya sistemlerinde; uzun süreli görevler için yüksek enerji yoğunluğu, anlık güç ihtiyaçlarının karşılanması için yüksek güç yoğunluğu, operasyonel sürekliliği destekleyen hızlı şarj kabiliyeti ve yüksek çevrim ömrü temel gereksinimler arasında yer almaktadır.

Hafif, modüler ve sahada kolaylıkla değiştirilebilir yapıların geliştirilmesi lojistik etkinliği artırırken; aşırı sıcaklık, nem, toz ve mekanik şok koşullarında yüksek dayanım sağlanması da sistemlerin görev güvenilirliğini güçlendirmektedir. Gelişmiş ısıl yönetim kabiliyetleri ile balistik etkiler altında yüksek emniyet ve yapısal kararlılık sunan çözümler ise geleceğin batarya sistemlerinde belirleyici unsurlar arasında bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında hayata geçirdiğimiz Batarya Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı ile ülkemizin bu stratejik alandaki mevcut yetkinliklerini, gelecekte ihtiyaç duyacağı kabiliyetleri ve öncelikli teknoloji geliştirme alanlarını bütüncül bir perspektifle ele alarak alanında yetkin paydaşlarımızın bilgi, tecrübe ve öngörülerinin bir araya getirilmesiyle kapsamlı bir Teknoloji Yol Haritası ortaya konulmuştur.

Bu yol haritasının; batarya teknolojilerinde ülkemizin araştırma, geliştirme ve üretim kabiliyetlerini daha ileri seviyelere taşıyacağına, kritik teknolojilerde yerli ve millî çözümlerimizin güçlenmesine katkı sunacağına ve savunma sanayiimizin geleceğin harekât ortamındaki teknolojik üstünlüğünü destekleyeceğine inanıyorum.

Batarya Teknolojileri OTAĞ faaliyeti boyunca büyük bir gayret ve özveriyle çalışan başta Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı personelimiz olmak üzere; bilgi ve birikimleriyle sürece değer katan akademisyenlerimize, paydaş kurumlarımıza, Türk Silahlı Kuvvetlerimizin kıymetli temsilcilerine ve sektörümüzün değerli mensuplarına teşekkür ediyorum.

Prof. Dr. Haluk Görgün
SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANI

İÇİNDEKİLER

SAYIN BAŞKAN ÖN SÖZÜ ..... **i**

TABLO LİSTESİ ..... **iii**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **iv**

1. AMAÇ **1**

2. KAPSAM **1**

3. TANIMLAR ve KISALTMALAR **2**

4. YÖNETİCİ ÖZETİ **1**

5. YÖNTEM **6**

5.1 Çalışma Metodolojisi 6

5.2. Önceliklendirme Metodolojisi 7

5.3. Önceliklendirme Kriterleri 10

6. BATARYA OTAĞ FAALİYETLERİ **11**

6.1. Lansman Toplantısı 11

6.2. Yönlendirme Komitesi 12

6.3. Odak Çalışma Grupları 13

6.4. I. OÇG Toplantısı 13

6.5. II. OÇG Toplantısı 15

7. ODAK ÇALIŞMALARINDA ELE ALINAN TEKNOLOJİLER **15**

7.1. Dünyada Mevcut Durum ve Teknoloji Eğilimleri 15

7.1.2. OÇG 2 Değerlendirmesi 22

7.2. Türkiye'de Mevcut Durum ve Teknoloji Eğilimleri 25

7.2.1. OÇG 1 Değerlendirmesi 25

7.2.2. OÇG 2 Değerlendirmesi 27

7.3. OÇG 1 29

7.3.1. Genel Bilgi 30

7.3.2. Teknoloji Konuları 54

7.3.3. Değerlendirmeler 55

7.3.4. GZFT Analizi 57

7.4. OÇG 2 59

7.4.1. Genel Bilgi 60

7.4.2. Teknoloji Konuları 64

7.4.3. Değerlendirmeler 65

7.4.4. GZFT Analizi 65

8. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER **71**

9. SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI TEKNOLOJİ KAZANIM ÇALIŞMALARI **72**

10. KAYNAKÇA **73**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Değerlendirme Kriter Seti

Tablo 2 AHP Yönteminde Kullanılan Önem Ölçeği

Tablo 3 Değerlendirme Kriter Seti

Tablo 4 Yönlendirme Komitesi Üyeleri, Kurum ve Kuruluş Bilgileri

Tablo 5 Batarya Malzemeleri/Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm Taksonomisi

Tablo 6 Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon Taksonomisi

Tablo 7 Hücre Bileşeni – Askeri Performans İlişki Matrisi

Tablo 8 Batarya Pazarının Gelecekteki Hacmine Dair Küresel Tahminler

Tablo 9 Dünyada bulunan bazı geri dönüşüm tesislerinin uyguladığı yöntemler, elde edilen ürünler ve yıllık kapasiteleri [64]

Tablo 10 Türkiye batarya malzemeleri ekosistemi

Tablo 11 Ticari olarak kullanılan hücrelerin batarya performans parametreleri

Tablo 12 LFP Katot Temel Parametreleri

Tablo 13 LFP ve LMFP Karşılaştırması

Tablo 14 NMC Ailesi ve İlgili Kimyalar Karşılaştırması

Tablo 15 Sodyum-iyon Katot Malzemeleri

Tablo 16 Gelecek Nesil Katot Malzemeleri

Tablo 17 Doğal ve Sentetik Grafit Karşılaştırması

Tablo 18 Silikon Anot Tipleri

Tablo 19 Hard Carbon ve Soft Carbon Karşılaştırması

Tablo 20 Gelişmekte Olan Anot Malzemeleri

Tablo 21 Poliolefin Separatör Tipleri

Tablo 22 Seramik Kaplı Separatör Tipleri

Tablo 23 İleri Separatör Teknolojileri

Tablo 24 Temel Elektrolit Solventleri

Tablo 25 Temel Elektrolit Tuzları

Tablo 26 Temel Elektrolit Katkıları

Tablo 27 Oksit Bazlı Katı Elektrolitler

Tablo 28 Sülfür Bazlı Katı Elektrolitler

Tablo 29 Polimer Katı Elektrolitler

Tablo 30 Katı-Hal Batarya Teknoloji Sistemi Karşılaştırması

Tablo 31 OÇG 1 Yakın Vade Konu Önerileri

Tablo 32 OÇG 1 Uzak Vade Konu Önerileri

Tablo 33 Batarya Malzemeleri Konusunun GZFT Analizi

Tablo 34 Hücre Teknolojileri Konusunun GZFT Analizi

Tablo 35 Geri Dönüşüm Konusunun GZFT Analizi

Tablo 36 Başlıca Batarya Standartları/Düzenlemeleri

Tablo 37 OÇG 2 Yakın Vade Konu Önerileri

Tablo 38 OÇG 2 Uzak Vade Konu Önerileri

Tablo 39 Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) için GZFT Analizi

Tablo 40 Kontrol Teknolojileri için GZFT Analizi

Tablo 41 Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri için GZFT Analizi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 Önceliklendirme Metodolojisi Akış Şeması

Şekil 2 Kriter Seti

Şekil 3 DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki Ölçeği ve DEMATEL Adımları

Şekil 4 AHP Yöntemi Adımları

Şekil 5 TOPSIS Adımları

Şekil 6 Batarya OTAĞ Lansmanı Anket Katılımcı Sayısı

Şekil 7 I. OÇG Katılımcı Dağılımları

Şekil 8 Batarya Sistemi Kritik Bileşenleri

Şekil 9 2016-2025 döneminde "batarya" kelimesi geçen patentlerin analizi

Şekil 10 2016-2025 döneminde "batarya" kelimesi geçen yayınların analizi

Şekil 11 Geleceğin batarya teknolojilerine yönelik yaklaşımlar

Şekil 12 OÇG-1 Katılımcıları

Şekil 13 OÇG-1 Katılımcılarının Uzmanlık Alanları

Şekil 14 Batarya temel bileşenlerinin şematik gösterimi

Şekil 15 Li-iyon batarya sisteminin çalışma prensibi

Şekil 16 Kullanım ömrünü tamamlamış Lityum-iyon bataryalardaki değerli metallerin ağırıkça miktarları [99].

Şekil 17 OÇG-2 Katılımcıları

Şekil 18 30 Konu Önerisinin Taksonomi Başlıklarına Göre Dağılımı

1. AMAÇ

Muharebe sahasındaki sistemlerin etkinliği, operasyonel devamlılığı sağlayan batarya teknolojilerine doğrudan bağlıdır. Modern harp ortamında kullanılan askeri bataryalardan; yüksek enerji ve güç yoğunluğu, hızlı şarj, yüksek çevrim ömrü ile hafif ve modüler yapı talep edilmektedir. Ayrıca bu sistemlerin aşırı çevre koşullarına dayanıklı, gelişmiş ısıl yönetimli ve balistik darbelere karşı güvenli olması kritik önem taşır.

Savunma Sanayii Başkanlığı koordinesinde yürütülen Batarya Teknolojileri OTAĞ çalışması ile; ülkemizin mevcut yetenekleri ve dünyadaki teknolojik gelişmeler derinlemesine analiz edilmiş, yakın ve uzak vadede odaklanılması gereken teknoloji konu başlıkları tespit edilmiştir. Belirlenen teknoloji konularına ilişkin detaylı alt kırılımlar yapılarak bu doğrultuda ilgili alt çalışma grupları oluşturulmuş ve tüm bu süreçlerin sonucunda Batarya Teknolojileri OTAĞ Teknoloji Yol Haritası hazırlanmıştır.

Bu doğrultuda, sektörel paydaşların katılımıyla şekillenen Batarya Teknolojileri OTAĞ faaliyetleri 10 Eylül 2025 tarihindeki Lansman Toplantısı ile resmi olarak başlatılmıştır. Süreç boyunca yürütülen çalışmalar; 'Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm' ile 'Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon' olmak üzere iki ana Odak Çalışma Grubu vasıtasıyla derinlemesine ele alınmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen faaliyetler, alt kırılımlar ve elde edilen stratejik sonuçlar işbu rapor ile sunulmaktadır.

2. KAPSAM

Bu rapor, yakıt hücresi ve batarya teknolojileri alanında yetkinliğe sahip firma, araştırma kurumu ve üniversitelerden yaklaşık 400 temsilcinin katılımıyla gerçekleştirilen kapsamlı toplantı serisinin neticesinde kaleme alınmıştır. Batarya Teknolojileri OTAĞ Sonuç Raporu ile ülkemizdeki mevcut yetenekler ve dünyada yapılan çalışmalar analiz edilmiş, yakın ve uzak vadede çalışılması gereken teknoloji konu başlıkları belirlenmiş ve Batarya Teknolojileri Yol Haritası oluşturulmuştur.

Bu kapsamda hazırlanan Batarya Teknolojileri OTAĞ Sonuç Raporu'nun "Yöntem" bölümünde, Batarya Teknolojileri Yol Haritası'nın oluşturulması sürecinde başvurulan teknoloji yönetim araçları açıklanmıştır.

"Batarya OTAĞ Faaliyetleri" bölümünde ise çalışma takvimi, paydaşların görev dağılımları ve gerçekleştirilen toplantılara dair detaylı bilgiler paylaşılmıştır.

"Odak Çalışmalarda Ele Alınan Teknolojiler" başlığı altında, Türkiye'deki ve dünyadaki mevcut durum ile teknoloji eğilimleri incelenmiş; batarya teknolojilerindeki yönelimler ve bu teknolojilerin sektörel bazda gelişim süreçleri aktarılmıştır. Bu çalışmalarla paralel olarak gerçekleştirilen Batarya Teknolojileri Önceliklendirme Analizinde; küresel durum, mevcut altyapı, çift kullanım potansiyeli, temin riski, projede uygulanabilirlik, kritiklik ve insan kaynağı parametreleri göz önünde bulundurularak öne çıkan teknolojiler değerlendirilmiştir.

Raporun son bölümünde ise Batarya Teknolojileri OTAĞ çalışmaları neticesinde elde edilen başlıca bulgular ile teknoloji konularının ülkemize kazandıracağı yetkinliklere yer verilmiştir. Ayrıca toplanan envanterler ile öncelikli olarak değerlendirilen konular arasında eşleştirmeler yapılarak, öncelikli alanların ülkemizdeki mevcut durumu detaylıca analiz edilmiştir.

3. TANIMLAR VE KISALTMALAR

AHP	Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Süreci)
AI	Yapay Zeka
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
AÇG	Alt Çalışma Grubu
BCU	Batarya Kontrol Ünitesi
BESS	Bataryalı Enerji Depolama Sistemleri (Battery Energy Storage Systems)
BLE	Bluetooth Low Energy
BMS	Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System)
BOTAĞ	Batarya Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CAGR	Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (Compound Annual Growth Rate)
CAM	Katot Aktif Malzemesi (Cathode Active Material)
CAN	Controller Area Network
CAPEX	Yatırım Harcamaları (Capital Expenditure)
CID	Akım Kesici Cihaz (Current Interruption Device)
CMU	Hücre İzleme Ünitesi
CNT	Karbon Nanotüp
COF	Kovalent-Organik Çerçeve (Covalent-Organic Framework)
CTB	Hücreden Gövdeye Entegrasyon (Cell-to-Body)
CTC	Hücreden Şasiye
CTP	Hücreden Pakete Entegrasyon (Cell-to-Pack)
ÇHC	Çin Halk Cumhuriyeti
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
DBE	Kuru Elektrot Teknolojisi (Dry Binder/Electrode Coating)
DEC	Dietil Karbonat
DMC	Dimetil Karbonat
DME	Dimetil Eter
DMMP	Dimetil Metil Fosfonat
DoS	Yetkisiz Uzaktan Erişim ve Hizmet Dışı Bırakma

ECU	Elektronik Kontrol Birimi
ED	Elektro-depozisyon (Electro-deposition)
EDS	Enerji Depolama Sistemleri
EIA	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi İdaresi (Energy Information Administration)
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
EKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
EMC	Etil Metil Karbonat
EOL	Kullanım Ömrü Sonu (End of Life)
ESS	Enerji Depolama Sistemleri
EV	Elektrikli Araç (Electric Vehicle)
FDIA	Sahte/Yanlış Veri Enjeksiyonu Saldırıları
HAPS	Yüksek İrtifa Sahte Uydusu (High-Altitude Pseudo-Satellite)
HIL	Donanım-Üzerinde-Yazılım (Hardware-In-The-Loop)
HPP	Hibrit Güç Santrali
ICE	İlk Döngü Verimi (Initial Coulombic Efficiency)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IEC 62133-2	Taşınabilir Cihazlar İçin Şarj Edilebilir Lityum Hücre ve Batarya Güvenlik Standardı
IEC 62619	Endüstriyel Uygulamalar İçin Lityum Hücre ve Batarya Güvenlik Standardı
IEC 62660	Elektrikli Yol Araçları Tahrik Hücreleri Performans ve Güvenlik Standart Serisi
IEC 62933	Elektrik Enerjisi Depolama (EES) Sistemleri Standart Serisi
İDA	İnsansız Deniz Aracı
İHA	İnsansız Hava Aracı
İKA	İnsansız Kara Aracı
KERS	Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi (Kinetic Energy Recovery System)
LAGP	Lityum Alüminyum Germanyum Fosfat (Katı elektrolit)
LATP	Lityum Alüminyum Titanyum Fosfat (Katı elektrolit)
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFMP/LMFP	Lityum Demir Manganez Fosfat / Lityum Manganez Demir Fosfat
LFP	Lityum Demir Fosfat
LGPS	Lityum Germanyum Fosfor Sülfür (Katı elektrolit)

Li-Po	Lityum Polimer
LIC	Lityum-İyon Kapasitör (Lithium-Ion Capacitor)
LIPON	Lityum Fosfor Oksit Nitrür (İnce film katı elektrolit)
LSPS	Lityum Kalay Fosfor Sülfür (Katı elektrolit)
LTO	Lityum Titanat
MAM	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkez
MIL-PRF-32271	Şarj Edilemeyen (Primer) Askeri Lityum Batarya Standartı
MIL-PRF-32383	Şarj Edilebilir Taşınabilir Askeri Batarya Spesifikasyonu
MIL-PRF-32565	Askeri Kara Araçları Standart Nominal 24V Lityum İyon '6T' Batarya Spesifikasyonu
MIL-STD-461	Askeri Elektromanyetik Uyumluluk Standardı
MIL-STD-810	Askeri Çevre Testleri Standardı
MPC	Öngörücü Kontrol
MOF	Metal-Organik Çerçeve (Metal-Organic Framework)
MOFCOM	Çin Halk Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı (Ministry of Commerce)
NIC	Sodyum-İyon Kapasitör (Sodium-Ion Capacitor)
NTE	Nadir Toprak Elementleri
OÇG	Odak Çalışma Grubu
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi (Original Equipment Manufacturer)
OPEX	İşletme Giderleri (Operational Expenditure)
OSD	Aşırı Şarj Güvenlik Cihazı (Overcharge Safety Device)
OTA	Uzaktan Yazılım Güncellemesi
OTAĞ	Odak Teknoloji Ağı
OTEP	Otomotiv Teknoloji Platformu
PCM	Faz Değiştiren Malzemeler
PHIL	Power Hardware-In-The-Loop
PHM	Prognostik Sağlık Yönetimi
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RTCA DO-160 / DO-160D	Havacılık Teçhizatı Çevresel Koşullar ve Test Standartı
RUTE	TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü

SAE J2464	Elektrikli ve Hibrit Araç Bataryaları Güvenlik ve Kötü Kullanım Testleri Standardı
SDV	Yazılım Tanımlı Araç
SEI	Katı Elektrolit Arayüzü (Solid Electrolyte Interphase)
SGK	Sosyal Güvenlik Kurumu
SİHA	Silahlı İnsansız Hava Aracı
SLI	Motor Çalıştırma, Aydınlatma ve Ateşleme (Starting, Lighting, and Ignition)
SOH	Batarya Sağlık Durumu (State of Health)
SOC	Şarj Durumu
SSB	T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı / Katı Hal Batarya (Solid-State Battery)
STANAG 4015	NATO Kara Araçları Batarya Standartı
TAP	Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
THS	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
TL	Türk Lirası
TOPSIS	Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerlik Bakımından Sıralama Üstünlüğü)
TSKGV	Türk Silahlı Kuvvetlerini Güçlendirme Vakfı
TUSAŞ	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UL 1642	Lityum Hücre Güvenlik Standardı (Kötü Kullanım Testleri)
UL 2054	Evsel ve Ticari Batarya Paketleri Güvenlik Standardı
UL 2580	NATO Kara Araçları Batarya Standartı
UL 9540	Enerji Depolama Sistemleri ve Ekipmanları Güvenlik Standardı
UL 9540A	Batarya Enerji Depolama Sistemlerinde Termal Kaçak Yangın Yayılımı Test Yöntemi
UN 38.3	Tehlikeli Maddelerin Taşınması - Lityum Batarya Lojistik Güvenlik Düzenlemesi
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
V2X	Vehicle-To-Everything
WBMS	Kablosuz BMS
WSN	Kablosuz Sensör Ağları
XFC	Aşırı Hızlı Şarj (Extremely Fast Charging)

4. YÖNETİCİ ÖZETİ

Savunma Sanayii Başkanlığı koordinesinde yürütülen Batarya Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ) çalışmaları kapsamında, batarya teknolojilerinde mevcut durum ile gelecekte ihtiyaç duyulan alanların bütüncül bir yaklaşımla ele alınması sağlanmıştır.

Başkanlığımızın 2024-2028 Stratejik Planı'nda yer alan millî teknolojileri geliştirme ve sürdürülebilir bir teknolojik altyapı oluşturma hedefleri doğrultusunda şekillendirilen OTAĞ faaliyetleri; sektörde deneyimli paydaşların katılımıyla "Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm" ile "Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon" Odak Çalışma Grupları bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışma grupları, savunma, havacılık ve uzay sanayii için kritik önem taşıyan teknolojileri ortak akılla belirlemiş; mevcut durumu analiz ederek gelecekte kazanılması hedeflenen yetkinlikleri kullanıcı makamlarının operasyonel ihtiyaçlarıyla ilişkilendirmiştir. Tespiti yapılan teknoloji başlıklarının önceliklendirilmesi sürecinde ise nesnelliği sağlamak amacıyla AHP, DEMATEL ve TOPSIS gibi Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metotlarından yararlanılmış ve konuların yakın ile uzak vadeli kazanım takvimi oluşturulmuştur.

Gelecekte stratejik bir önem taşımaya devam edecek olan yakıt hücresi teknolojilerini de güncel gereksinimler ve geleceğe yönelik öngörüler çerçevesinde ele alan bu süreç, Batarya Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı Sonuç Raporu ile taçlandırılmıştır.

5. YÖNTEM

5.1 Çalışma Metodolojisi

Batarya Teknolojileri Yol Haritası'nin oluşturulması için "Ortak Akıl" yaklaşımı temel alınmış ve bu kapsamda beş aşamalı bir süreç izlenmiştir: Ön Hazırlık, Lansman, Öneri ve Problem Başlıklarının Toplanması, Odak Çalışma Grubu (OÇG) Toplantıları ve Önceliklendirme. Söz konusu adımların açıklamalarına Tablo 1'de yer verilmiştir.

Bu yaklaşım, ilgili alanda uzmanlığa sahip üniversiteler, araştırma enstitüleri, kamu kurumları ve sanayi temsilcilerinin ortak katkısıyla teknoloji yol haritası ile kazanım planlarının birlikte geliştirilmesini hedeflemektedir. Çalışma sürecinde ayrıca, daha önce oluşturulmuş olan "SSB Teknoloji Taksonomisi", "THS Kılavuzu" ve "Teknoloji Envanteri" gibi teknoloji yönetim araçları etkin şekilde kullanılmıştır.

Tablo 1. Değerlendirme Kriter Seti

Yöntem Adımları	Kapsam
Ön Hazırlık	Lider kuruluşun belirlenmesi, Öncü kuruluşların tespiti, Alan uzmanları ve paydaşların tespiti, İlgili tematik alanda OÇG'lerin tanımlanması, Lansman hazırlıkları, Roller ve sorumluluklar ile çalışma usullerinin tanımlanması, Ortak veri paylaşımı alanının oluşturulması
Lansman	Tematik yol haritası çalışmaları kapsamında alan uzmanlarının ve ilgili paydaşların bilgilendirildiği bir etkinlik düzenlenerek girdilerin talep edilmesi: • Konu önerileri • Teknoloji envanteri • Yetenek ihtiyaçları • Katılım sağlanacak OÇG bilgiler
Önerilerin/Problemlerin Toplanması	Tematik yol haritası kapsamında iletilen konu önerilerinin derlenmesi
OÇG Toplantıları	OÇG toplantıları ile teknoloji yol haritası taslağının oluşturması, • Konu önerilerinin değerlendirilmesi ve gruplandırılması • Teknoloji konularının tespit edilmesi • Teknoloji yol haritası taslağının oluşturulması
Önceliklendirme	AHP ve DEMATEL yöntemleriyle kriter ağırlıklarının belirlenmesi, TOPSIS ile teknoloji konularının önceliklendirilmesi

5.2. Önceliklendirme Metodolojisi

Günümüzde teknolojinin hızlı ve sürekli değişimi, uzun vadeli projeler yürüten şirketler için önemli bir belirsizlik kaynağı haline gelmiştir. Bu durum; bütçeleme, insan kaynağı planlaması, yatırım kararları ve iş birlikleri gibi alanlarda öngörüde bulunmayı güçleştirmektedir. Özellikle uzun vadeye yayılan projelerde karşılaşılan en büyük risklerden biri, teknoloji geliştikçe rekabet avantajını yitirmiş, yani güncelliğini kaybetmiş bir ürün ortaya koyma olasılığıdır. Bu nedenle, sınırlı kaynaklara sahip şirketlerin, teknoloji yol haritalarında yer alması beklenen ve gelecekte yüksek etki yaratacak teknolojileri analitik bir yaklaşımla belirleyebilecek bir karar destek sistemine ihtiyaçları vardır. Ayrıca, problemler daha kritik ve karmaşık hale geldikçe, değerlendirme sürecinde birden fazla kriterin dikkate alınması da kaçınılmaz hale gelmektedir.

Doğru ve etkili kararlar alabilmek için, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin karar problemlerine sistematik bir şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşımla, karmaşık karar problemleri daha kolay modellenebilir ve değerlendirme süreci daha verimli hale getirilebilir. Teknoloji konularının önceliklendirilmesi de bir ÇKKV problemi olarak ele alınmalı ve bu tür problemlerin çözümünde uygun ve etkili ÇKKV yöntemlerinin kullanılması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Geliştirilen karar destek sistemi yaygın olarak kullanılan ÇKKV yöntemlerinden DEMATEL [1], AHP [2] ve TOPSIS [3] metotlarının entegre edilmesi ile geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, karar verme sürecinde AHP ve DEMATEL yöntemleri kullanılarak kriter, alt kriter ve özniteliklerin ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından, tanımlanan pozitif ve negatif ideal teknoloji konuları referans alınarak, TOPSIS yöntemiyle teknoloji konuları öncelik ve vade düzeylerine göre sıralanmıştır.

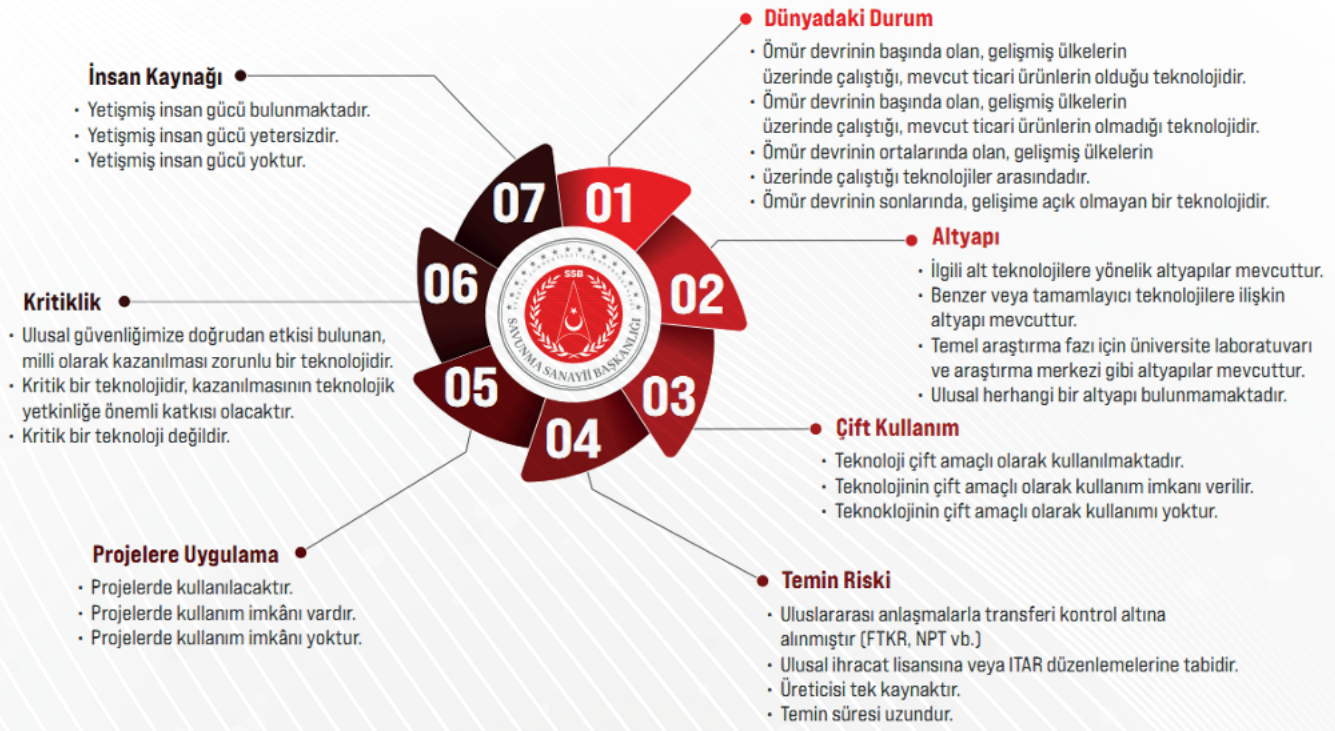
DEMATEL metodu ilk aşamada problem için önerilen ve uzmanlarca değerlendirilen kriterlerin aralarında bir ilişki/bağımlılık olup olmadığının belirlenmesi ve eğer bağımlılık varsa kriter ağırlıklarının tespit edilmesinde; AHP metodu kriterler arasında bir bağımlılık söz konusu olmadığı durumda ikili karşılaştırma esaslarına dayalı olarak kriter ağırlıklarının ve önceliklerinin belirlenmesinde; TOPSIS yöntemi ise DEMATEL veya AHP ile belirlenmiş kriter ağırlıkları baz alınarak, teknoloji yol haritası konularının yakın ve uzak vade dikkate alınarak önceliklendirilmesi ve sıralaması için kullanılmıştır. Bu yöntemsel yaklaşım, teknoloji önceliklendirme sürecinde sistematik ve analitik bir temel sağlamaktadır. Geliştirilen metodolojinin adımları ve her bir adımda kullanılan yöntem Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Önceliklendirme Metodolojisi Akış Şeması

Geliştirilen önceliklendirme metodolojisi kapsamında Teknoloji Konularına ait vade ve öncelik değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Vade, bir teknolojinin ne zaman kullanıma hazır hale geleceğini veya etkisini göstereceğini ifade eder. Çalışma kapsamında konuların vade değerleri yakın ve uzak vade olarak kategorize edilmiştir. Öncelik ise, bir teknolojinin ne kadar önemli olduğunu ve ne kadar hızlı bir şekilde geliştirilmesi veya uygulanması gerektiğini ifade eder. Bahse konu parametrelerin ayrı ayrı hesaplanmaları ile önceliklendirme çalışmasının kapsayıcılığı ile doğruluğu artırılmıştır.

Her bir Teknoloji Konusu için 7 ana kriter (Altyapı, Çift Kullanım, Dünyadaki Durum, İnsan Kaynağı, Kritiklik, Projelere Uygulama, Temin Riski) altında yer alan 20 alt öznitelik, 4 alt kriter (Temin Riski ana kriteri altındaki) üzerinden önceliklendirme değerlendirmesi yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Kriter Seti

5.2.1. DEMATEL

DEMATEL yöntemi, 1970'li yıllarda Cenevre Battelle Enstitüsü tarafından geliştirilmiş olup, karmaşık sistemlerdeki nedensel ilişkilerin ve kriterler arasındaki etkileşimlerin analiz edilmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, kriterler arasındaki neden-sonuç bağlantılarını görselleştirerek sistemin dinamiklerini daha iyi anlamaya olanak tanımaktadır [1].

Uzman görüşlerine dayalı olarak gerçekleştirilen DEMATEL analizi, matris yapıları ve çeşitli analiz teknikleri aracılığıyla sistemde yer alan bileşenler ya da kriterler arasındaki etkileşim düzeylerini ortaya koyar. Böylece, sistemdeki nedensellik ilişkileri belirlenebilir ve en kritik bileşen ya da kriterler tespit edilebilir.

Bu çalışmada, ilişkili olduğu değerlendirilen kriterler arasında DEMATEL yöntemi uygulanarak, kriterlerin birbirlerine göre önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu kapsamda, Ana Kriterler ve "Temin Riski" alt kriterlerinin önem ağırlıkları DEMATEL yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen Ana Kriter ve Alt Kriter önem ağırlıkları ise TOPSIS yöntemine girdi olarak kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında izlenen DEMATEL adımları ve kullanılan etki ölçeği Şekil 3'de gösterilmektedir.

İlişki Matrisinin Oluşturulması	Matrisin Analizi	Etkileşimlerin ve Önem Ağırlıklarının Belirlenmesi
Alan uzmanları tarafından ilişki matrisinin doldurulması	İlişki matrisinim normalize edilmiş matris, toplam ilişki ve toplam net ilişki matrisi gibi çeşitli matrislere dönüştürülmesi	Toplam net etki matrisinin, kriterler arası etki değerleri ve kriterlerin önem ağırlıklarını belirlemek için kullanılması
	Matrislerin kriterlerin önemini ve sistemdeki veya problemdeki nedensellik ilişkilerini analiz etmek için kullanılması	Yüksek toplam net etki değerine sahip kriterlerin diğer kriterlere daha fazla etkileyen ve daha önemli olan kriterler olarak tespiti
		Düşük toplam net etki değerine sahip kriterlerin ise diğer kriterlerden daha fazla etkilenen ve daha az önemli olan kriterler olarak tespiti



Şekil 3. DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki Ölçeği ve DEMATEL Adımları

5.2.2. AHP

AHP, karmaşık karar verme süreçlerini çözümlemek amacıyla 1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [2]. Bu yöntem, çok sayıda kriter ve alternatifin sistematik bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak en uygun seçeneğin belirlenmesine katkı sunar. AHP'nin temel yaklaşımı, karmaşık karar problemini hiyerarşik bir yapıya dönüştürmek ve bu yapıdaki unsurları ikili karşılaştırmalarla analiz etmektir.

Bu çalışmada, OTAĞ analizleri kapsamında birbirleriyle ilişkili olmayan kriterler altında yer alan özniteliklerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde AHP yöntemi tercih edilmiştir. AHP sürecinde izlenen adımlar ise Şekil 4'te detaylı olarak sunulmaktadır.

1 Hiyerarşik Yapı	2 İkili Karşılaştırmalar	3 Öncelik Matrisleri	4 Ağırlıklandırma	5 Tutarlılık Kontrolü
Kriterler ve alternatiflerin hiyerarşik bir yapıya yerleştirilmesi	İkili karşılaştırmalar için Tablo 2. sunulan ölçek kulanır	Karşılaştırmalardan elde edilen bilgilerle her kriter için bir öncelik matrisi oluşturulması	Her kriterin ve alternatifin genel önem derecesinin hesaplanması	Tutarsızlık değeri

Şekil 4. AHP Yöntemi Adımları

AHP yönteminde ikili karşılaştırmalar için kullanılan önem ölçeği Tablo 2'de detaylı biçimde yer almaktadır.

Tablo 2. AHP Yönteminde Kullanılan Önem Ölçeği

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önem	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunmaktadır.
3	Orta derecede önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine orta derecede tercih ettirmektedir.
5	Kuvvetli düzeyde önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine kuvvetli bir şekilde tercih ettirmektedir.
7	Çok kuvvetli düzeyde önem	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih ediliyor ve uygulamada baskınlığı rahatlıkla görülür.
9	Aşırı düzeyde önem	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar büyük bir güvenliğe sahiptir.
2, 4, 6, 8	Ortalama değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanmak üzere iki ardışık yargı arasına düşen değerdir.

5.2.3. TOPSIS

TOPSIS, çok kriterli karar verme yöntemleri arasında en sık tercih edilenlerden biridir. 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen bu yöntem, alternatifleri ideal çözüme ve ideal olmayan çözüme olan uzaklıklarına göre değerlendirerek sıralar [3]. TOPSIS yönteminin uygulanış adımları Şekil 5'te gösterilmektedir.

1 Karar Matrisinin Oluşturulması	2 Karar Matrisinin Normalize Edilmesi	3 Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Oluşturulması	4 İdeal ve İdeal Olmayan Çözümlerin Belirlenmesi	5 Alternatiflerin İdeal ve İdeal Olmayan Çözüme Olan Uzaklıklarının Hesaplanması	6 Alternatiflerin Sıralanması
Alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi	Her bir kriter için 0 ile 1 arasında değerlerin eldesi	Her bir alternatif için her bir kritere göre ağırlıklı değerlerin eldesi	İdeal çözüm, her bir kriter için en iyi değere sahip olan alternatiftir.	Her bir alternatif için ideal çözüme ve ideal olmayan çözüme olan uzaklıkların hesaplanması.	İdeal çözüme en yakın ve ideal olmayan çözümden en uzak olan alternatif en iyi alternatif olarak seçilir.

Şekil 5. TOPSIS Adımları

Bu çalışmada, ana kriterler, alt kriterler ve öznitelik ağırlıkları TOPSIS yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve teknoloji konuları, pozitif ve negatif ideal konu vektörleri referans alınarak sıralanmıştır. Sıralama sonucunda elde edilen vade puanlarına göre konular sınıflandırılmıştır. Vade puanı hesaplanmış olan konular, geçmiş OTAĞ'larda kullanılan histogram içerisinde kullanılan normal dağılım yerine kesme vektörü belirlenmiş olan sınır değere göre sınıflandırılmıştır. Bu kesme vektörü, konuları vade puanlarına göre "yakın vade" ve "uzak vade" olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Kesme vektörünün öznitelik değerleri, bir konunun yakın vadede değerlendirilmesi için gereken asgari öznitelik düzeylerine göre uzman görüşüyle tanımlanmıştır. Yakın ve uzak vadeye ait konular, kendi grupları içerisinde öncelik puanlarına göre azalan şekilde sıralanmıştır.

Uzman görüşüne olan bağımlılığı azaltmak ve daha kapsamlı, objektif ve tutarlı bir karar süreci oluşturmak amacıyla, AHP, DEMATEL ve TOPSIS yöntemleri bir arada kullanılarak hibrit bir karar modeli geliştirilmiştir. Bu yönteme yönelik gerçekleştirilen temel iyileştirmeler aşağıda açıklamalarıyla birlikte sunulmuştur:

- **Vade ve Öncelik Düzeylerinin Belirlenmesi:** Teknoloji konuları, çalışma vadeleri ve öncelik düzeylerine göre farklı ağırlık kümeleriyle değerlendirilmiştir. Bu sayede daha şeffaf ve izlenebilir bir süreç oluşturulmuştur.
- **Kapsamlılık:** AHP yöntemi, kriterler arasındaki ikili karşılaştırmalara dayanır. DEMATEL yöntemi ise kriterler arasındaki karşılıklı etkileşimleri dikkate alır. Her iki yöntemin birlikte kullanılması, kriterler arası karmaşık ilişkilerin daha iyi anlaşılmasını sağlar.
- **Tutarlılık:** TOPSIS yöntemi, alternatifleri ideal çözüme göre sıralayarak daha doğru ve tutarlı kararlar alınmasını sağlar.
- **Objektiflik:** Önceden uzman görüşüne ihtiyaç duyulan vade belirleme ve öncelik puanı iyileştirme süreçleri, geliştirilen metodoloji sayesinde otomatik hale gelmiştir. Bu süreçte referans vade vektörü kullanılarak konular analitik biçimde sınıflandırılmıştır.

5.3. Önceliklendirme Kriterleri

Batarya OTAĞ'ında yer alan teknoloji konuları özgün önceliklendirme metodolojisi kullanılarak konuların yakın ve uzak vadede kazanımları doğrultusunda sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sürecinin ardından, her OÇG'ye ait teknoloji konularının öncelik ve vade puanlarının aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sektördeki teknolojik yönelimleri belirlemek ve geleceğe dönük stratejik planlamalara ışık tutmak açısından önemli bir kaynak niteliğindedir. SSB OTAĞ çalışmaları kapsamında kullanılan değerlendirme kriterlerine ilişkin ayrıntılar Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Değerlendirme Kriter Seti

Değerlendirme Kriterleri	Açıklamalar
Kritiklik	• Ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknolojidir. • Kritik bir teknolojidir, kazanılmasının teknoloji yetkinliğine önemli katkısı olacaktır. • Kritik bir teknoloji değildir.
Dünyadaki Durum	• Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olduğu teknolojidir. • Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olmadığı teknolojidir. • Ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı teknolojiler arasındadır. • Ömür devrinin sonlarında, gelişime açık olmayan bir teknolojidir.
İnsan Kaynağı	• Yetişmiş insan gücü bulunmaktadır. • Yetişmiş insan gücü yetersizdir. • Yetişmiş insan gücü yoktur.
Altyapı	• İlgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcuttur. • Benzer ve tamamlayıcı teknolojilere ilişkin altyapı mevcuttur. • Temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı ve araştırma merkezi gibi altyapılar mevcuttur. • Ulusal herhangi bir altyapı bulunmamaktadır.
Çift Kullanım	• Teknoloji çift amaçlı olarak kullanılmaktadır. • Teknolojinin çift amaçlı olarak kullanım imkanı vardır. • Teknolojinin çift amaçlı olarak kullanım imkanı yoktur.
Projelere Uygulama	• Projelerde kullanılacaktır. • Projelerde kullanım imkanı vardır. • Projelerde kullanım imkanı yoktur.
Temin Riski	• Uluslararası anlaşmalarla transferi kontrol altına alınmıştır (FTKR, NPT vb.). • Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir. • Üretici tek kaynaktır. • Temin süresi uzundur.

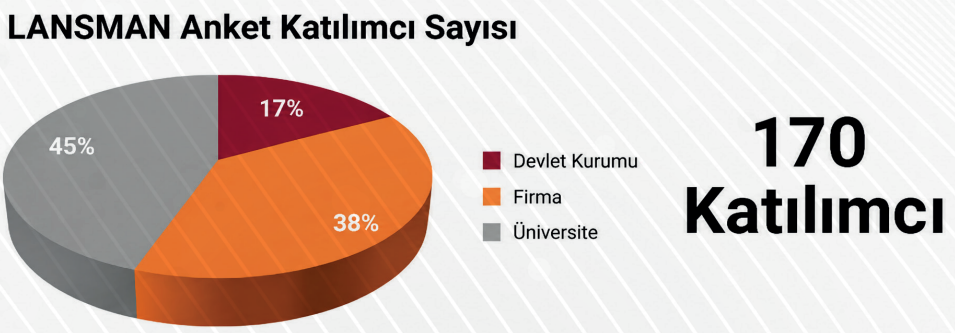
Sıralama sonucunda belirlenmiş olan vade puanlarına göre konular referans vade kesme noktasına göre yakın ve uzak olmak üzere sınıflandırılmıştır.

6. BATARYA OTAĞ FAALİYETLERİ

6.1. Lansman Toplantısı

Savunma sanayiinde dışa bağımlılığın azaltılması ve yerli güç sistemlerinin kritik bir bileşeni olan batarya teknolojilerinde milli bir ekosistem oluşturulması amacıyla, Savunma Sanayii Başkanlığı (SSB) liderliğinde başlatılan "Batarya Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ)" faaliyetlerinin resmi başlangıcı, 10 Eylül 2025 tarihinde gerçekleştirilen Lansman Toplantısı ile yapılmıştır.

SSB Nuri Demirağ Toplantı Salonu'nda düzenlenen bu geniş kapsamlı organizasyon; askeri ve sivil kamu kurumlarından, ilgili sektör temsilcilerinden ve akademi dünyasından yaklaşık 400 seçkin katılımcının iştirakiyle icra edilmiştir (Şekil 6). 170 katılımcı ise lansman sırasında gerçekleştirilen anketi doldurarak OÇG'lere kayıt olma isteklerini bildirmişlerdir. Toplantı, Türkiye'nin enerji depolama çözümlerindeki mevcut teknolojik yetkinliğinin (TRL/THS seviyeleri) tespiti ve gelecek vizyonunun ortak bir akılla kurgulanması adına stratejik bir zemin teşkil etmiştir.



Şekil 6. Batarya OTAĞ Lansmanı Anket Katılımcı Sayısı

Lansman süreci, SSB'nin açılış ve vizyon sunumuyla başlamış; ardından OTAĞ Lideri TUSAŞ tarafından gerçekleştirilen kapsamlı metodoloji sunumu ile devam etmiştir. TUSAŞ tarafından çalışma gruplarının hiyerarşik yapısı, Batarya Teknolojileri Yol Haritasının oluşturulma aşamaları aktarılmıştır. Toplantının teknik oturumlar bölümünde ise sürecin lokomotif gücünü oluşturacak olan OÇG liderleri kendi alanlarına yönelik tanıtıcı sunumlarını gerçekleştirmiş ve ekosistemden beklentilerini dile getirmişlerdir.

OÇG-1 Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm: TÜBİTAK RUTE ve İnönü Üniversitesi liderliğinde, elektrokimyasal hücre bileşenlerinden döngüsel ekonomi süreçlerine kadar olan teknik kapsam paylaşılmıştır.

OÇG-2 Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon: ASPİLSAN Enerji ve Gebze Teknik Üniversitesi liderliğinde; batarya yönetim sistemleri (BMS), kontrol algoritmaları, termal yönetim sistemleri, paketleme mimarisi, platform entegrasyonu, test ve sertifikasyon odaklı hedefler vurgulanmıştır.

Lansman toplantısının çıktı odaklılığını sağlamak adına tüm katılımcılarla aşağıda yer alan dokümantasyon setlerini kullanabilecekleri QR kod oluşturulmuş ve toplantı süresince paylaşılmıştır. Lansman sonrası tüm katılımcılara ve paydaşlara aşağıdaki formlar mail atılarak sürece katkı sağlamaları beklenmiştir.

Katılımcı Bilgi Formları: Mevcut yetenek envanterinin ve insan kaynağı haritasının çıkarılması.

Konu Öneri Formları: Yakın ve uzak vadede çalışılması planlanan Ar-Ge ve Ür-Ge başlıklarının toplanması.

Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler (GZFT, ing: SWOT) Analiz Formları: Ulusal batarya ekosisteminin Güçlü ve Zayıf yönleri ile karşı karşıya olduğu Fırsat ve Tehditlerin, sektör profesyonelleri gözüyle değerlendirilmesi.

6.2. Yönlendirme Komitesi

Yönlendirme Komitesi, Batarya Teknoloji Yol Haritası (TYH) hazırlama sürecinde SSB temsilcileri, OTAĞ lideri ve OÇG Liderlerinin katılımı ile tüm OÇG faaliyetlerini planlayan, yöneten, izleyen ve raporlayan bir komite olarak faaliyet göstermiştir. Batarya OTAĞ faaliyetlerinin kurgusal yönetiminden, önceliklendirme çalışmasından ve teknik çıktıların doğrulanmasından sorumludur. Komite, akademik ve sektörel yetkinliklerin Türkiye'nin savunma ve güvenlik vizyonuyla uyumlu hale getirilmesi noktasında köprü görevi görmüştür.

Yönlendirme Komitesi üyelerinin adları ile temsilcisi oldukları kurum ve kuruluş bilgisi Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. Yönlendirme Komitesi Üyeleri, Kurum ve Kuruluş Bilgileri

TÜRKİYE CUMHURİYETİ CUMHURBAŞKANLIĞI SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI	Damla GÜL İNCEÇAM Hilal DEMİRCİ Büşra BAYRAKTAR Gülsevin KODALOĞLU Mahmut BUDAK Osman Burak KOÇ
TÜRKHAVACILIK UZAYSANAYİİ	Dr. Mehmet Erdem ÇORAPÇIOĞLU Kevser Sinem ŞİMŞEK TÜRELİ Dr. Fatma ÇAMBAY KUBAN Mertcan ÖZÇELİK
TÜBİTAK RUTE	Dr. Türev SARIKURT Dr. Vildan BAYRAM KARAKUŞLU
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ	Prof. Dr. Serdar ALTIN
aspilsan Teknolojinin Enerjisi	Ümit BÜLBÜL Dr. Rasiha Nefise MUTLU
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

Yönlendirme Komitesi'nin en temel faaliyetlerinden biri, "Yetenek-İhtiyaç Matrisi"nin oluşturulmasıdır. Bu kapsamda; TUSAŞ, ASELSAN, ROKETSAN, ASPİLSAN Enerji, TÜBİTAK, STM, Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM), Genelkurmay Başkanlığı ve Milli Savunma Bakanlığı (MSB) gibi kritik ihtiyaç makamlarından gelen talepler titizlikle analiz edilmiştir. Kullanılan "Yetenek İhtiyaç Talep Formları" aracılığıyla toplanan veriler ışığında;

- Mevcut platformların (Denizaltı, torpido, dron, İHA, helikopter, kara araçları vb.) batarya gereksinimleri,
- Gelecek nesil sistemlerin enerji yoğunluğu ve güvenlik ihtiyaçları,
- Lojistik ve idame süreçlerindeki operasyonel kısıtlar, bir araya getirilerek konsolide edilmiştir.

Toplanan verilerin bir yol haritasına dönüştürülmesi amacıyla Yönlendirme Komitesi tarafından 26-27 Şubat 2026 ve 23-24 Mart 2026 tarihlerinde konu listeleri konsolide edilmiş ve kritik bir önceliklendirme çalışması icra edilmiştir. Güncel konu önerileri, alt teknoloji alanlarına (hücre kimyası, termal yönetim, BMS algoritmaları, paketleme vb.) bölünerek tasnif edilmiştir. Kritiklik derecesi, çift kullanım, insan kaynağı vb. (Tablo 3) parametreler değerlendirilerek önceliklendirme analizi yakın/uzak vade olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan bu analiz, ortaya çıkan alt teknoloji alanları ile hangi alt teknolojilere yatırım yapılacağını, hangi projelerin SSB tarafından desteklenme potansiyeli taşıdığını ve ulusal kaynakların batarya ekosisteminde nasıl dağıtılacağını belirleyen en üst düzey referans noktasıdır.

6.3. Odak Çalışma Grupları

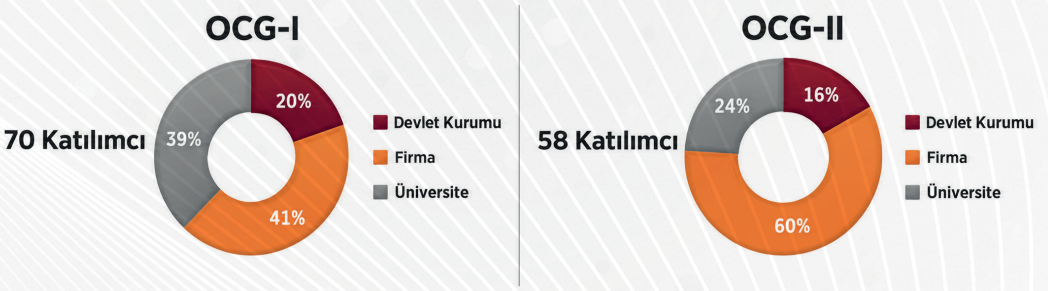
Batarya Teknolojileri OTAĞ yapısı, teknolojik derinliği sağlamak ve uzmanlık alanlarını verimli yönetmek amacıyla iki ana çalışma grubuna ayrılmıştır. Bu gruplar, hammadde seviyesinden nihai sistem entegrasyonuna kadar olan değer zincirini bütünsel bir yaklaşımla ele almaktadır.

6.4. I. OÇG Toplantısı

Lansman sonrası toplanan ilk teknik verilerin değerlendirildiği ve ekosistem paydaşlarının somut önerilerini sunduğu ilk seri toplantılar, 04-05 Aralık 2025 tarihlerinde çevrimiçi (online) olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7).

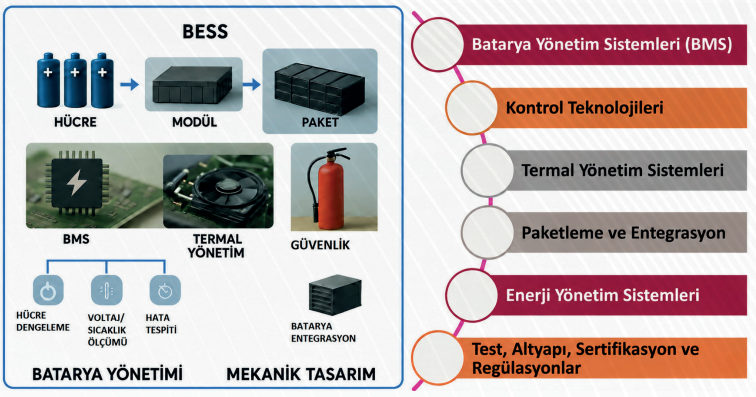
- **OÇG-1 Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm:** 04.12.2025 tarihinde düzenlenen oturuma 70 sektör temsilcisi ve akademisyen iştirak etmiştir. Toplantıda, hücre kimyası (Li-iyon, NMC, LFP, LTO, Katı-hal bataryalar, Silikon Karbon vb. anot çalışmaları), yerli elektrolit geliştirme ve kritik malzemelerin geri kazanımı odaklı 20 farklı teknik sunum icra edilmiştir.
- **OÇG-2 BMS, Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon:** 04-05.12.2025 tarihlerinde iki güne yayılan oturumlarda 58 katılımcı yer almıştır. Batarya yönetim sistemleri, kontrol teknolojileri, termal yönetim sistemleri, paketleme ve entegrasyon teknolojileri, enerji yönetim sistemleri, test, altyapı, sertifikasyon ve regülasyon başlıklarına dair 27 özgün konu önerisi sunulmuştur.

Her iki grupta da katılımcılara 5 dakikalık süre tanınarak önerilerin özlü, veri odaklı ve hedefe yönelik paylaşılması sağlanmıştır.



Şekil 7. I. OÇG Katılımcı Dağılımları

Batarya yönetim sistemleri (BMS) ve enerji depolama teknolojileri, çok katmanlı ve disiplinler arası bir yapıya sahip olup; ölçüm, kontrol, mimari tasarım, termal yönetim, paketleme, sistem entegrasyonu ve regülasyon boyutlarını kapsayan bütüncül bir yaklaşım içerisinde değerlendirilmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Batarya Sistemi Kritik Bileşenleri

Gelen konu önerileri doğrultusunda belirlenen alt konu başlıkları aşağıda verilen Tablo 5 ve Tablo 6'daki taksonomi kullanılarak gruplandırılmıştır. Oluşturulan taksonomi, söz konusu teknolojilerin sistematik olarak sınıflandırılmasını ve analiz edilmesini amaçlamaktadır.

Tablo 5. Batarya Malzemeleri/ Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm Taksonomisi

1. Batarya Malzemeleri/Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm Taksonomi Başlığı ve Alt Teknoloji Kırılımı
1.1 Hücre Malzemeleri
1.1.1. Elektrotlar
1.1.1.1. Anot
1.1.1.2. Katot
1.1.2. Elektrolitler
1.1.2.1.Sıvı
1.1.2.2. Jel, Polimer
1.1.3. Diğer Bileşenler
1.1.3.1. Ayırıcılar
1.1.3.2. Bağlayıcılar
1.1.3.3. Akım Toplayıcılar
1.1.3.4. Kutu, Kapak
1.2 Hücre Üretim Teknolojileri
1.2.1. Hücre Tasarımı
1.2.2. Hücre Geometrileri
1.2.3. Üretim Proses Geliştirilmesi
1.2.4. Formasyon
1.3 Geri Dönüşüm
1.4 Rezerv Tip Batarya
1.5 Diğer

Tablo 6. Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon Taksonomisi

2. Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon Taksonomi Başlığı ve Alt Teknoloji Kırılımı
2.1 Fonksiyonel Teknolojiler
2.1.1. Ölçüm ve İzleme Teknolojileri
2.1.2. Koruma ve Güvenilirlik Sistemleri
2.1.3. Enerji Dağıtımı ve Performans Optimizasyonu
2.1.4. İletişim ve Veri Yönetimi
2.2 Mimari Teknolojiler
2.2.1. Merkezi Mimari Yapılar
2.2.2. Dağıtık Mimari Yapılar
2.2.3. Hibrit Mimari Yapılar
2.2.4. Modüler Mimari Yapılar
2.2.5. Kablosuz Mimari Yapılar
2.2.6. İkincil Kullanım ve Geri Dönüşüme Uygun Mimari Yapılar
2.3 Kontrol ve Algoritma Teknolojileri
2.3.1. SOC/SOH Tahmin Algoritmaları
2.3.2. Termal Yönetim Algoritmaları
2.3.3. Yapay Zeka Destekli Algoritmalar
2.3.4. Siber Güvenlik Algoritmaları
2.3.5. Arıza Tespit, Kestirimci Bakım ve Optimizasyon Algoritmaları
2.3.6. Uzaktan Erişim ve Kontrol Teknolojileri
2.4 Soğutma ve Termal Yönetim Teknolojileri
2.4.1. Yeni Malzeme Teknolojileri
2.4.2. Aktif ve/veya Pasif Soğutma Teknolojileri
2.5 Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri
2.5.1. Hücreden Modüle – Modülden Pakete Tasarım Yaklaşımları
2.5.2. Hafif, Kompakt Yapısal Entegre Tasarımlar
2.6 Enerji Yönetim Sistemi Teknolojileri
2.6.1. Akıllı Şebeke Entegrasyon Teknolojileri
2.6.2. V2Grid Entegrasyon Teknolojileri
2.7 Test, Altyapı, Sertifikasyon ve Regülasyonlar
2.7.1. Test ve Altyapı Teknolojileri
2.7.2. Sertifikasyon ve Regülasyonlar
2.8 Diğer

6.5. II. OÇG Toplantısı

Mart 2026 tarihinde Yönlendirme Komitesi tarafından gerçekleştirilen önceliklendirme kararlarının teknik olarak detaylandırılması ve yeni görüşlerin değerlendirilmesi amacıyla düzenlenen 2. OÇG Toplantıları başarıyla tamamlanmıştır. Toplantılar, Odak Çalışma Grupları özelinde aşağıdaki takvim ve içerik planı ile gerçekleştirilmiştir.

- **OÇG-1 Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojisi ve Geri Dönüşüm:** 20 Nisan 2026 tarihinde icra edilen toplantıda, hücre kimyasından geri dönüşüm süreçlerine kadar uzanan 42 farklı teknoloji konusu değerlendirilmiştir.
- **OÇG-2 BMS, Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon:** 21 Nisan 2026 tarihinde düzenlenen oturumda ise batarya yönetim sistemleri, kontrol algoritmaları, termal yönetim sistemleri, paketleme, platform entegrasyonu, test ve sertifikasyon odaklı 23 teknoloji konusu katılımcılar ile birlikte analiz edilmiştir.

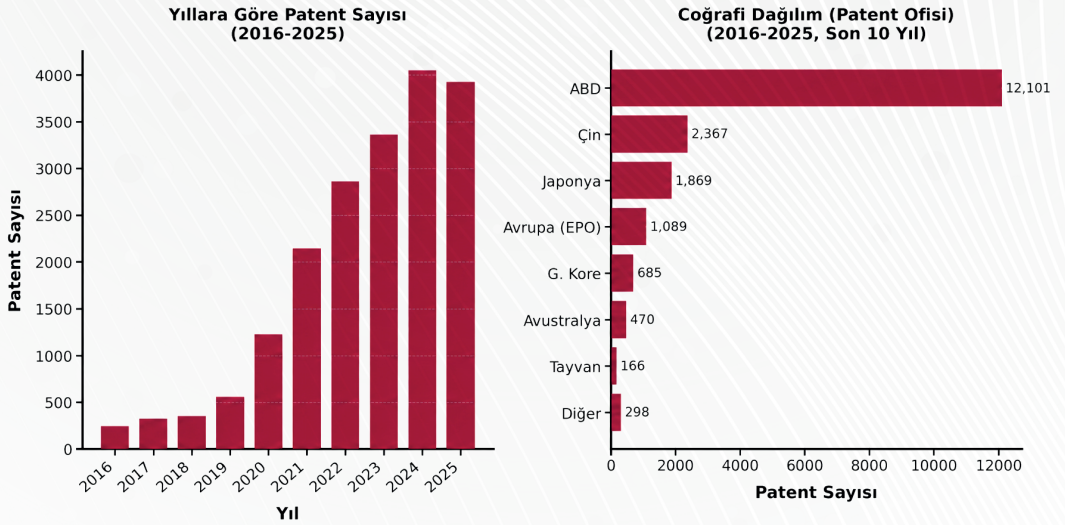
Toplantılar kapsamında her bir teknoloji konusu, belirlenen değerlendirme kriterlerine göre katılımcı paydaşların görüşlerine sunulmuş ve analiz edilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda Yönlendirme Komitesi ile nihai önceliklendirme çalışması tamamlanmış ve teknoloji başlıkları, ulusal ihtiyaçların aciliyetine göre yakın ve uzak vade perspektifinde stratejik olarak sıralanmıştır.

Bu çalışma ile Türkiye'nin gelecekteki enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamak adına devlet kurumları, özel sektör, üniversiteler ve askeri kurumların ortak sinerjisiyle yürütülecek projelerin temelleri atılmıştır. Elde edilen çıktılar yerli ve milli batarya ekosisteminin geliştirilmesine yönelik somut adımların başlatılması için bir yol haritasına dönüştürülmüştür.

7. ODAK ÇALIŞMALARINDA ELE ALINAN TEKNOLOJİLER

7.1. Dünyada Mevcut Durum ve Teknoloji Eğilimleri

Batarya teknolojileri, 2010'lu yıllardan itibaren küresel enerji patentlemesinin en hızlı büyüyen alanı haline gelmiştir. Avrupa Patent Ofisi (EPO) ve Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2020 tarihli ortak çalışmasına göre 2005-2018 döneminde batarya ve diğer elektrik depolama teknolojilerindeki patentleme faaliyeti dünya genelinde yılda ortalama %14 büyümüş olup bu oran tüm teknoloji alanlarının ortalamasının dört katına karşılık gelmektedir [4]. Aynı çalışmaya göre 2000 yılından itibaren dünya genelinde elektrik depolama alanında 65.000'in üzerinde uluslararası patent ailesi başvurusu yapılmış olup yıllık başvuru sayısı 2005'te yaklaşık 1.500 iken 2018'de 7.000'i aşmıştır. Bu patentlerin yaklaşık %90'ını bataryalar oluşturmakta, artışın büyük bölümü tüketici elektroniği ve elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryalardaki ilerlemelerden kaynaklanmaktadır. Bu dönemde ABD, batarya teknolojilerine ilişkin uluslararası patent başvuru sayısı bakımından Japonya, Güney Kore, Avrupa ve Çin'in ardından beşinci sırada yer almaktadır. Bu ivme 2020'li yıllarda daha da belirginleşmiştir ve IEA'nın 2026 tarihli raporuna göre 2023 yılında bataryalar tüm enerji patentlerinin %40'ını oluşturmuş olup bu payın 2024-2025 ön verilerine göre daha da arttığı öngörülmektedir. [5] [6] [7]

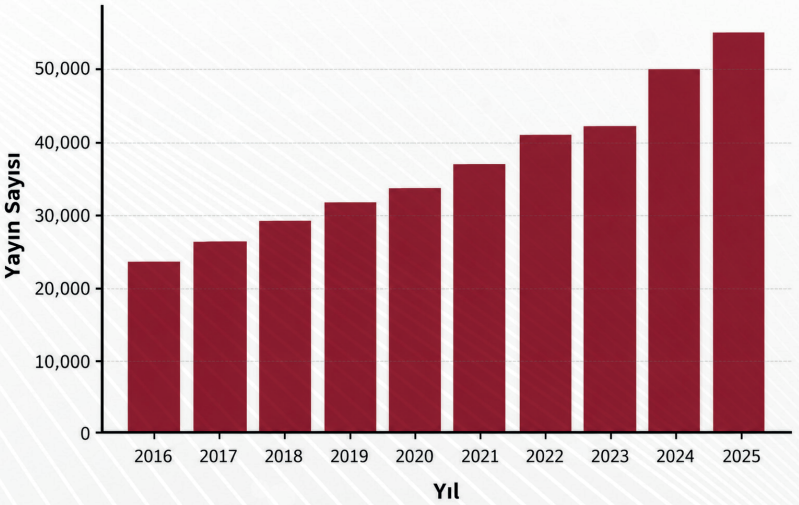


Şekil 9. 2016-2025 döneminde "batarya" kelimesi geçen patentlerin analizi

Şekil 9'da sunulan coğrafi dağılım ve patent sayıları, Google Patents veritabanı üzerinden patentin yayımlandığı ofis (jurisdiction) bazında yapılan bir sorgulamayı yansıtmakta olup, EPO/IEA (2020) çalışmasındaki başvuru sahibinin menşe ülkesi (priority country) bazlı analiz ile doğrudan karşılaştırılabilir değildir. USPTO'nun yüksek belge hacmi, büyük ölçüde yabancı menşeli şirketlerin ABD pazarına yönelik paralel başvurularından ve başvuru/tescil belgelerinin ayrı ayrı yayımlanmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 9'da sol panelde görüldüğü üzere, 2016-2019 arasında yıllık patent sayısı 250 ile 550 arasında görece durağan bir seyir izlemiş, ancak 2019'dan itibaren belirgin bir ivmelenme başlamıştır. Yine aynı verilere göre 2020 yılında patent sayısı bir önceki yıla göre yaklaşık iki katına çıkarak 1.227'ye ulaşmış, bu artış 2021'de 2.141'e, 2022'de 2.862'ye, 2023'te 3.361'e ve 2024'te 4.050'ye yükselerek dönemin zirvesini oluşturmuştur. 2025 yılına ait 3.925 rakamındaki görece hafif gerileme, gerçek bir yavaşlamadan çok patent başvurularının yayımlanmasındaki on iki ila on sekiz aylık gecikmeden kaynaklanmaktadır ve önümüzdeki dönemde yukarı yönlü revize edilmesi beklenmektedir. Sağ panelde sunulan coğrafi dağılıma göre, incelenen 19.045 patentin %63'ü ABD Patent Ofisi, %12'si Çin, %10'u Japonya, %6'sı Avrupa Patent Ofisi ve %4'ü Güney Kore patent ofislerinde yayımlanmıştır. Ancak bu dağılımın, başvuru sahibinin gerçek menşe ülkesinden ziyade patent başvurusunun gerçekleştirildiği veya patentin yayımlandığı ofisi yansıtabileceği dikkate alınmalıdır. Nitekim çok uluslu batarya üreticileri, küresel ölçekte fikrî mülkiyet koruması sağlamak amacıyla kendi ülkelerindeki başvurularına ek olarak ABD gibi önemli pazar ve teknoloji merkezlerinde de patent başvurularında bulunabilmektedir. Bu nedenle söz konusu tablonun, teknolojik yenilikçiliğin coğrafi dağılımını tek başına temsil etmekten ziyade, uluslararası patent başvurusu ve yayımlama tercihlerinden de etkilendiği değerlendirilmelidir.

Bu bulguların, önceki bölümde aktarılan Avrupa Patent Ofisi ve Uluslararası Enerji Ajansı verileriyle birlikte ele alınması, ülkelerin batarya teknolojilerindeki patent ve teknolojik yetkinlik konumlarının daha sağlıklı değerlendirilmesini sağlayacaktır. 2010 sonrası en dramatik yükselişi gösteren ülke Çin olmuştur. Katot malzemesi patentlerinde Çin'in payı 2010'da yalnızca %4 iken 2022'de %40'a yaklaşmıştır. Güncel raporlar, Çin, Kore ve Japonya'nın lityum-iyon batarya patentlerinin başlıca kaynağı olmaya devam ettiğini, Çin'in payının ise son on yılda keskin biçimde arttığını göstermektedir [4] [5]. EPO-IEA raporuna göre 2018 yılında en fazla patent başvurusu yapan ilk 25 kuruluşun 13'ü Japon (Panasonic ve Toyota dahil), 3'ü Kore (Samsung, LG ve Hyundai) firmasıdır. Güncel IEA verileri, Japonya'nın batarya teknolojilerindeki uzmanlaşmasını sürdürürken perovskit güneş hücreleri, hidrojen bazlı yakıtlar ve füzyon gibi diğer ileri teknoloji alanlarında da faaliyetlerini geliştirdiğine işaret etmektedir.

ABD ise 2025 yılında küresel enerji teknolojileri risk sermayesi (VC) yatırımlarının yaklaşık yarısını çekerek bu alandaki güçlü konumunu korumakta ve geniş bir teknoloji yelpazesinde yüksek düzeyde Ar-Ge ve yatırım kapasitesi sergilemektedir. LFP kimyası bu açıdan, teknolojik gelişim ile ticarileşme ve üretim kapasitesinin her zaman aynı coğrafyada yoğunlaşmadığını gösteren örneklerden biridir. LFP teknolojisinin temelinin 1990'lı yıllarda ABD'de atılması ve 2000'li yılların başında Kanada'da geliştirilmesinin ardından, fikrî mülkiyet koşulları ve üretim yetkinliklerinin gelişimiyle birlikte 2010'lu yıllarda LFP hücrelerinin seri üretimi özellikle Çin'de yoğunlaşmıştır. Temel LFP patentlerinin 2022 itibarıyla önemli ölçüde sona ermesi ise farklı coğrafyalarda LFP üretimine yönelik ilginin artmasını destekleyen unsurlardan biri olmuştur. [6]. Revize edilen AB verileri, Avrupa'nın kamu kaynaklı enerji Ar-Ge harcamalarında son yıllarda ABD ve Japonya'nın üzerinde bir seviyeye ulaşarak GSYİH'nın yaklaşık %0,08'ine karşılık gelen bir düzeye geldiğini göstermektedir. Avrupa merkezli start-up'ların küresel enerji teknolojileri risk sermayesi yatırımlarındaki payı da 2025 yılında yaklaşık %25'e yükselmiş; bu oran beş yıl önce %15 seviyesindeyken belirgin bir artış kaydetmiştir. Buna karşılık, büyük Avrupa ülkelerinde enerji teknolojilerine yönelik patent faaliyetlerinde son dönemde yavaşlama veya gerileme eğilimi gözlenmektedir [8].



Şekil 10. 2016-2025 döneminde "batarya" kelimesi geçen yayınların analizi

Şekil 10'da gösterildiği üzere, Web of Science veri tabanında "battery" anahtar kelimesiyle gerçekleştirilen taramada, 2016-2025 döneminde yıllık makale sayısının genel olarak istikrarlı bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. 2016 yılında yaklaşık 23.000 olan yıllık yayın sayısı, 2019 yılına kadar ortalama %8-9 düzeyinde yıllık büyüme göstererek 31.000'in üzerine çıkmıştır. 2020-2022 döneminde de artış eğilimi devam etmiş ve yıllık yayın sayısı yaklaşık 33.000 seviyesinden 41.000 seviyesine yükselmiştir. 2023 sonrasında ise yayın hacmindeki artışın belirginleştiği; 2024 yılında yaklaşık 50.000, 2025 yılında ise 55.000'e yaklaşan yayın sayısına ulaşıldığı görülmektedir. On yıllık dönemde toplam 367.444 makalenin yayımlanmış olması, batarya teknolojilerinin akademik araştırma gündemindeki ağırlığının giderek arttığına ve özellikle son yıllarda araştırma faaliyetlerinin hız kazandığına işaret etmektedir. Bu eğilim, önceki bölümde ele alınan patent verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, batarya teknolojilerinin hem akademik araştırma hem de teknolojik geliştirme faaliyetleri açısından artan bir hareketlilik sergilediğini göstermektedir. Patent faaliyetlerindeki artış ile akademik yayın hacmindeki büyümenin eş zamanlı gerçekleşmesi, sektördeki teknolojik gelişimin farklı araştırma ve inovasyon kanallarında birlikte ilerlediğine işaret etmektedir.

Batarya teknolojilerinde ise tek bir baskın kimyaya dayalı bir yapıdan ziyade, uygulama alanlarının gereksinimlerine göre farklılaşan birden fazla kimyanın birlikte geliştiği bir yapı öne çıkmaktadır. Sektör analizleri, sodyum-iyon bataryaların 2026 itibarıyla belirli araç uygulamalarında kullanılmaya başlamasıyla birlikte, farklı batarya teknolojilerinin birbirinin tamamen yerine geçmesinden ziyade farklı performans, maliyet ve kullanım gereksinimlerine göre bir arada gelişebileceğine işaret etmektedir [9].

Lityum Demir Fosfat'ın (LFP) kısa ve orta vadede pazardaki konumunun değişmeyeceği öngörülmektedir. LFP'nin bu üstün konumu, 500°C üzerindeki termal kaçak eşiği, 3.000 ile 10.000 arasında değişen şarj döngüsü ömrü ve üçlü kimyalara kıyasla yaklaşık %30 daha düşük malzeme maliyeti gibi üç yapısal avantaja dayanmaktadır [10] [11]. Bu sayede LFP, enerji depolama, ticari araçlar ve ana akım binek araçlarda varsayılan tercih haline gelmiştir. 2025 yılı Kasım ayında CATL, enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü açısından geliştirilmiş beşinci nesil LFP hücrelerini seri üretime aldığını Sichuan'da düzenlenen 2025 Dünya Güç Bataryası Konferansı'nda duyurmuştur [12].

Sodyum-iyon bataryalar ise laboratuvar çalışmalarından ticari uygulamalara geçiş sürecinde gelişimini sürdürmektedir. 1980'lerin başından itibaren araştırılan ve lityum-iyon bataryalara benzer temel elektrokimyasal prensiplere dayanan bu teknolojinin ticarileşme süreci, lityum-iyon teknolojisine kıyasla daha yavaş ilerlemiştir. Bununla birlikte, son dönemdeki teknolojik gelişmeler ve açıklanan yatırım planları, sodyum-iyon bataryaların farklı uygulama alanlarında ticari kullanım potansiyelinin arttığına işaret etmektedir. CATL, ikinci nesil sodyum-iyon batarya teknolojisini tanıtarak 2026'dan itibaren farklı sektörlerde ticari ölçekte kullanıma yönelik planlarını açıklamış; BYD ise elektrikli araçlar, şebeke ölçekli enerji depolama ve endüstriyel uygulamalara yönelik ilk sodyum-iyon batarya üretim tesisinin inşasına 2024 yılı Ocak ayında başladığını duyurmuştur [13]. Bu yatırımların başlıca itici gücü, soğuk iklimlerde batarya performansını iyileştirmek ve lityum fiyat oynaklığına olan bağımlılığı azaltmaktır. Buna karşın yüksek oranda optimize edilmiş ve düşük maliyetli lityum-iyon bataryalar, özellikle en güncel LFP teknolojileri, enerji yoğunluğu, tedarik zinciri olgunluğu ve maliyet açısından üstünlüğünü korumaya devam etmektedir. Sodyum-iyonun daha

eşit koşullarda rekabet edebilmesi için ya sürdürülebilir biçimde daha yüksek lityum fiyatlarına ya da enerji yoğunluğunu belirgin ölçüde artıran teknolojik ilerlemelere ihtiyaç vardır. Ölçek açısından bakıldığında ise mevcut sodyum-iyon hücre üretim kapasitesi lityum-iyon hücrelerinin yalnızca %1'inden biraz fazlasına denk gelmekte, 2030 için açıklanan projeler bile aynı yıl için taahhüt edilen lityum-iyon üretim kapasitesinin yalnızca yaklaşık %7'sini oluşturmaktadır [14].

Katı hal (solid-state) bataryalar konusunda da beklentiler yüksek olmakla birlikte henüz sahada doğrulanmamıştır. Bu teknoloji daha uzun menzil ve gelişmiş güvenlik vaadiyle yoğun ilgi ve yatırım çekmiş olsa da bu avantajlar henüz gerçek dünya uygulamalarında kanıtlanmış değildir. Sektördeki genel takvime göre katı hal bataryalar 2025'te Honda'nın pilot hattıyla gösterim üretimine girmekte, bunu 2027-2028 civarında premium otomotiv uygulamaları izlemektedir; Toyota Idemitsu Kosan ile 2028'de üretime başlamayı hedeflerken SK On takvimini 2029'a hızlandırmıştır ve daha geniş pazar benimsemesi üretimin ölçeklenmesiyle birlikte 2030'ların başında gerçekleşecektir [15] [16] [17]. Malzeme tarafındaki yol haritasında, sanayi projeksiyonlarına göre kısa vadede grafit ve hafif silikon katkılı grafit anotların kullanılmaya devam edilmesi, orta vadede yüksek silikonlu kompozit anotlara geçilmesi beklenmektedir. Uzun vadeli hedef ise grafitin (372 mAh/g) yaklaşık on katı teorik kapasiteye sahip (3.860 mAh/g) tam lityum-metal anotlara geçiştir; ancak bu geçişin önündeki temel engeller lityum dendrit oluşumu, kararsız katı elektrolit ara yüzeyi (SEI) ve hacimsel genleşme sorunlarıdır [18] [19]. Bu geçişin en büyük teknik engeli katı-katı arayüzünde ortaya çıkan yüksek iç dirençtir. Kimyasal olarak kısa vadede yüksek nikelli kimyalar (NMC, NCA) öne çıkarken uzun vadede lityum açısından zengin manganez bazlı katotlar ve enerji yoğunluğunu 600 Wh/kg üzerine taşıyabilecek kükürt katotlar hedeflenmektedir [20] [21] [22] [23]. Lityum-kükürt bataryalar da benzer bir yönelim olarak öne çıkmaktadır; bu teknoloji de sodyum-iyon ve katı hal bataryalarla birlikte 2030 civarında ticari konuşlandırmayı hedeflemektedir. Genel tabloda önümüzdeki yıllarda karşılaşılacak bataryaların daha güvenli, daha sürdürülebilir ve belirli uygulamalara daha uygun hale geleceği öngörülmektedir [24].

Savunma sanayii, sivil batarya pazarına kıyasla farklı önceliklere sahiptir; burada enerji yoğunluğu veya maliyetten çok yüksek güç yoğunluğu, uzun süreli kuru depolama kararlılığı ve aktivasyon anında kesintisiz güvenilirlik ön plana çıkmaktadır. Bu gereksinimler nedeniyle gümüş oksit bazlı birincil rezerv bataryalar, on yıllardır füze, torpido ve atmosfere yeniden giriş araçları gibi kritik uygulamalarda vazgeçilmez konumunu korumaktadır. Gümüş oksit-çinko (Ag_2O-Zn veya Zn-AgO) sistemleri, kuru halde bekletilip kullanım anından hemen önce elektrolit enjeksiyonuyla aktive edilen tek kullanımlık (bir seferlik) rezerv bataryalardır [25]. Bu sistemler pnömatik-hidrolik-elektrokimyasal bir mekanizmayla çalışır: uzaktan gönderilen elektriksel aktivasyon sinyali kontrollü bir patlamayı tetikler, oluşan gazlar elektroliti sıkıştırarak metalik bir diski patlatır ve elektrolit bir manifold aracılığıyla hücrelere dağıtılır [26]. Hawk, Harm, Sparrow, Trident II, Harpoon ve Standard Missile gibi füze programları ile Mk 12 atmosfere yeniden giriş aracı, halen birincil Ag-Zn bataryalarla güç almaktadır [27]. Bu bataryaların kuru depolamada 25 yılı aşan güvenilir performans sergilemesi, savunma sanayiinde tercih edilmelerinin başlıca nedenidir [28]. 1980'lerde savunma sanayiinde otomatik birincil batarya teknolojilerinde genel eğilim, gümüş-çinko bataryaların yerini termal batarya tasarımlarına bırakması yönünde olmuştur; ancak Standard Missile gibi bazı yüksek güç gerektiren sistemlerde gümüş-çinko bataryalar günümüzde de kullanılmaya devam etmektedir [27].

Gümüş oksit-alüminyum sistemleri ise özellikle ağır tip torpido (heavyweight torpedo) elektrikli tahrik sistemlerinde öne çıkmaktadır [29]. Fransız F21 ağır torpidosu, 10-500 metre derinlik aralığında çalışabilen ve 25-50 knot hız ile 50 kilometreyi aşan menzil sağlayan elektrikli tahrikini Ag_2O-Al birincil bataryasına dayandırmaktadır. İtalyan Black Shark ağır torpidosunun orijinal versiyonu da aynı kimyayı (Al-AgO) kullanmıştır ancak güncel Black Shark Advanced versiyonu artık lityum-polimer şarj edilebilir bataryaya geçmiştir [30] [31] [32]. Bu sistemlerde enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik çalışmalar sürmektedir ve geliştirilen bir Elektrolit Yenileme Yönetim Sistemi (Replenishment Electrolyte Management System, REMS) sayesinde belirli bir torpido uygulamasında Al-AgO bataryasının enerji yoğunluğu 100 Wh/kg'dan 200 Wh/kg'a çıkarılmış, bu da 1.200 W/kg güç yoğunluğu hedefiyle birlikte sistemin genel performans gereksinimlerini karşılamasını sağlamıştır [33] [34]. Güncel gelişmeler açısından dikkat çekici bir örnek, Hindistan merkezli HBL Engineering'in Savunma Araştırma ve Geliştirme Örgütü'ne (DRDO) bağlı Deniz Bilim ve Teknoloji Laboratuvarı ile iş birliği içinde yeni nesil ağır ve hafif torpidolar için gelişmiş Al-AgO batarya teknolojisi geliştirmesidir ve bu teknolojinin dünya genelinde yalnızca iki şirket tarafından üretilebildiği ve stratejik önemi nedeniyle küresel savunma sanayiinde en sıkı kontrol altındaki alanlardan biri olduğu belirtilmektedir [35] [36] [37].

Lityum-iyon bataryaların torpido uygulamalarında alternatif bir teknoloji olarak değerlendirilmesi

güncel eğilimlerden biridir. Bununla birlikte, incelenen fizibilite çalışmalarında Ag-Zn sistemlerinin enerji yoğunluğu bakımından lityum-iyon sistemleriyle rekabet edebildiği, lityum-iyon teknolojisinin öne çıkan avantajlarından birinin ise yeniden şarj edilebilirlik olduğu görülmektedir. Bu özellik, özellikle eğitim ve tatbikat amacıyla kullanılan yeniden kullanılabilir torpido uygulamalarında önem kazanmaktadır. Maliyet açısından değerlendirildiğinde, lityum-iyon bataryaların belirli bir çevrim sayısının üzerindeki kullanımlarda AgO-Zn sistemlerine kıyasla ekonomik avantaj sağlayabildiği; buna karşılık tek kullanımlık rezerv uygulamalarında gümüş bazlı sistemlerin uzun süreli depolama ve aktivasyon güvenilirliği gibi özellikleri nedeniyle kullanım alanını koruduğu görülmektedir.

7.1.1. OÇG 1 Değerlendirmesi

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum (Li) tabanlı şarj edilebilir batarya sistemlerinin gelişmesi ve mikroelektronik cihazlardan büyük ölçekli enerji depolama sistemlerine kadar genişleyen kullanım alanları, batarya bileşenleri ve üretim ekipmanlarının stratejik önemini artırmıştır. Küresel arz ve talepteki artışla birlikte, özellikle kritik batarya komponentlerinin üretiminde kullanılan hammaddeler, ileri malzemeler ve üretim teknolojileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Lityum pillere yönelik küresel talepteki artış, başta lityum olmak üzere temel batarya hammaddelerine yönelik ihtiyacı da artırmıştır. Lityum kaynaklarının ve bu kaynakların işlenmesine yönelik üretim kapasitesinin belirli coğrafyalarda yoğunlaşması, küresel tedarik zincirinde bölgesel yoğunlaşma ve tedarik çeşitliliği açısından değerlendirilmesi gereken bir yapı ortaya çıkarmaktadır. Bu çerçevede, Çin Halk Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı (MOFCOM) ve Genel Gümrük İdaresi'nin (GACC) 9 Ekim 2025 tarihinde ortaklaşa duyurduğu ve 8 Kasım 2025 itibarıyla yürürlüğe giren 58 Sayılı Duyuru kapsamındaki lityum batarya ihracat kontrolleri, batarya değer zincirinde yer alan hammaddeler ve bileşenlere ilişkin ticaret politikalarının küresel tedarik dinamikleri üzerindeki etkisinin önemini gösteren güncel gelişmelerden biri olarak değerlendirilebilir [38] [39] [40]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan Global Critical Minerals Outlook 2025 raporuna göre Çin, küresel LFP (Lityum Demir Fosfat) katot üretiminin yaklaşık %98'ini ve toplam batarya hücre üretim kapasitesinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Kritik minerallerin işlenmesinde ise mineral ve proses türüne bağlı olarak küresel kapasitenin yaklaşık %70 ile %95'i arasında değişen bir paya sahiptir. Bu veriler, batarya değer zincirinin belirli aşamalarında üretim ve işleme kapasitesinin coğrafi olarak yoğunlaştığına işaret etmektedir. [41]. Bu üretim ve işleme kapasitesindeki yoğunlaşma, enerji politikaları ve küresel tedarik dinamikleri açısından dikkate alınması gereken bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

IEA verilerine göre, küresel batarya pazarı 2025 yılı itibarıyla 180 milyar dolar hacmi aşmış olup, 2030 yılında 400 milyar doların üzerine çıkacağı öngörülmektedir. McKinsey analizleri ise 2030 yılına kadar küresel Lityum-iyon batarya talebinin 3,5 kat artacağını tahmin etmektedir. Sadece küresel LFP batarya pazarının 2034 yılında 72,76 milyar dolara ulaşacağı projeksiyonu hem ham madde arz güvenliğinin hem de yerli malzeme üretim kabiliyetlerinin önemini doğrulamaktadır.

Lityum rezervlerinin coğrafi olarak belirli bölgelerde yoğunlaşmasına karşın, bataryaların dünya genelinde yaygınlaşması, uzun vadede ikincil kaynakların önemini artırabilecek bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar, geri kazanılabilir lityum, nikel, kobalt, bakır ve diğer malzemeler açısından önemli bir ikincil kaynak potansiyeli taşımaktadır. Bu çerçevede, atık bataryaların etkin biçimde toplanması, işlenmesi ve geri kazanılan malzemelerin yeniden batarya değer zincirine kazandırılması, gelecekte hammadde tedarik çeşitliliğine katkı sağlayabilecek unsurlar arasında yer almaktadır.

Küresel üreticilerin, kullanım ömrünü tamamlayan bataryaların toplanması ve geri kazanım süreçlerine yönelik dikey entegrasyon modelleri geliştirmesi de bu alandaki dönüşümün göstergelerinden biridir. Kısa vadede birincil lityum kaynaklarının erişilebilirliği önemini korurken, uzun vadede geri dönüşüm, ikincil hammadde kullanımı ve ileri malzeme işleme teknolojilerindeki gelişmelerin batarya tedarik zincirlerinin yapısını ve rekabet koşullarını önemli ölçüde etkilemesi beklenmektedir. Sivil uygulamaların yanı sıra batarya teknolojileri, modern savunma sanayiinde kullanılan çeşitli platformların operasyonel performansını destekleyen önemli teknoloji bileşenlerinden biridir. Özellikle İnsansız Hava Araçları (İHA) ve Silahlı İnsansız Hava Araçlarında (SİHA) görev süresi, menzil ve faydalı yük kapasitesi gibi performans göstergeleri, platformun enerji depolama ve güç yönetimi altyapısının özellikleriyle yakından ilişkilidir. Hücre bileşenleri ile askeri performans parametreleri arasındaki ilişki matrisi Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Hücre Bileşeni – Askeri Performans İlişki Matrisi

Performans Parametresi	Belirleyici Hücre Bileşeni	Askerî Yansıma
İHA/SİHA Menzili	Katot/Anot enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Operasyonel etki alanı, görev süresi
Düşük Sıcaklık Performansı	Elektrolit formülasyonu; geniş sıcaklık katkıları (Wang vd., 2024)	Yüksek irtifa ve Arktik operasyonlar
Güvenlik (Termal Kaçak)	Seramik kaplı separatör + alev geciktirici (flame retardant) elektrolit	Personel güvenliği, platform sağkalımı
Hızlı Şarj	Anot mimarisi; Si-grafit kompozit	Operasyonel tempo, tekrar tahsis süresi
Raf Ömrü	SEI stabilitesi, elektrolit katkıları	Stratejik stok yönetimi
Mekanik Dayanım	Aramid nanofiber separatör	Balistik koruma, saha hasarına dayanım

Kısa ve orta vadede uygulanabilecek ticaret ve ihracat düzenlemeleri, küresel batarya tedarik zincirlerinde çeşitlendirme ve alternatif tedarik kaynaklarına yönelik eğilimleri destekleyebilecek unsurlar arasında değerlendirilmektedir. Uzun vadede ise birincil hammadde kaynaklarının sınırlılığı ve kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların giderek artması, ikincil kaynakların ve geri dönüşüm teknolojilerinin önemini artırabilir. Özellikle yüksek miktarda batarya kullanımının gerçekleştiği pazarlarda oluşacak atık batarya stoklarının, lityum, nikel, kobalt, bakır ve diğer kritik malzemeler açısından önemli bir ikincil kaynak potansiyeli oluşturması beklenmektedir. Bu dönüşüm, küresel batarya değer zincirinde yalnızca hammadde ve hücre üretiminin değil, ileri malzeme geliştirme, geri dönüşüm ve ikincil hammaddelerin yeniden kullanıma kazandırılması gibi alanların da önem kazanabileceğine işaret etmektedir.

Geleneksel pazar analizi modelleri (Grand View Research, 2026), küresel lityum-iyon hücre pazarının 2025 yılı itibarıyla 68,7 milyar dolar seviyesinde gerçekleştiğini ve %21,1'lik bir bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile 2033 yılına kadar 306,2 milyar dolara ulaşacağını öngörmektedir; ancak farklı pazar araştırma kuruluşlarının kapsam ve metodoloji farklılıkları nedeniyle bu tahminler $68-195 milyar (2025) ile $250-890 milyar (2033-2035) arasında geniş bir bantta değişmektedir [52] [53] [54] [55] [56]. Buna karşın, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve daha geniş kapsamlı endüstriyel veri konsolide raporları, küresel pazarın 2025 yılında 150 milyar dolar eşiğini aştığını ve yıllık bazda %20'nin üzerinde bir büyüme kaydettiğini göstermektedir [57]. Batarya pazarının gelecekteki hacmine dair küresel tahminler Tablo 8'de sunulmaktadır.

Tablo 8. Batarya Pazarının Gelecekteki Hacmine Dair Küresel Tahminler

Öngörülen Dönem Sonu Değeri / CAGR	2025 Yılı Pazar Hacmi (Milyar USD)	2026 Yılı Tahmini Pazar Hacmi (Milyar USD)	Kaynak
Belirtilmemiş / %20+ CAGR	—	183,6	[58]
Belirtilmemiş / %20+ CAGR	—	136,28	[58]
306,24 Milyar USD (2033) / %21,1 CAGR	68,66	80,03	[59]
Çok Boyutlu Sektörel Büyüme (Yıllık %20+ Artış)	>150,00	—	[57]

Tarihsel bazlı talep analizi, elektrokimyasal hücre uygulamalarında büyük bir segment kayması yaşandığını ortaya koymaktadır. 2015 yılında küresel batarya hücresi talebinin yaklaşık yarısını (%50) domine eden taşınabilir tüketici elektroniği segmenti, 2025 yılı itibarıyla toplam tüketimde %5'in altına gerilemiştir [57].

Hücre üretim maliyetlerindeki düşüş, pazar hareketliliğini hızlandıran en önemli katalizör konumundadır. 2025 yılında küresel ortalama batarya paketi fiyatları, gelişen hücre üretim teknolojileri ve optimize edilen elektrokimyasal tasarımlar sayesinde %8 oranında gerilemiştir [60]. Enerji depolama sistemleri özelindeki hücre maliyetleri ise 2020 yılına kıyasla üçte bir oranına düşmüştür [57] [60]

Hücre kimyalarındaki rekabet, bu fiyat düşüşlerinin merkezinde yer almaktadır. LFP hücrelerin fiyatları 2025 yılında %15'in üzerinde bir düşüş kaydederken, NMC hücrelerdeki fiyat gerilemesi %5'in altında kalmıştır [57]. Bu durum LFP kimyasına sahip hücreleri, nikel tabanlı muadillerine kıyasla ortalama %40 daha ekonomik hale getirmiştir. Sonuç olarak LFP, küresel elektrikli araç kapasitesinin %50'sinden fazlasını, şebeke depolama uygulamalarının ise %90'ından fazlasını ele geçirmiştir [57]. Ancak, aşırı fiyat rekabeti nedeniyle birçok LFP hücre üreticisinin işletme zararı açıklaması, orta vadede finansal dayanıklılığı düşük firmaların elenerek pazarın az sayıda büyük oyuncunun elinde konsolide olması (toplanması) ihtimalini artırmaktadır [57].

Coğrafi üretim dağılımı açısından, küresel lityum-iyon hücre üretim kapasitesinin belirli merkezlerde yoğunlaştığı görülmektedir. 2025 yılı itibarıyla Çin Halk Cumhuriyeti, küresel lityum-iyon hücre üretiminin %80'inden fazlasını gerçekleştiren başlıca üretim merkezi konumundadır. Küresel üretimin kalan bölümü ise ağırlıklı olarak Güney Kore ve Japonya merkezli üreticilerin yanı sıra farklı bölgesel üretim merkezleri tarafından karşılanmaktadır [57] [61].

ABD ve Avrupa Birliği'nde yerel üretim kapasitesinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürerken, Çin'deki üretim maliyetlerinin ABD'ye kıyasla yaklaşık %30, Avrupa'ya kıyasla ise yaklaşık %35 daha düşük olması, küresel ölçekte farklı maliyet yapılarının bulunduğuna işaret etmektedir [57]. Ayrıca IEA verileri, günümüz batarya üretiminde yüksek üretim verimliliği ve otomasyon düzeylerinin giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir. %90'ın üzerindeki üretim verimliliği seviyelerine ulaşılması ve otomasyon altyapısının geliştirilmesi, yeni kurulan bölgesel ve yerli tesislerde zaman içinde olgunlaşması beklenen üretim yetkinlikleri arasında değerlendirilebilir [14].

Lityum rezervlerinin küresel ölçekte belirli coğrafyalarda yoğunlaşması ve bazı üretim merkezlerinin hem lityum işleme hem de hücre üretiminde yüksek kapasiteye sahip olması, batarya tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesi açısından politika yapıcıların dikkatle izlediği bir konu haline gelmiştir. Bununla birlikte, lityum tabanlı bataryaların dünya genelinde yaygınlaşması, orta ve uzun vadede kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların önemli miktarda ikincil hammadde kaynağı oluşturabileceğine işaret etmektedir. Bu gelişme, batarya geri dönüşümünün yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda hammadde verimliliği ve tedarik çeşitliliği açısından da önem kazanacağını göstermektedir. Lityum-iyon bataryaların geri dönüşüm süreçleri; alüminyum ve bakır gibi metallerden grafit ve batarya kimyasına bağlı olarak geri kazanılabilen diğer değerli bileşenlere kadar geniş bir malzeme grubunu kapsamaktadır. Bu yönüyle geri dönüşüm sektörü, enerji ve savunma uygulamalarında ihtiyaç duyulan çeşitli hammaddelerin yeniden ekonomiye kazandırılmasına ve kaynak kullanımının verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayabilecek önemli bir alan olarak değerlendirilmektedir.

Geri dönüşüm ekosisteminde her bir batarya bileşeni, ayrı bir uzmanlık ve proses alanıdır. Söküm işlemlerinde ilk olarak çelik dış muhafazalar, bakır ve alüminyum akım toplayıcılar ile separatör membranların ayrıştırılması temel operasyondur. Bu ön işlemlerin ardından geriye kalan katot ve anot ağırlıklı kısım, geri dönüşüm tesislerinde proses edilmek üzere "siyah kütle" (black mass) olarak adlandırılan ara ürüne dönüştürülmektedir. Geri dönüşüm ekosisteminde her bir batarya bileşeni, ayrı bir uzmanlık ve proses alanı gerektirmektedir. Endüstriyel uygulamalarda tipik akış; güvenli boşaltma/deaktivasyon, pack/modül/hücre düzeyinde söküm, kontrollü kırma/parçalama, eleme ve fiziksel ayrıştırma, siyah kütle eldesi ve son olarak hidrometalurjik veya pirometalurjik geri kazanım adımlarını izlemektedir. Çelik dış muhafaza, bakır ve alüminyum akım toplayıcılar ile separatör membranlar, söküm aşamasında doğrudan ayrılan bileşenler değildir; bunlar kontrollü kırma/parçalama sonrasında eleme, manyetik ayırma ve yoğunluk farkına dayalı fiziksel ayrıştırma adımlarında, boyut ve malzeme özelliklerine göre siyah kütleden uzaklaştırılmaktadır. Geriye kalan katot ve anot ağırlıklı ince fraksiyon, sonraki hidro/pirometalurjik proseslere girdi oluşturan siyah kütle olarak adlandırılmaktadır.

Uluslararası ölçekte farklı maden ve endüstriyel proses atıklarının ikincil hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesine yönelik çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Örneğin, ALZINC Ghazaouet (Cezayir) liç kalıntılarından çinkonun hidrometalurjik yöntemlerle geri kazanılmasına yönelik faaliyetler yürütürken; Glencore (Kanada) gibi madencilik şirketleri de maden ve endüstriyel atıklardaki değerli elementlerin geri kazanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirmektedir [62] [63].

Bu çerçevede, batarya geri dönüşümü ve kritik mineral geri kazanım teknolojilerinin değerlendirilmesinde yalnızca tesis kapasitesi ve işlem hacmi değil; geri kazanılan ürünlerin kimyasal formu, saflık düzeyi ve hücre üretim süreçlerine yeniden entegre edilebilme potansiyeli de dikkate alınmalıdır.

Tablo 9. Dünyada bulunan bazı geri dönüşüm tesislerinin uyguladığı yöntemler, elde edilen ürünler ve yıllık kapasiteleri [64]

Tesis	Yöntem	Co	Ni	Li	Mn	Al	Cu	C	Elektrolit	Plastik	Fe	Yıllık Üretim (t/y)
Akkuser (FI)	Mekanik	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	-	Plastik parça	Çelik parça	1.000–3.000 (2020)
BatRec (CH)	Mekanik	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Siyah kütle	Al-Cu levha	Al-Cu levha	Siyah kütle	Organik çözücüler	Plastik parça	Çelik parça / $Fe(OH)_3$	200 (2020)
Umicore (BE)	Pirometalurji	$CoCl_2$	$Ni(OH)_2$	Cüruf	Cüruf	Cüruf	CuS	-	-	-	Cüruf / $Fe(OH)_3$	7.000 (2020)
Accurec (DE)	Pirometalurji	Alaşım	Alaşım	Cüruf	Alaşım	Al-Cu levha / $Al(OH)_3$	Al-Cu levha Cu	-	-	-	Çelik alaşım	4.000–6.000 (2020)
Erasteel (FR)	Pirometalurji	Alaşım	Alaşım	Cüruf	Cüruf	Cüruf	Alaşım	-	-	-	Alaşım	20.000 (2020)
Glencore (CA)	Pirometalurji	$CoCl_2$	Alaşım	Cüruf	Cüruf	Cüruf	Alaşım	-	-	-	Alaşım	7.000 (2020)
Recupyl (FR)	Hidrometalurji	$Co(OH)_3$ / Co	-	Li_2CO_3 / Li_2PO_4	-	Al-Cu levha	Al-Cu levha / Cu	Grafit	-	Plastik parça	Çelik parça / $Fe(OH)_3$	110 (2020)
Retriev (US)	Hidrometalurji	Siyah kütle	Siyah kütle	Li_2CO_3	Siyah kütle	Al-Cu plastik parçalar	Al-Cu plastik parçalar	Siyah kütle	-	Al-Cu plastik parçalar	Plastik-çelik parçalar	4.000 (2020)
Brunp (CN)	Hidrometalurji	NMC/LCO	NMC	NMC/LCO	NMC	$NaAl(OH)_4$	-	-	-	-	-	30.000 (2020)

7.1.2. OÇG 2 Değerlendirmesi

Savunma ve kritik uygulamalarda batarya sistemleri artık yalnızca bir güç kaynağı olarak değil, görev kritik bir alt sistem olarak ele alınmaktadır. Gelişen teknoloji ve birçok platforma (deniz, hava, kara vb.) eklenen yeni donanımlarla batarya ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Batarya teknolojilerinin önemi giderek artarken, bu alandaki teknolojik gelişmelerin ise uygulama sırasında ortaya çıkan problemlere cevap verebilmesi gerekmektedir. Geleceğin batarya trendlerine yönelik öne çıkan yaklaşımlar özet olarak Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Geleceğin batarya teknolojilerine yönelik yaklaşımlar

Platform seviyesinde yaklaşıldığında, bataryaların odaklanılması gereken ihtiyaçlarının da farklılaştığı görülmektedir. Bu kapsamda; deniz araçlarında lityum iyon batarya sistemleri yaygınlaşırken, güvenlik, termal kaçak ve risk yönetimi konularında daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Torpido ve su altı sistemlerinde kullanılan bataryalar yüksek güç yoğunluğu ve görev sürekliliği gereksinimleri nedeniyle stratejik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir. Uzay uygulamalarında ise yüksek güvenilirlik ve uzun ömür gereksinimleri doğrultusunda batarya teknolojilerine yapılan yatırımlar artmaktadır. İnsan taşıyabilen ağır sınıf hava araçlarında batarya sistemleri, enerji yoğunluğu ve ağırlık kısıtları nedeniyle önemli teknik ve ekonomik zorluklar barındırmaktadır. Elektrikli otomobillerde daha düşük güç seviyelerinde kompleks sıvı soğutma sistemleri kullanılabilirken, hava araçlarında yüksek güç gereksinimi ve hücre teknolojilerinin sınırlı olması nedeniyle hafif ve verimli termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesi gerekliliği doğmaktadır. Mevcut lityum iyon bataryaların enerji yoğunluğu değerleri, ağır sınıf elektrikli hava araçlarının ticarileşmesinin önündeki en büyük engellerden biri olarak değerlendirilmektedir. Havacılık ve savunma platformlarında yüksek enerji yoğunluğuna sahip yeni nesil hücre kimyaları, hafif yapısal batarya çözümleri ve güvenli hızlı şarj teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Görev kritik sistemlerdeki hatalı SOC/SOH tahminleri; menzil kaybı, görev başarısızlığı ve güvenlik riskleri gibi ciddi sonuçlara yol açabilmektedir.

Torpido ve su altı platformlarında kullanılan batarya teknolojileri, yüksek güç yoğunluğu, güvenilirlik ve görev sürekliliği gereksinimleri nedeniyle stratejik teknoloji alanları arasında yer almaktadır. Gelişmiş ülkelerde bu sistemlerin, yüksek güç yoğunluğuna sahip lityum tabanlı batarya teknolojileri kullanılarak geliştirilmesi hedeflenmektedir. ABD, Almanya, Fransa ve Japonya gibi ülkelerde torpido sistemleri için özel batarya çözümleri geliştirilmekte olup bu teknolojiler çoğu zaman ihracat kısıtlamalarına ve güvenlik sınırlamalarına tabidir. Bu nedenle birçok ülke bu kritik teknolojileri kendi ulusal yetkinlikleri içerisinde geliştirmeye öncelik vermektedir.

Batarya sistemlerinde artan güç/enerji yoğunluğu ihtiyacı ve operasyonel gereksinimler, termal yönetim ve güvenlik konularını ön plana çıkarmaktadır. Batarya ömrü teorik olarak yaklaşık 10 yıl olmakla birlikte, aşırı sıcaklık koşulları, verimsiz soğutma ve hızlı şarj/deşarj gibi etkenler nedeniyle bu süre pratikte 5 yıla kadar düşebilmektedir. Bu nedenle batarya ömrünün arttırılması ile ilgili çalışmalar kapsamında, iyi bir termal yönetim, batarya sağlığının izlenilmesi (SOH) ve bataryanın mevcut doluluk oranının (SOC) doğru tahmin edilebilmesi kritik birer unsurdur. Elektrikli araçlar ve savunmada bu değerlerin hassasiyeti oldukça önemlidir. Bu durum, yüksek güvenilirlik gerektiren savunma ve havacılık uygulamalarında özgün ve yerli BMS algoritmalarının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Bataryanın beyni rolünü üstlenen Batarya Yönetim Sistemi (BMS) konusunda geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. Eatron Technologies ve Syntiant, Huawei, Infineon ve NXP Semiconductors gibi firmalar, otomotiv sınıfı AI destekli BMS çözümleri üzerinde çalışmalar yürütmektedir.

- Eatron ve Syntiant, AI destekli otomotiv sınıfı BMS geliştirmek için iş birliği yapmaktadır. Batarya performansını artırmayı hedefleyen bu sistemlerde derin öğrenme kullanımı net değildir.
- Huawei, AI destekli otomotiv sınıfı BMS geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Batarya performansını artırmayı hedefleyen bu sistemlerde derin öğrenme kullanımına dair kesin bilgiler mevcut değildir.
- Infineon, AI destekli otomotiv sınıfı BMS geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Batarya performansını artırmayı hedefleyen bu sistemlerde derin öğrenme kullanımı net değildir.
- NXP Semiconductors, AI destekli otomotiv sınıfı BMS geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Batarya performansını artırmayı hedefleyen bu sistemlerde derin öğrenme kullanımı net değildir.

Bu şirketler AI tabanlı BMS çözümleri geliştirmekte olup, bu sistemlerde derin öğrenme kullanımı net olarak doğrulanmamıştır. Ayrıca, mevcut çalışmalarda havacılık sektörüne yönelik özel bir uygulama veya optimizasyon tespit edilmemiştir.

Endüstriyel uygulamalarda Çin menşeli BMS çözümleri pazara hâkim durumdadır ve bu sistemlerde yapay zeka uygulamaları çoğunlukla bulut tabanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Gömülü yapay zeka uygulamalarının kullanımı ise henüz sınırlıdır. Dijital ikiz uygulamaları akademik literatürde yaygınlaşmasına rağmen endüstriyel uygulamalar açısından erken aşamadadır. On-board EIS tabanlı çözümler prototip seviyesinde kalmakta ve yüksek doğruluklu LFP SOC tahminine yönelik ticari çözümler sınırlı bulunmaktadır.

Bu sistemler batarya performansını artırmayı hedeflemekte olup, kullanılan yapay zeka yöntemlerinin derin öğrenme düzeyinde olup olmadığına dair bilgiler henüz sınırlıdır. Mevcut ticari çözümler içerisinde havacılık sektörüne özel optimize edilmiş uygulamaların oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Sanal sensörler ile hücre iç sıcaklığının tahmini ve yapay zeka tabanlı kontrol sistemleri ile soğutma sıvısı akışının dinamik olarak yönetilmesi gibi yenilikçi çözümler geliştirilmektedir. Batarya şarj durumu (SOC) tahmini için derin öğrenme tabanlı yöntemler, LSTM, GRU ve CNN gibi modeller aracılığıyla yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ancak bu yöntemlerin yüksek işlem gücü gereksinimi, uygulamalarını; genellikle yüksek performanslı bilgisayarlar veya bulut sistemleri ile sınırlamaktadır. Güncel çalışmalar, model sıkıştırma, kuantizasyon ve bilgi damıtma gibi tekniklerle bu algoritmaların gömülü sistemlerde uygulanabilir hale getirilmesine odaklanmaktadır. Buna rağmen, düşük kaynaklı sistemlerde gerçek zamanlı SOC tahmini halen önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.

Uluslararası alanda yüksek doğruluklu batarya modelleri hem akademik hem de ticari yazılımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PHIL (Power Hardware-in-the-Loop) tabanlı batarya test sistemleri elektrikli araç uygulamalarında üniversite ve endüstride önemli bir yer edinmiştir. Hibrit batarya sistemleri ise henüz araştırma ve pilot uygulama aşamasında olup, tam anlamıyla ticarileşmiş çözümler sınırlıdır.

Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde batarya güvenliği ve performansı için soğutma ve termal yönetim teknolojileri, kritik bir araştırma alanıdır. Günümüzde yaygın olarak alüminyum tabanlı soğutma plakaları, sıvı soğutma kanalları ve faz değişimli malzemeler (PCM) kullanılmaktadır. Son yıllarda ise hem ağırlık azaltma hem de sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda polimer matrisli kompozitler ve metamalzemeler öne çıkmaktadır. Özellikle yüksek ısıl iletkenlik sağlayan grafen, bor nitrür ve karbon elyaf takviyeli termoplastikler, batarya paketlerinde metal alternatifleri olarak araştırılmakta; ayrıca 3B baskı ile tasarlanmış metamalzeme yapıları sayesinde ısı yayılımı optimize edilmektedir. Akademik ve endüstriyel çalışmalar, bu tür hafif ve yeniden işlenebilir malzemelerin gelecekte hem pasif hem de aktif soğutma sistemlerine entegre edilebilecek yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir.

Termal yönetim ve batarya mimarisi alanında önemli teknolojik gelişmeler yaşanmaktadır. Çinli üretici CATL, hücreden pakete (CTP) ve hücreden şasiye (CTC) teknolojileri üzerinde çalışırken, Tesla 4680 hücre yapısı ve "tabless" tasarım ile ısı yayılımını azaltmayı hedeflemektedir. BYD doğrudan hücre soğutma çözümleri geliştirirken, Avrupa ve Japonya merkezli firmalar aktif ve pasif soğutma sistemlerini ileri seviyeye taşımaktadır. Bunun yanında 400V ve 800V mimariler, yüksek voltajlı sistemler ve modüler batarya paketleri de sektörde yaygınlaşmaktadır.

- CATL, "Kirin" batarya paketleriyle yüksek voltaj esnekliği sağlayan çözümler geliştirilmektedir.
- GM Defense ve Tesla 400V/800V değiştirilebilir batarya mimarileri üzerinde çalışmaktadır. Cybertruck ve GM Ultium platformlarında benzer gerilim esnekliği mevcuttur.
- Porsche, seri üretimde 800V sistem kullanıyor, BDU ve inverter arasında voltaj değişimi mevcuttur.
- Airbus & Safran şirketleri havacılık için yüksek voltajlı dağıtım sistemleri üzerine çalışmaktadır.
- Hyundai-Kia, E GMP platformunda bu teknolojiyi ticari olarak kullanmaktadır.

Termal yönetim, arıza modları, acil durum senaryoları ve dayanıklılık kriterleri bu tür uygulamalarda standart gereksinimler haline gelmiştir. Veri odaklı yaklaşımlar ile kestirimci bakım, filo yönetimi ve enerji optimizasyonu gibi üst seviye fonksiyonlar da yaygınlaşmaktadır. Günümüzde sistemlerde ısı üretimi ve dağılımı tek boyutlu modellerle analiz edilirken, daha gelişmiş yaklaşımlar hücrenin elektrokimyasal yapısından başlayarak üç boyutlu termal modelleme ile daha doğru sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir.

Enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşması, mikroşebekeler, çift yönlü enerji akışı ve akıllı enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu ile hız kazanmıştır. Bu gelişmelerle birlikte güvenli haberleşme, kimlik doğrulama, uzaktan güncelleme ve siber güvenlik gibi gereksinimler de önem kazanmış ve enerji depolama altyapılarının temel bileşenleri hâline gelmiştir.

Dünya genelinde batarya teknolojileri hızla gelişmekte olup, batarya yönetim sistemleri (BMS) özelinde hücre ve paket seviyesinde yapay zekâ tabanlı yöntemler ön plana çıkmaktadır. ABD, Çin, Güney Kore ve Almanya gibi ülkelerde; batarya performansının artırılması, kullanım ömrünün

uzatılması, hücre dengeleme, şarj durumu (SOC), sağlık durumu (SOH) kestirimi, termal yönetim ve arıza tahmini gibi temel BMS fonksiyonlarının geliştirilmesine yönelik makine öğrenmesi, derin öğrenme ve veri analitiği tabanlı algoritmalar kullanılmaktadır. Tesla, CATL, LG Energy Solution ve Panasonic gibi firmalar da bu alanlarda yapay zeka destekli çözümler geliştirmekte olup, farklı test koşullarında gerçekleştirilen çalışmalarda sistem performansını iyileştiren sonuçlar rapor edilmektedir.

BMS'nin ötesinde, enerji depolama sistemlerinin sistem ve şebeke seviyesindeki yönetiminde ise filo yönetimi, mikroşebeke kontrolü, enerji yönetim sistemleri (EMS), dijital ikiz ve siber güvenlik uygulamaları ön plana çıkmaktadır. MIT, Fraunhofer ve Tsinghua Üniversitesi gibi araştırma merkezlerinde bu alanlara yönelik veri odaklı modelleme, optimizasyon ve karar destek sistemleri üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Bu gelişmeler, yapay zeka destekli teknolojilerin hem batarya yönetim sistemlerinde hem de üst seviye enerji yönetim altyapılarında temel bileşenlerden biri haline geleceğini göstermektedir.

7.2. Türkiye'de Mevcut Durum ve Teknoloji Eğilimleri

7.2.1. OÇG 1 Değerlendirmesi

Bu bölümde, Türkiye'deki batarya ekosisteminin temellerini oluşturan akademik çalışmalar, kamu Ar-Ge merkezlerinin faaliyetleri ve son yıllarda elektrikli araç projeleriyle ivme kazanan endüstriyel dönüşüm süreçleri ele alınmaktadır. Ayrıca yerli ekosistemin mevcut aktörleri analiz edilerek, ticarileşme aşamasındaki yapısal bariyerler değerlendirilmiştir. Türkiye'deki batarya malzemeleri ekosisteminin mevcut aktörleri, temel rolleri ve teknolojik yetkinlikleri Tablo 10'da özetlenmektedir.

Tablo 10. Türkiye batarya malzemeleri ekosistemi

Tür	Temel Rol	Malzeme Odağı	Mevcut Yetkinlik / Gelişim Alanı
ASPİLSAN Enerji	Askerî hücre ve paket	NMC→LFP geçişi	Kayseri tesisi, sertifikasyon; malzeme üretimi yok
ASPİLSAN–Top Material	İhracat protokolü	LFP katot	İlk aşama kurulum; kullanılan aktif malzeme hâlâ ithal
TÜBİTAK RUTE/MAM	Ar-Ge, prototipleme, test	Katot, anot, elektrolit, separatör, prototip hücre	Akademik paydaşlarla iş birliği halinde malzeme geliştirme faaliyetlerinde yer almakta ve geliştirilen malzemelerin pilot ölçek elektrot ve hücre üretimini yapabilen Türkiye'nin ilk alt yapısına sahiptir.
SIRO (TOGG-Farasis)	Sivil EV hücre ve modül	NMC/LFP hücre	15+ GWh hedef; çift kullanım potansiyeli
Eti Maden	Bor madenciliği + Li_2CO_3 (patent sahibi)	Li_2CO_3 (bor atığı)	~10 t/yıl pilot; endüstriyel tesis duyuruldu
Eti Gübre	Maden atıklarından kobalt sülfat, nikel sülfat, mangan sülfat ve lityum karbonat eldesi	Pirit (FeS_2) konsantresi	Madencilik yan ürünlerinin hidrometalurjik yöntemlerle batarya sınıfı malzemelere dönüştürülmesinde rol oynar
Pomega/Kontrolmatik	LFP hücre üretimi	LFP	Polatlı yatırımı; kullanılan aktif malzeme ithal
Üniversiteler	Temel Ar-Ge	Katot, anot, Polimer, membran, elektrokimya	200+ doktoralı araştırmacı; sanayi köprüsü zayıf

Türkiye, küresel batarya pazarındaki rekabetçi konumunu güçlendirmek ve bölgesel bir üretim üssü haline gelmek amacıyla lityum iyon hücre yatırımlarını stratejik düzeyde desteklemektedir. Hücre üretimi; yüksek sermaye, ileri elektrokimya uzmanlığı ve yüksek üretim verimliliği gerektiren hassas bir süreçtir. Türkiye'deki sınai yapı, küresel teknoloji öncüleriyle yapılan ortak girişimler ve yerli Ar-Ge tabanlı üretim hatları olmak üzere iki ana eksende şekillenmektedir:

Pomega Enerji Depolama Teknolojileri: Kontrolmatik iştiraki olan Pomega, Ankara'da kurduğu Gigafabrikası ile Türkiye'nin ilk özel sektör LFP hücre üreticisi konumundadır. Hali hazırda 3 GWh kurulu hücre ve enerji depolama sistemi kapasitesine sahip olan firma, sivil enerji depolama pazarında ticari projeler yürütmektedir. Şirket bünyesinde yerli hücre ve yerli batarya yönetim sistemlerinin (BYS) entegre edildiği, 7,2 milyon dolar değerindeki 32 MWh'lik entegre enerji depolama projesinin saha kurulum süreçleri devam etmekte olup, projenin nihai kabulüne ilişkin güncel durum takibi sürdürülmektedir. Küresel pazarlara açılmak amacıyla ABD merkezli Our Next Energy (ONE) firması ile stratejik ortaklık kurulmuştur. Anlaşma çerçevesinde, ONE'ın yüksek kapasiteli 314 Ah prizmatik LFP hücrelerinin Pomega'nın Ankara tesislerinde üretilmesi planlanmaktadır. Üretim hatlarının 2026 yılında 2 GWh kapasiteyle faaliyete geçmesi ve 2027 yılında yıllık 5 GWh seviyesine ulaşması hedeflenmektedir.

Yiğit Akü ve Ganfeng Lithium Ortak Girişimi: Sınai kapasiteyi artırma yolundaki bir diğer kritik hamle, Yiğit Akü ile küresel lityum üreticilerinden Çin menşeili Ganfeng Lithium Group (Ganfeng LiEnergy) arasında 19 Ağustos 2024 tarihinde imzalanan stratejik iş birliği anlaşmasıdır. Bu anlaşma kapsamında Türkiye'de 500 milyon dolar sabit yatırım bütçesiyle yıllık 5 GWh kapasiteli bir lityum iyon pil üretim tesisi ve entegre bir AR-GE merkezi kurulması planlanmaktadır. Fabrikada özellikle sivil depolama pazarlarında talep gören 100 Ah, 280 Ah ve 314 Ah kapasiteli prizmatik LFP hücrelerin üretilmesi hedeflenmektedir.

Siro Energy: Türkiye'nin elektrikli araç üreticisi TOGG ile Çinli Farasis Energy'nin %50-%50 ortaklığıyla kurulan Siro, Gemlik'teki 26.000 m² kapalı alana sahip tesisinde yıllık 3 GWh kapasiteli batarya modül ve paket üretim hattını 31 Mart 2023 tarihinde devreye almıştır. Şirketin dikey entegrasyon hedefi olan hücre fabrikasının temeli 24 April 2023 tarihinde atılmıştır. Tesiste hücre seri üretiminin 2026 yılında başlaması ve kapasitenin 2031 yılına kadar kademeli olarak yıllık 20 GWh seviyesine ulaştırılması planlanmaktadır.

Alarko Holding ve Gotion İş birliği: 2025 yılında Alarko Gotion Green Energy adıyla kurulan ortak girişim, lityum iyon batarya paketlemesiyle başlayacak yatırım sürecinin devamında, 2028 yılı sonu itibarıyla yıllık 5 GWh kapasitede üretim yapabilecek olup, 314 Ah LFP tipinde prizmatik hücrelerin yerli üretimine geçilmesini hedeflemektedir.

Reap Battery ve Great Power İş birliği: 2025 yılının son çeyreğinde Yeo Teknoloji bağlı ortaklığı Reap Battery ve Çin menşeili Great Power ortaklığında yeni bir şirket kurulmuştur. Enerji depolama sistemleri üretmeyi hedefleyen ve 5 GWh kapasiteye sahip olması planlanan fabrikanın İstanbul Tuzla'daki kurulum faaliyetleri devam etmektedir. Şirket, orta vadede HIT-30 Yüksek Teknoloji Teşvik Programı kapsamında hücre üretimini de Türkiye'de yapmayı hedeflemektedir.

GO Enerji ve LG Solutions İş birliği: GO Enerji ile Güney Kore teknoloji devi LG Energy Solution arasındaki stratejik iş birliği kapsamında, ilk aşamada 45 milyon Euro değerinde bir batarya fabrikasının kurulması öngörülmektedir. Toplamda 7,5 GWh kapasiteye ulaşması hedeflenen tesiste, Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS) için paket üretimi gerçekleştirilecektir. Uzun vadede, LG Energy Solution'ın kese (pouch) tipi hücre teknolojisine ait know-how transferiyle hücrelerin Türkiye'de üretilmesi planlanmaktadır.

ASPİLSAN Enerji ve Yerli Hücre Teknolojisi: Türk Silahlı Kuvvetlerini Güçlendirme Vakfı (TSKGV) iştiraki olan ASPİLSAN Enerji, Türkiye'nin askeri batarya ihtiyacını yerli imkanlarla karşılamak üzere Kayseri'de kurduğu lityum iyon pil üretim tesisinde silindirik hücrelerin seri üretimine devam etmektedir. ASPİLSAN Enerji; sivil IoT ve enerji depolama alanlarının yanı sıra kritik savunma platformları için çok alanlı elektrokimyasal hücre çözümleri sunmaktadır. Tesis bünyesinde seri üretimi yapılan silindirik INR18650A28 lityum iyon hücresi, katot tarafında NMC-811 kimyasına sahiptir.

Türkiye'de batarya geri dönüşümü alanındaki endüstriyel faaliyetler gelişim sürecini sürdürmekte olup, mevcut uygulamalar ağırlıklı olarak metal geri kazanımı ve tehlikeli atık yönetimi perspektifinde şekillenmektedir. Sektördeki yerli uygulamalar ve mühendislik birikimi, önemli ölçüde kurşun-asit

bataryaların (akümülatörlerin) geri kazanımına yönelik edinilmiş deneyimlerden beslenmektedir. Bu kapsamda; lisanslı toplama ağları üzerinden tesise ulaşan atık akülerin kırma ünitelerinde parçalanması, metalik kurşun ve kurşun bileşiklerinin (pasta ve ızgara) pirometalurjik izabe fırınlarında yüksek sıcaklıkta indirgenerek kurşun külçesine dönüştürülmesi, polipropilen (PP) gövde ve separatör malzemelerinin ayrı hatlarda plastik geri kazanımına yönlendirilmesi ve atık sülfürik asit elektrolitin nötralizasyon süreçleriyle arıtılması gibi uygulamalar öne çıkmaktadır. Bu birikim, kurşunun yüksek verimle geri kazanılmasına yönelik pirometalurjik proses kontrolü, fırın işletmeciliği ve emisyon yönetimi gibi alanlarda önemli bir mühendislik deneyimi sağlamıştır. Lityum-iyon bataryaların geri dönüşümünde ise proses gereksinimleri, hücre kimyasına ve bileşen yapısına bağlı olarak farklılaşmaktadır. Burada amaç yalnızca tek bir metalin geri kazanılması değil; katot aktif malzemesinde bulunan lityum, nikel, kobalt ve manganez gibi elementlerin uygun kimyasal formlarda ve mümkün olduğunca yüksek verimle ayrıştırılarak yeniden kullanılabilir ürünlere dönüştürülmesidir. Bu nedenle siyah kütlenin işlenmesi ve seçici metal ayrıştırılması aşamalarında hidrometalurjik liç, çözelti kimyası ve seçici ayırma gibi farklı proses yetkinliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut kurşun-asit batarya geri dönüşüm birikimi, tesis işletmeciliği, atık yönetimi ve proses kontrolü açısından değerli bir altyapı sunmakla birlikte, lityum-iyon bataryaların çok bileşenli yapısına yönelik geri kazanım süreçlerinin ayrıca geliştirilmesini gerektirmektedir.

Lityum-iyon bataryaların karmaşık kimyasal yapısı, yüksek gerilim gereksinimleri ve hücre/modül mimarileri dikkate alındığında, entegre ve kapalı döngü (closed-loop) geri dönüşüm yaklaşımlarının Türkiye'de henüz yaygın bir uygulama alanı oluşturmadığı görülmektedir. Mevcut durumda, lityum-iyon sistemlerine özgü geri kazanım süreçleri kapsamında, doğrudan batarya üretim zincirinde yeniden kullanılabilecek batarya sınıfı saflıkta (%99,9) kimyasal hammaddelerin üretimine yönelik endüstriyel ölçekli rafinasyon altyapısının geliştirilmesi gereken alanlardan biri olduğu değerlendirilmektedir [66].

Yerli geri dönüşüm tesislerinde, lityum-iyon bataryalara özgü otomatik mekanik ön işlem, hücre/modül/paket seviyesinde güvenli söküm ve kontrollü kırma-eleme teknolojilerinin geliştirilmesi gereken alanlar bulunduğu değerlendirilmektedir. Bu teknolojilerin yaygınlaştırılması; katot aktif malzemeleri, anot grafiti ve organik elektrolit bileşenleri gibi yüksek katma değerli bileşenlerin yapısal özellikleri mümkün olduğunca korunarak geri kazanılmasına katkı sağlayacaktır.

Mekanik ve hidrometalurjik ön işlemler sonucunda elde edilen ara ürünlerin bir bölümünün, yeni hücre üretim süreçlerinde doğrudan kullanılabilecek saflık seviyelerine ulaştırılması için ilave proses adımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Nikel, kobalt, manganez ve lityum gibi kritik metallerin batarya sınıfı kimyasal bileşiklere, örneğin batarya sınıfı lityum karbonat veya sülfat tuzlarına, dönüştürülmesini sağlayacak ileri saflaştırma, solvent ekstraksiyonu ve kimyasal rafinasyon yetkinliklerinin geliştirilmesi, yerli geri dönüşüm ekosisteminin değer zinciri boyunca derinleşmesine katkı sağlayacaktır.

7.2.2. OÇG 2 Değerlendirmesi

Türkiye'de batarya teknolojileri son yıllarda elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerine yönelik yatırımlarla önemli bir ivme kazanmıştır. ASPİLSAN Enerji'nin lityum-iyon hücre üretim tesisi, TOGG'un batarya modül ve paket entegrasyon çalışmaları ile Arçelik ve Vestel gibi firmaların enerji depolama çözümleri bu gelişimin önemli göstergeleridir.

Genel olarak Türkiye'de batarya teknolojileri alanında ASELSAN, TÜBİTAK RUTE, TOGG, TÜBİTAK MAM, ASPİLSAN Enerji, üniversiteler ve diğer bazı firmalarımız bünyesinde yürütülen çalışmalar ile önemli bir altyapı oluşmuştur. Bazı teknolojiler henüz erken aşamadadır. Bu alanda üniversite–sanayi iş birliklerinin artırılması, ortak test merkezlerinin kurulması ve veri odaklı yaklaşımların sistematik biçimde entegrasyonu gerekmektedir.

BMS tasarımları çoğunlukla koruma ve izleme odaklıdır. RS485 ve CAN haberleşme altyapılarına sahip sistemler geliştirilmekle birlikte, gömülü yazılım ve ileri seviye algoritma entegrasyonu henüz yeterli seviyede değildir. Sektördeki insan kaynağı sirkülasyonu ve bilgi birikiminin kurumsallaştırılamaması da bu gelişimi yavaşlatan önemli faktörler arasındadır. Bu durum, her yeni tasarım sürecinde benzer çalışmaların tekrarlanmasına ve zaman kaybına yol açmaktadır. Piyasada kullanılan pil hücrelerinin SOC tahmini için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Ancak bu tahminlerin doğruluk seviyeleri genellikle şeffaf biçimde sunulmamaktadır. Yerli üreticiler tarafından geliştirilen sistemlerde ise ağırlıklı olarak Kalman filtresi gibi model tabanlı yöntemler

tercih edilmekte olup, bazı uygulamalarda veri odaklı ve yapay zeka destekli yaklaşımların birlikte kullanıldığı hibrit BMS mimarileri de geliştirilmektedir. Ancak bu yaklaşımların yaygınlaşma düzeyi SOC ve SOH tahmini doğruluğu ve güvenilirliği Türkiye'de önemli bir Ar-Ge ihtiyacı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'de aktif hücre dengeleme (active balancing), durum tahmini ve termal yönetim gibi BMS fonksiyonlarına yönelik akademik çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca, şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemlerine yönelik BMS uygulamalarını hedefleyen yerli prototip geliştirme çalışmaları da mevcuttur. Yerli üreticiler tarafından geliştirilen sistemlerde ise ağırlıklı olarak Kalman filtresi gibi model tabanlı yöntemler tercih edilmekte olup, bazı uygulamalarda veri odaklı ve yapay zeka destekli yaklaşımların birlikte kullanıldığı hibrit BMS mimarileri de geliştirilmektedir.

Batarya modelleme çalışmaları artmakla birlikte, yüksek doğruluklu ve sistem seviyesinde kullanılabilir modeller sınırlıdır. Benzer şekilde, Batarya Yönetim Sistemleri üzerine çalışmalar artmakta olsa da doğrulama altyapıları üzerine uygulamalı araştırmalar yeterli düzeyde değildir. Türkiye'de enerji depolama sistemlerine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Ancak yüksek C oranlı batarya paketlerinin geliştirilmesi; uygulama gereksinimleri, hücre kimyası, termal tasarım ve güç ihtiyaçlarına bağlı olup mevcut çözümler çoğunlukla daha düşük performanslı hücrelerle gerçekleştirilmektedir.

Denizaltı, torpido, hava araçları gibi kritik platformlar kapsamında yüksek güç ve yüksek enerji kapasitesine sahip güvenli batarya sistemleri öne çıkmaktadır. Platform düzeyinde, denizaltılarda kullanılabilecek lityum-iyon batarya sistemlerine yönelik yerli ve olgunlaşmış bir çözüm bulunmamaktadır.

Mevcut ve planlanan denizaltı projelerinde havadan bağımsız tahrik sistemleri ile birlikte batarya teknolojileri kritik bir rol oynamaktadır. Yeni nesil denizaltı projeleri kapsamında lityum-iyon bataryaların entegrasyonu, sualtında kalış süresinin artırılması ve akustik izlerin azaltılması açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Yerli ve milli batarya geliştirme kabiliyetlerinin artırılması hem operasyonel bağımsızlık hem de savunma sanayii ekosisteminin güçlendirilmesi açısından stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Deniz platformlarında lityum-iyon batarya kullanımına yönelik ilgi Türkiye'de artmakta olup, sivil alanda hibrit ve elektrikli sistemlere yönelik Ar-Ge çalışmaları yürütülmektedir. Askeri alanda ise düşük akustik iz ve yüksek enerji yoğunluğu avantajları nedeniyle bu teknolojilerin gelecekte daha yaygın kullanılması beklenmektedir. Ancak yüksek kapasiteli sistemlerin güvenli entegrasyonu, termal kaçak yönetimi ve risk analizi konularında daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Türkiye'de torpido ve su altı platformlarına yönelik batarya teknolojileri sınırlı sayıda kurum tarafından geliştirilmekte olup son yıllarda yerli batarya üretim altyapısının gelişmesiyle birlikte bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bununla birlikte yüksek güç gereksinimine sahip torpido bataryası mimarisi, sistem entegrasyonu ve platform uyumluluğu konularında yetkinliklerin daha da geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu teknolojinin yerli olarak geliştirilmesi, savunma platformlarında dışa bağımlılığın azaltılmasına, tedarik güvenliğinin artırılmasına ve kritik enerji depolama teknolojilerinde stratejik kazanımlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Türkiye Uzay Ajansının kurulmasıyla birlikte ve ülkemizin Milli Uzay Programı ile uyumlu olacak şekilde uzay uygulamalarına yönelik özgün milli batarya çözümlerinin oluşturulması kritik önem taşımaktadır. Bu amaçla ilgili uzay standartlarına ve test kriterlerine uygun batarya geliştirilmesi ülkemizin kritik teknoloji hedefleri açısından önemli bir kilometre taşı olarak değerlendirilmektedir. Uzay uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, Türkiye'de uzay sistemlerine uygun kalifiye edilmiş yerli hücre üretimi bulunmamaktadır. Mevcut projelerde ithal hücreler kullanılmaktadır. Daha büyük ölçekli uzay platformlarına yönelik batarya sistemleri de büyük ölçüde dışa bağımlıdır. Bu durum, sürdürülebilirlik ve maliyet açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Havacılıkta ise, ağır sınıf tamamen elektrikli hava aracı geliştiren firma sayısı oldukça sınırlıdır. DASAL Havacılık, 75 kg faydalı yük taşıma kapasitesine sahip PUHU-75 platformu ile önemli bir örnek teşkil etmekte olup, bu platform Türk Silahlı Kuvvetleri'ne teslim edilmiş tamamen elektrikli ilk hava araçlarından biridir. Daha yüksek taşıma kapasiteli platformlar da geliştirilmekle birlikte yüksek güç gereksinimi, ağırlık kısıtları ve hücre teknolojilerinin sınırlı olması nedeniyle bu alanda teknik zorluklar devam etmektedir.

Batarya mimarisi ve sistem entegrasyonu açısından Türkiye'de henüz standartlaşmış referans mimariler ve ortak haberleşme altyapıları yeterince gelişmemiştir. Özellikle savunma sistemleri, denizcilik uygulamaları, enerji depolama sistemleri ve özellikle yük taşıyan elektrikli araç

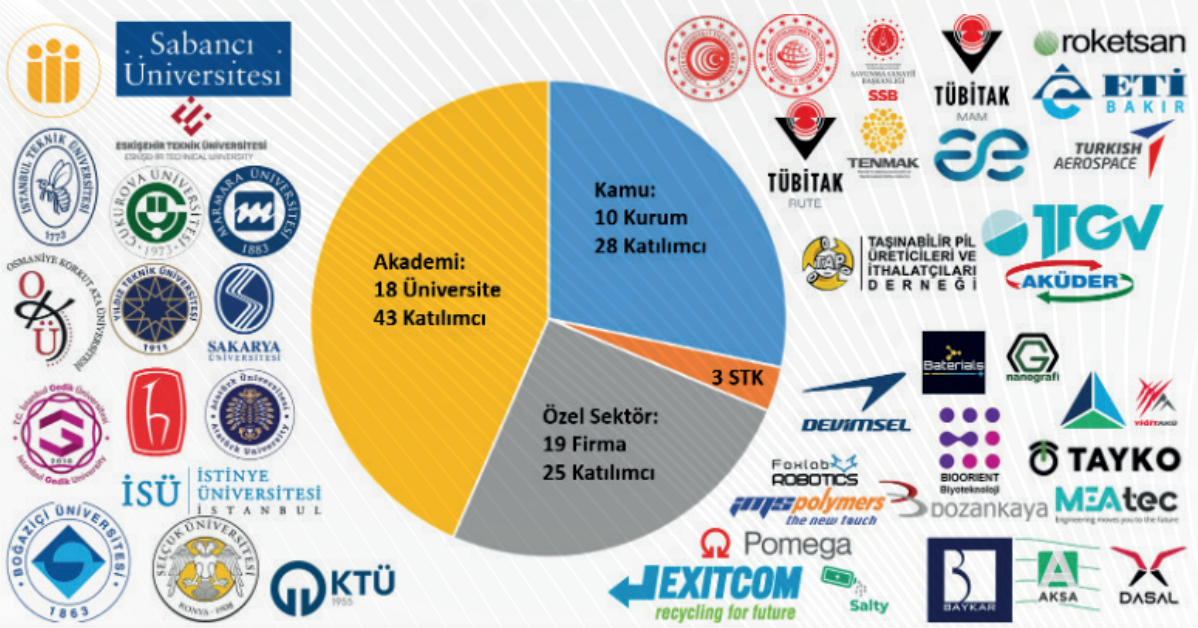
uygulamalarında; CAN Bus, Modbus, J1939 gibi haberleşme protokolleri ile IEC 62619, UN 38.3, IEC 61508, ISO 26262 gibi standartlar çerçevesinde ortak referans BMS mimarilerinin ve entegrasyon yaklaşımlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, farklı sistemlerin entegrasyonunda projeden projeye değişen çözümler geliştirilmesine neden olmaktadır. Test ve doğrulama altyapılarında da benzer şekilde standartlaşma eksikliği bulunmakta olup, HIL/SIL senaryoları, hata enjeksiyon yöntemleri ve kabul kriterlerinin sistematik hale getirilmesi gerekmektedir. Entegrasyon, doğrulama ve standardizasyon odaklı yaklaşımlar önemli bir fırsat alanı sunmaktadır. Termal kaçak testleri hücre ve modül seviyesinde yapılabilmekle birlikte, paket seviyesinde kapsamlı test altyapılarının geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Faz değişimli malzemeler, dijital ikiz uygulamaları, on-board EIS algoritmaları ve fiziksel model tabanlı BMS uygulamaları gibi ileri teknolojiler Türkiye'de henüz prototip veya akademik çalışma düzeyindedir. Yarı iletken üreticileri ile erken tasarım aşamasındaki işbirliklerinin arttırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Termal yönetim teknolojileri halen büyük ölçüde alüminyum plakalar ve sıvı soğutma kanalları gibi metal tabanlı çözümlerle sınırlıdır. Termoplastik kompozitler ve metamalzemeler üzerine akademik düzeyde çalışmalar yürütülmekle birlikte, endüstriyel uygulamalar henüz başlangıç aşamasındadır ve bu durum yerli üretim açısından önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır. Askeri tesisler ve kritik altyapılar için güvenli haberleşme, uzaktan yönetim ve enerji sürekliliği sağlayan yerli çözümlerin geliştirilmesi önemli bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin geliştirilmesi, hem operasyonel verimlilik hem de uluslararası yükümlülükler açısından stratejik önem taşımaktadır.

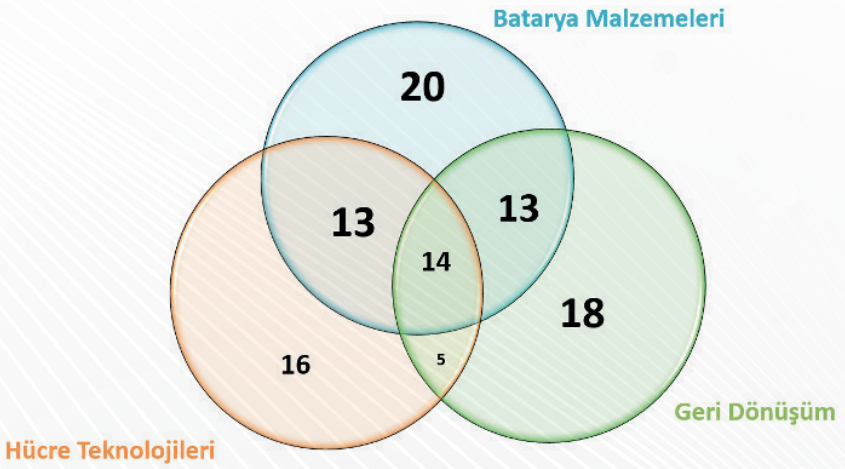
Savunma sanayii uygulamalarında bu sistemlerin yerli ve milli olarak geliştirilmesi, dışa bağımlılığın azaltılması, tedarik güvenliğinin sağlanması ve stratejik teknolojik yetkinliklerin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Denizaltı, torpido ve su altı platformları gibi yüksek güç/enerji gereksinimi olan sistemlerde batarya teknolojilerinin geliştirilmesi, ülkenin savunma kapasitesine doğrudan katkı sağlayacak kritik bir alan olarak değerlendirilmektedir.

7.3. OÇG 1

OÇG-1 bünyesinde yürütülen veri toplama sürecinde; 50 farklı kamu kurumu, üniversite, özel sektör firması ve sivil toplum kuruluşundan (STK) toplam 99 uzman ve araştırmacıdan geri bildirim alınmıştır. Çalışma grubuna katkı sağlayan paydaşların sektörel dağılımını gösteren detaylı görsel Şekil 12'de, katılımcıların uzmanlık ve ilgi alanlarına göre dağılımını içeren grafik ise Şekil 13'de detaylandırılmıştır.



Şekil 12. OÇG-1 Katılımcıları



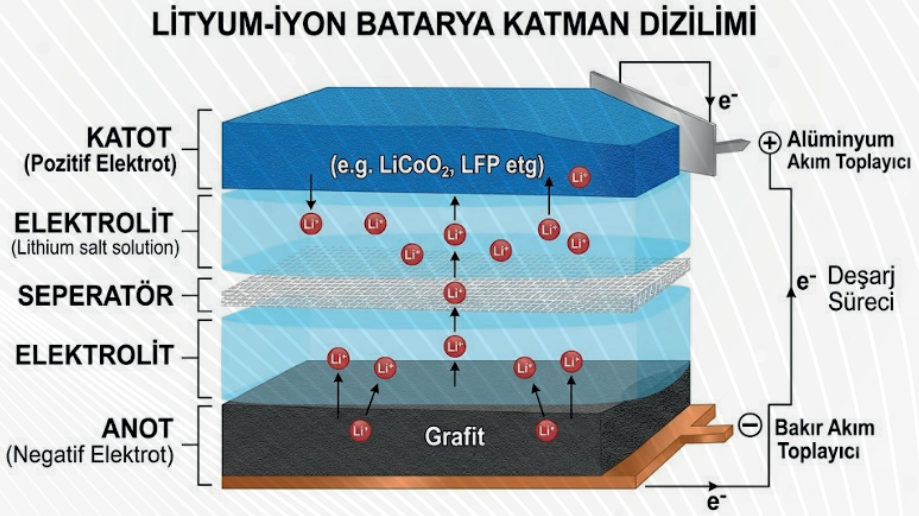
Şekil 13. OÇG-1 Katılımcılarının Uzmanlık Alanları

7.3.1. Genel Bilgi

Bu bölümde, OÇG 1 (Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojileri ve Geri Dönüşüm) kapsamında yürütülen araştırma faaliyetlerinin metodolojik altyapısı ve geliştirilen teknoloji taksonomisi sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, sivil pazar dinamiklerinden farklılaşan savunma sanayii hücre gereksinimleri, uluslararası askeri ve sivil kalifikasyon standartları ile ileri elektrokimyasal komponent teknolojilerindeki küresel eğilimler sistematik bir yaklaşımla incelenmiştir.

7.3.1.1. Batarya Bileşenleri ve Malzeme Teknolojileri

Şarj edilebilir batarya teknolojileri temel olarak Şekil 14'te görüldüğü üzere katot, anot, elektrolit ve separatör (membran) olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır:



Şekil 14. Batarya temel bileşenlerinin şematik gösterimi

Katot Teknolojileri: Genel olarak geçiş metal oksitlerinden üretilen katot tarafında; LiFePO4 (LFP), LiNixMnyCozO2 (NMC, kimyasal kompozisyona göre NMC 111, 811, 622 vb.), LiCoO2, LiMn2O4 ve LiFeMnPO4 (LFMP) kimyaları öne çıkmaktadır. Ticari süreçlerin başında LiCoO2 (LCO) baskınken, günümüz küresel pazarına LFP ve NMC kimyaları batarya sistemlerinde katot olarak hâkimdir. Kullanım senaryolarına göre, sabit enerji depolama sistemleri (EDS) gibi uzun döngü ömrü gerektiren ancak düşük enerji yoğunluğunun tolere edilebildiği uygulamalarda LFP bataryalar tercih edilmektedir. Buna karşın, elektrikli araçlar (EV) gibi yüksek enerji yoğunluğu gerektiren mobil uygulamalarda NMC bazlı katotlar ön plana çıkmaktadır. Günümüzde birçok elektrikli araç üreticisi; maliyet avantajı, yüksek güvenlik ve 10.000 çevrime ulaşan uzun ömürleri nedeniyle, enerji yoğunluğu nispeten daha düşük olsa da LFP bataryaları standart menzilli araçlarda yaygın olarak tercih etmektedir [42]. Son yıllarda ise LFP sistemine mangan (Mn) eklenerek voltajın ve dolayısıyla enerji yoğunluğunun artırıldığı LiFeMnPO4 (LMFP) sistemleri, bu dezavantajı kapatarak sektörde büyük dikkat çekmektedir.

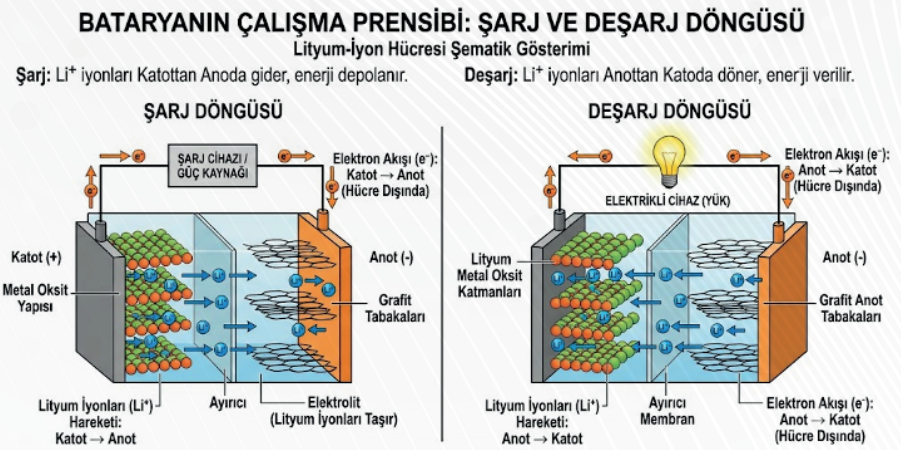
Anot Teknolojileri: Ticari pazarda grafit, silikon ve lityum titanat (Li4Ti5O12 - LTO) anot malzemeleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Anot tarafındaki malzeme çeşitliliği katoda kıyasla daha yüksek olup, fiyat/performans optimizasyonu nedeniyle grafit pazar liderliğini korumaktadır. LTO tabanlı sistemler yüksek kararlılık ve yapısal stabilite avantajlarıyla öne çıkarken, silikon bazlı anot sistemleri ise hızlı şarj performansı ve yüksek enerji yoğunluğu hedefleyen yeni nesil hücre çalışmalarının en kritik bileşeni olarak kabul edilmektedir. Nano boyutlu malzeme üretim stratejileri enerji yoğunluğunu artırsa da, yüksek üretim maliyetleri nedeniyle henüz kitlesel ticari uygulamalarda yaygınlaşamamıştır. Anot geliştirme faaliyetleri günümüzde özellikle hızlı şarj kabiliyetinin artırılması odağında yoğunlaşmaktadır.

Elektrolit Sistemleri: Ticari sıvı elektrolitli sistemlerde lityum içeren tuzlar (LiPF6, LiClO4 vb.), lityum iyonlarının katot ve anot arasındaki iyonik iletimini sağlamak üzere çeşitli organik çözücüler (Propilen Karbonat-PC, Etilen Karbonat-EC, Dimetil Karbonat-DMC, Etil Metil Karbonat-EMC, Dietil Karbonat-DEC, Floroetilen Karbonat-FEC) içinde belirli molaritelerde çözdürülerek hazırlanmaktadır. Sıvı sistemlerin yanı sıra, lityum polimer (Li-Po) bataryalarda jel elektrolitler kullanılarak daha yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılmaktadır. Bataryaların termal kaçak, yanma ve patlama risklerindeki en belirleyici bileşen elektrolit yapısıdır. Bu riskleri bertaraf etmek adına, yüksek döngü ömrü ve sıfır yanıcılık özelliği sunan katı hal (solid-state) elektrolit teknolojileri üzerindeki çalışmalar küresel ölçekte sürdürülmektedir. Çin menşeili bazı üreticiler katı hal bataryalarının ticari üretimine başladıklarını ilan etseler de bu teknoloji henüz küresel pazarda kitlesel olarak yer almamıştır.

Separatör (Membran) ve Ara Bileşenler: Lityum iyonlarının geçişine izin verirken anot ve katot arasında elektriksel yalıtımı sağlayan separatör bileşeninde, polimer, cam fiber veya bunların kompozit türevleri ticari standardı oluşturmaktadır. Termal kaçak esnasında güvenliği sağlamak adına alev geciktirici ve yüksek mekanik dayanımlı membran teknolojileri kritik öneme sahiptir.

Batarya üretim süreçlerinde, akım toplayıcı olarak kullanılan alüminyum ve bakırlar folyolar, Al ve Ni, kutup başı, dış kılıf, sızdırmazlık elamanları, batarya kapatıldığında hava almasını engelleyecek polimer yapıştırıcılar gibi birçok ara malzeme teknolojileri de süreçte ön plana çıkmaktadır.

Modern enerji depolama ekosisteminin merkezinde yer alan lityum-iyon bataryalar lityum iyonlarının iki elektrot arasında tersinir biçimde interkalasyonu prensibiyle çalışan yeniden şarj edilebilir hücrelerdir; şarj ve deşarj sırasında lityum iyonları, elektronik olarak iletken katı elektrotlar arasında tersinir biçimde hareket ederek enerjiyi kimyasal formda depolar ve serbest bırakır. Hücrenin fiziksel yapısı temel olarak bir katot (pozitif elektrot), bir anot (negatif elektrot), bu ikisini birbirinden ayıran fakat iyon geçişine izin veren bir separatör ve iyon iletimini sağlayan bir elektrolitten oluşur. Şekil 15'te şematik olarak gösterildiği üzere, şarj işlemi sırasında lityum iyonları katot yapısından ayrılarak elektrolit ortamı ve separatör üzerinden anoda göç eder ve burada anot malzemesinin kristal yapısına interkale olur; bu esnada dış devrede eş zamanlı olarak elektronlar da harici güç kaynağı üzerinden aynı yönde anoda ulaştırılır. Deşarj sürecinde ise bu hareket tersine döner: lityum iyonları anottan ayrılıp elektrolit üzerinden tekrar katoda göç ederken, elektronlar dış devre üzerinden yük üzerinden geçerek katoda ulaşır ve bu akış, harici devrede kullanılabilir elektrik akımını üretir. Böylece şekil, hücrenin enerji depolama (şarj) ve enerji verme (deşarj) fonksiyonlarını, iyon ve elektron hareketlerinin yönü üzerinden görsel olarak özetlemektedir.



Şekil 15. Li-iyon batarya sisteminin çalışma prensibi

Bu teknolojinin performansı beş temel parametre üzerinden tanımlanmaktadır. Enerji yoğunluğu (Wh/kg), bir hücrenin birim kütle başına depolayabildiği enerji miktarını; güç yoğunluğu (W/kg) ise birim kütle başına sağlayabildiği anlık güç çıkışını ifade etmektedir. Döngü ömrü, hücrenin belirli bir performans eşiğinin altına düşmeden gerçekleştirebildiği şarj/deşarj döngüsü sayısını tanımlarken, maliyet parametresi genellikle birim enerji başına ($/kWh) üretim ve yatırım maliyetini karşılamaktadır. Termal kararlılık ise hücrenin, iç kısa devre, aşırı şarj veya mekanik hasar gibi durumlarda kontrolsüz ısı üretimine (termal kaçak, thermal runaway) karşı gösterdiği dirençtir ve bataryanın güvenlik profilini doğrudan belirleyen kritik bir unsurdur. Bu beş parametre birbirleriyle sıkı bir etkileşim içindedir; genellikle enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik malzeme ve tasarım değişiklikleri, termal kararlılık veya döngü ömründe belirli ödünleşimlere yol açmaktadır. Bu temel parametrelerdeki performans, bataryanın kullanım alanını da doğrudan belirlemektedir; yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalar ile yüksek güç, uzun döngü ömrü veya düşük maliyet önceliğine sahip uygulamalar, farklı hücre tasarımlarına ve malzeme seçimlerine yönlendirmektedir.

7.3.1.2. Savunma Sanayii Gereksinimleri ve Standartları

Savunma sanayii uygulamalarında enerji depolama sistemleri, platformların operasyonel sürekliliği ve görev performansı açısından önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Askerî platformların farklı çevresel koşullarda çalışması, yüksek güç yoğunluğu gereksinimleri ve uzun süreli güvenilirlik ihtiyacı, bu alanda kullanılan bataryaların sivil uygulamalara kıyasla farklı tasarım ve performans kriterleriyle ele alınmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, savunma teknolojilerinde batarya tasarımı ve entegrasyonu; uluslararası askerî standartlar (MIL-STD vb.) kapsamında çevresel dayanım, güvenilirlik, emniyet ve operasyonel performans kriterleri dikkate alınarak şekillenmektedir.

Savunma sanayii uygulamalarında kullanılan hücre teknolojileri; tasarım felsefesi açısından sivil pazarın "maliyet ve minimum hacim" odaklı ticari yaklaşımından tamamen ayrışarak "koşulsuz güvenilirlik, ekstrem çevre koşullarına dayanım ve maksimum operasyonel beka" kriterlerini önceler. Askeri standartlardaki bir lityum iyon hücrenin sivil hücrelere kıyasla taşıması gereken temel karakteristikler şunlardır:

Genişletilmiş Termal Çalışma Aralığı: Ticari piller oda sıcaklığına yakın dar koridorlarda optimum performans sergilerken, askeri hücrelerin kutup soğuklarından (-40oC ve altı) çöl operasyonlarına (+70oC ve üzeri) kadar geniş sıcaklık varyasyonlarında kapasite kaybı yaşamadan yüksek akım deşarjı üretebilmesi zorunludur.

Yüksek Mekanik Mukavemet ve Balistik Dayanım: Hücrelerin, taktik araçların motor titreşimlerine, zırhlı platformların hareket esnasında maruz kaldığı yüksek şoklara ve olası balistik etkilere karşı yapısal bütünlüğünü koruması gerekmektedir. Hücre içi elektrot katmanlarının mekanik olarak sabitlenmesi ve basınca dayanıklı dış metal kılıfların kullanılması bu gereksinimin bir sonucudur.

Termal Kaçak Önleme ve Yapısal Emniyet: Hücrelerin aşırı şarj, harici kısa devre veya fiziksel delinme (çivi testi / balistik nüfuziyet) durumlarında alev alıp patlamayacak kararlılıkta olması, alev geciktirici elektrolit katkı maddeleri ve emniyet ventilleriyle donatılması kritik bir parametredir.

Elektromanyetik Uyumluluk ve İz Yönetimi: Hücrelerin ve entegre batarya yönetim sistemlerinin (BYS), hassas askeri haberleşme cihazlarında parazite (girişime) neden olmayacak elektromanyetik uyumluluğa sahip olması ve termal kameralara yakalanmayacak düzeyde düşük ısı yayılım profili sergilemesi gerekmektedir.

Savunma ekosistemine dahil edilecek hücre, modül ve batarya paketlerinin tasarımı, uluslararası askeri ve sivil standartlar çerçevesinde laboratuvar ortamında simüle edilerek doğrulanmaktadır:

- MIL-STD-810: Ekipmanın operasyonel ömrü boyunca karşılaşacağı çevresel stres faktörlerini (düşük basınç/irtifa, sıcaklık şokları, nem, tuz sisi, kum ve toz fırtınası, mekanik şok ve titreşim) simüle eden en kapsamlı askeri çevre test standardıdır.
- MIL-STD-461: Batarya sisteminin ve entegre BYS kartlarının elektromanyetik girişim yayılım limitlerini belirleyen ve dışarıdan gelebilecek elektromanyetik sinyallere karşı bağışıklığını test eden elektro-manyetik uyumluluk standardıdır.
- MIL-PRF-32383: Taşınabilir askeri haberleşme cihazları ve taktik donanımlar için tasarlanan şarj edilebilir sızdırmaz bataryaların performans, güvenlik ve çevrim ömrü gereksinimlerini tanımlayan temel spesifikasyondur.

- MIL-PRF-32271: Yeniden şarj edilemeyen askeri lityum piller (Lityum Kükürt Dioksit - Li-SO2 veya Lityum Manganez Dioksit- Li-MnO2) için geçerli olan, uzun raf ömrü (10-20 yıl) ve acil durum yedek güç gereksinimlerini belirleyen standarttır.
- MIL-PRF-32565: STANAG 4015 ile uyumlu, askeri kara araçlarında motor çalıştırma (SLI), yardımcı donanım güç beslemesi ve motor kapalıyken yürütülen sessiz nöbet operasyonları için geliştirilen nominal 24V lityum iyon "6T" bataryalarının elektriksel ve güvenlik sınırlarını tanımlar.
- RTCA DO-160 / DO-160D: İnsansız hava araçları ve askeri helikopterlerde kullanılan batarya hücreleri için dolaylı yıldırım etkileri, yüksek voltaj deşarjları ve havacılığa özgü RF hassasiyet testlerini içeren sivil/askeri havacılık standardıdır.
- NAVSEA Publication S9310-AQ-SAF-010: NAVSEA Publication S9310-AQ-SAF-010 kapsamında yayımlanan Technical Manual for Navy Lithium Battery Safety Program Responsibilities and Procedures, Deniz Kuvvetleri Bakanlığı genelinde kullanılan lityum pillerin seçimi, tasarımı, test süreçleri, işletimi ve kullanım ömrü sonundaki bertaraf işlemlerine yönelik zorunlu güvenlik esaslarını belirlemektedir. Kılavuz, özellikle termal kaçak kaynaklı tehlikelerin önlenmesi amacıyla, lityum pillerin Deniz Kuvvetlerine ait gemi, denizaltı ve hava platformlarında kullanılmadan önce resmi güvenlik sertifikasyonunun tamamlanmasını şart koşmaktadır.
- MIL-T-18404 "Torpedoes, Environmental Requirements" standardı, torpidoların depolama, taşıma, bakım, operasyon ve kullanım ömürleri boyunca maruz kalabilecekleri çevresel koşulları ve bu koşullara karşı sağlamaları gereken performans gerekliliklerini tanımlamaktadır. Standart; sıcaklık, nem, titreşim, şok, basınç, deniz ortamı etkileri ve diğer çevresel yüklerin torpido sistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirerek, sistemlerin güvenilirlik, emniyet ve görev kabiliyetlerinin korunmasını amaçlamaktadır.
- VG 96932: Şarj edilebilir lityum-iyon hücre, modül ve bataryaların askeri platformlara (deniz üstü, su altı ve güç şebekesi uygulamaları dahil) entegrasyonu için elektriksel performans, mekanik dayanıklılık ve güvenlik gereksinimlerini tanımlayan Alman savunma sanayii standardıdır; hücre/batarya bazında voltaj, kapasite ve kimya sınıfına özgü alt bölümler (örneğin VG 96932-101, VG 96932-120) aracılığıyla platforma özel doğrulama kriterleri belirler.

7.3.1.3. Batarya Malzemeleri

Bu bölümde detaylandırılan malzeme teknolojileri ve elektrokimyasal komponent analizleri, ağırlıklı olarak küresel ticari pazarı domine eden, savunma sanayiinde de kullanım alanı bulmakla birlikte yoğunluklu olarak ulaştırma sektörünün (elektrikli araçlar) ve şebeke ölçekli sabit enerji depolama sistemlerinin (BESS) ana taşıyıcısı olan lityum-iyon ve lityuma en yakın stratejik alternatif konumundaki sodyum-iyon (Na-iyon) hücre kimyaları üzerine kurgulanmıştır.

Savunma sanayii ve kritik mühimmat projeleri açısından hayati önemi haiz olan Isıl Piller (Termal Piller), Gümüş-Çinko (AgO-Zn) bataryalar, rezerv tip piller ve betavoltaik sistemler ise, geleneksel lityum tabanlı hücrelerden tamamen farklı malzeme dinamiklerine ve elektrokimyasal üretim hatlarına sahiptir. Söz konusu askeri rezerv ve niş enerji depolama sistemleri, aktif malzeme toz sentezinden ziyade sistem mühendisliği, kalifikasyon, platform entegrasyonu ve rezerv aktivasyon mekanizmaları yönüyle kritik birer teknoloji alanı teşkil etmektedir. Bu nedenle, taksonomik bütünlüğü korumak adına bu özel askeri pil sistemleri ve süperkapasitör bileşenleri, doğrudan tasarım ve format isterlerinin tartışıldığı 7.3.1.4. Hücre Teknolojileri başlığı altında yer almış ve 7.3.2. Teknoloji Konuları bölümünde ilgili başlıklar gelişim alanları olarak konumlandırılmıştır.

7.3.1.3.1. Katot Malzemeleri

Lityum iyon hücre teknolojisi, enerji yoğunluğu ile operasyonel güvenlik parametreleri arasındaki hassas optimizasyon dengesi üzerine kuruludur. Katot aktif malzemelerinde, nikel tabanlı kimyalar ile demir-fosfat tabanlı kimyalar arasındaki bir yarış devam etmektedir [67] [68]. Ticari olarak kullanılan hücrelerin batarya performans parametreleri Tablo 11'de sunulmaktadır. Yüksek performans ve uzun menzil gerektiren uygulamalarda, kobalt bağımlılığını azaltmak ve gravimetrik enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla nikel oranının %90 ve üzerine çıkarıldığı "ultra-yüksek nikel" katot mimarileri geliştirilmektedir. Buna karşın, LFP teknolojisindeki gerilim kısıtını aşmak amacıyla katot yapısına manganez eklenerek nominal hücre geriliminin 3,2 V seviyesinden 3,7 V - 4,0 V bandına yükseltildiği Lityum Manganez Demir Fosfat (LMFP) hücre kimyaları, giriş seviyesi araçlar ve endüstriyel depolama sistemleri için kritik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [69].

Tablo 11. Ticari olarak kullanılan hücrelerin batarya performans parametreleri

Hücre Kimyası (Katot)	Nominal Hücre Gerilimi (V)	Tipik Gravimetrik Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Sektörel Trendler ve Elektrokimyasal Konumlandırma
LCO (LiCoO2)	3,70 - 3,90	150 - 200	%29,2'lik pazar payı ile tüketici elektroniğinde hacimsel avantajını korumaktadır.
NMC (LiNixMnyCozO2)	3,60 - 3,70	200 - 300	Uzun menzil ve yüksek güç için ultra-yüksek nikel (%90+) katotlara geçiş sürmektedir.
LFP (LiFePO4)	3,20	140 - 180	%25,9 CAGR ile en hızlı büyüyen deşarj kararlı ve düşük maliyetli kimyadır.
LMFP (LiMnxFe1-xPO4)	3,70 - 4,00	180 - 220	LFP güvenliğini yüksek voltaj ve artırılmış enerji yoğunluğu ile birleştirmektedir.
Sodyum-İyon (Na-Oksitler)	2,80 - 3,10	100 - 160	Düşük sıcaklık dayanımı yüksek, alternatif ve maliyet etkin bir elektrokimyasal mimaridir.

Günümüz batarya pazarında hücrelerin fiziksel geometrisini ve form faktörlerini şekillendiren başlıca eğilimler, uygulama alanlarına göre farklılaşmaktadır. Sabit enerji depolama sistemleri (BESS) ve ağır vasıta uygulamalarında, yüksek enerji kapasitesi ve paketleme verimliliği sunan 500 Ah ve üzeri yüksek kapasiteli prizmatik LFP hücrelere yönelik ilgi artmaktadır. Otomotiv uygulamalarında ise silindirik hücrelerde 46 mm çap sınıfındaki büyük formatların, özellikle 4680 tipi hücrelerin, üretim ve entegrasyon açısından öne çıktığı görülmektedir.

Büyük formatlı silindirik hücrelerde elektriksel direnç ve ısıl yönetim performansının iyileştirilmesine yönelik hücre içi bağlantı mimarileri önem kazanmaktadır. Bu kapsamda, tabless ve çoklu bağlantı noktalarına sahip elektrot tasarımları, akım dağılımının iyileştirilmesi ile hücre içi direnç ve ısı oluşumunun azaltılması amacıyla geliştirilmektedir. Bununla birlikte, büyük formatlı hücrelerin üretiminde elektrot kaplama, kurutma, kaynaklama, formasyon ve ısıl yönetim gibi proses parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesi, seri üretim performansının sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır.

Kuru elektrot teknolojisi ise solvent kullanımını ve kurutma ihtiyacını azaltma potansiyeli sayesinde üretim sürecinin enerji ve maliyet yapısının iyileştirilmesine katkı sağlayabilecek, büyük formatlı hücre üretiminde öne çıkan teknolojik gelişim alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir [70] [71] [72].

Bu ana akımlara ek olarak, yapısal entegrasyon ekseninde uzatılmış prizmatik hücre tasarımları ve bunlarla birlikte geliştirilen Hücreden Pakete (Cell-to-Pack / CTP) ve Hücreden Gövdeye (Cell-to-Body / CTB) mimarileri, modül katmanının azaltılması veya ortadan kaldırılması yoluyla batarya paketlerinde hacimsel ve yapısal verimliliğin artırılmasına yönelik önemli bir gelişim alanı oluşturmaktadır. Blade olarak adlandırılan uzun prizmatik hücre tasarımları da bu yaklaşımın öne çıkan örnekleri arasında yer almakta; hücrelerin paket içerisindeki yerleşim verimliliğini artırarak LFP tabanlı sistemlerde enerji yoğunluğu ve menzil performansının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, geçmişte otomotiv uygulamalarında yapısal entegrasyon ve mekanik dayanım açısından çeşitli sınırlamalarla karşılaşan kese (Pouch) tipi hücreler, katı hâl batarya teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte yeniden değerlendirilen bir form faktörü olarak öne çıkmaktadır. Katı elektrolitlerin ve yeni nesil hücre mimarilerinin sunduğu tasarım esnekliği, hücre ambalajının ve bileşenlerinin optimize edilmesine olanak sağlayarak enerji yoğunluğu, ağırlık ve paketleme verimliliği açısından avantajlar oluşturabilir. Bu özellikler, kese hücrelerini yüksek enerji yoğunluğunun ve düşük ağırlığın öncelikli olduğu elektrikli araç, havacılık ve bazı yüksek performanslı uygulamalar açısından değerlendirilebilir bir seçenek haline getirmektedir [73].

Elektrokimyasal gelişim eğrisinin ileri aşamalarında katı hal batarya sistemleri öne çıkmaktadır. Yanıcı sıvı organik elektrolitler yerine katı hal iyonik iletkenlerin kullanılması, hücre güvenliği ve termal kararlılık açısından önemli avantajlar sunarken, anot tarafında saf lityum metal kullanımına olanak sağlayarak teorik gravimetrik enerji yoğunluğunun 400 Wh/kg seviyesinin üzerine çıkabilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, tam katı hal hücrelerde karşılaşılan katı-katı arayüzey direnci ve endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinin geliştirilmesine yönelik ihtiyaçlar nedeniyle yarı katı hal (semi-solid) hücre teknolojileri önemli bir geçiş yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Yarı katı hal hücrelerde, elektrotlar arasındaki temas ve iyonik iletkenliği iyileştirmek amacıyla sınırlı miktarda jel veya sıvı elektrolit içeren hibrit tasarımlar kullanılmaktadır [74]. Küresel üreticiler, 2025 yılı sonunda 60 Ah kapasiteli tam katı hal hücre numunelerinin doğrulanmasını tamamlayarak 2026 yılı itibarıyla yarı katı hal hücrelerin GWh ölçekli seri üretimine geçişi hedeflemektedir. Katı hal geçişi; özellikle havacılık, yüksek performanslı EV'ler ve hassas askeri uygulamalar için devrim niteliğinde bir performans sıçraması vaat etmektedir.

OÇG çalışma grubu kapsamında bu kısımda ticari ve Ar-Ge aşamasındaki önemli katot malzemeleri sistematik biçimde ele alınmıştır.

Fosfat Grubu — (LFP, LMFP, LNMO, LMO)

- **LFP — Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$)**

Tablo 12. LFP Katot Temel Parametreleri

Parametre	Değer	Not
Nominal voltaj	~3,2–3,4 V (vs. Li/Li^+)	Termal risk LFP'de çok düşük
Hücre enerji yoğunluğu	150–205 Wh/kg (tipik ~160–180; CATL max 205)	-
Pratik kapasite	~155–175 mAh/g	Saflaştırma ve kaplama kalitesine bağlı
Çevrim ömrü (%80 kap.)	3.000–6.000+ döngü	LFP uzun raf ömrü avantajı
Çalışma sıcaklığı	−30/+60°C (std.); genişletilmiş: −40/+70°C	Askerî formülasyonla −40°C mümkün (Wang vd., 2024)
Termal kaçak başlangıcı	>270°C	NMC811 poly: ~200°C — LFP çok daha güvenli
Türkiye	Eti Maden Li_2CO_3 + ASPİLSAN–Top Material	-

- **LMFP — Lityum Manganez Demir Fosfat ($LiMn_xFe_{1-x}PO_4$)**

LMFP, LFP'nin manganez katkısıyla geliştirilmiş versiyonudur ve temel özellikleri Tablo 13'te verilmiştir. Mn^{2+}/Mn^{3+} redoks çiftinin daha yüksek potansiyeli (~4,0–4,1 V) enerji yoğunluğunu %15–20 artırır. Gotion 240 Wh/kg hücre-seviyesi enerji yoğunluğu bildirmiştir. Mn çözünmesi (Jahn-Teller distorsiyonu) sorunu yüzey kaplamaları (ZrO_2, $AlPO_4$, karbon) ile giderilmektedir [75] [76] [77].

Tablo 13. LFP ve LMFP Karşılaştırması

Parametre	LFP	LMFP	Askerî Değerlendirme
Nominal voltaj	~3,4 V	~3,8–4,1 V	LMFP daha yüksek enerji
Enerji Yoğ. (hücre)	150–205 Wh/kg	185–240 Wh/kg	LMFP İHA menzilini %15–20 uzatır
Termal Güvenlik	Çok Yüksek	Yüksek (kaplama ile)	Her ikisi askerî kriterleri karşılar
Mn Çözünmesi	Yok	Var — kaplama ile giderilir	LMFP için kaplama teknolojisi şart
Çevrim Ömrü	3.000–6.000+	1.800–4.000 döngü	LFP hâlâ üstün
Türkiye Mn Kaynağı	-	Balıkesir, Kütahya rezervleri	Doğrudan precursor hammadde avantajı

- **LNMO — Yüksek Voltajlı Spinel ($LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$)**

LNMO, yaklaşık 4,7 V plato voltajıyla çalışan ve kobalt bağımsız yapısıyla dikkat çeken bir katot malzemesi olup, günümüzde Teknoloji Hazırlık Seviyesi 6 (THS: 6) düzeyinde bulunmaktadır; ancak yüksek voltaj elektroliti zorunluluğu ve Mn çözünmesi kaynaklı kararlılık sorunları, bu olgunluk seviyesine rağmen ticari ölçeğe geçişi geciktirmektedir.

- **Katmanlı Oksit Grubu — (NMC, NCA, NCMA, LCO)**

NMC ailesi, Ni:Mn:Co oranını değiştirerek farklı performans profilleri sunan en yaygın yüksek enerji katot ailesidir ve Tablo 14'te özellikleri verilmiştir. NMC811 polycrystalline'de interparticle cracking çevrim ömrünü ~700–1.200 döngüde sınırlar. Single-crystal (SC) NMC'de 1.500–2.000+ döngü elde edilir; Samsung SDI Gen.5 ve Panasonic bu teknolojiyi katıhal bataryalarında katıhal bataryalarda yol haritasında katot bileşeni olarak konumlandırmaktadır.

Tablo 14. NMC Ailesi ve İlgili Kimyalar Karşılaştırması

Kimya	Ni:Mn:Co	Enerji (Wh/kg)	Güvenlik	Çevrim Ömrü	Co (%)	THS
NMC111	33:33:33	~210	Yüksek	1.500+	~15	9
NMC532	50:30:20	~220	İyi	1.200+	~12	9
NMC622	60:20:20	~230	Orta-İyi	1.200+	~10	9
NMC811 (Poly)	80:10:10	~255	Orta	700–1.200	~5	9
SC-NMC (Ni≥90-95%)	90-95:4-5:1-5	280–320	İyi (SC)	1.500–2.000+	<5	7
NCMA	89:5:5:1 (Al)	~285	İyi	1.200+	~5	8
NCA	80:15:5 (Al)	~270	Orta	700–1.000	~15	9
LCO	0:0:100	~195	Düşük	~500	~100	9

Spinel Grubu — LMO ($LiMn_2O_4$)

Kobalt bağımsız ve düşük maliyetli yapısıyla öne çıkan bu malzeme, yüksek güç performansı sunmakla birlikte, 55°C üzerindeki sıcaklıklarda belirginleşen Mn çözünmesi nedeniyle çevrim ömrü sınırlı kalmakta, bu nedenle sıklıkla NMC ile blend (karışım) halinde kullanılmaktadır; bu olgunluk düzeyiyle THS 9 seviyesinde, yani ticari olarak kanıtlanmış bir teknoloji statüsündedir.

Sodyum-İyon Katotları

Sodyum iyon teknolojisi, hammadde kısıtlamaları ve jeopolitik riskler açısından lityum tabanlı sistemlerin en büyük stratejik rakibi konumundadır Birçok küresel üretici sodyum iyon bataryaların ticari üretimine başladığını ilan etmiştir ve temel katot malzemeleri Tablo 15'de verilmiştir. Özellikle BESS uygulamalarında tercih sebebi olarak görülen bu sistemlerin en büyük avantajı kimyasal olarak Lityum-iyon sistemlere çok benzer özellikler göstermesidir. IEA Global Critical Minerals Outlook 2025'e göre sodyum-iyon teknolojisi, daha çeşitli upstream tedarik zinciri nedeniyle tedarik güvenliği fırsatı sunmaktadır.

Tablo 15. Sodyum-iyon Katot Malzemeleri

Tip	Formül (Örnek)	Kapasite (mAh/g)	Avantaj	Türkiye İçin
P2-Layered Oxide	P2-$Na_{2/3}$[Mn,Ni,Fe] O_2	~120–160	Yüksek hız; CATL Naxtra	Mn+Fe hammadde mevcut
O3-Layered Oxide	O3-$NaFeO_2$ türevleri	~100–140	Yüksek kapasite	Fe bazlı — ucuz hammadde
Prussian Blue (PBA)	$Na_2Fe[Fe(CN)_6]$	~130–160	Düşük T sentezi; ucuz	Fe+Mn — Türkiye'de var
Hibrit P2/O3	CATL Naxtra tipi	~155–175	En iyi pratik perf.	Ar-Ge hedefi

Gelecek Nesil — Li-S ve Li-Hava

Yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle geliştirilme aşamasında olan Li-S bataryalar hem sülfür açısından düşük maliyetli ve bol kaynaklı olması hem de yüksek teorik enerji yoğunluğundan dolayı tercih sebebidir. Tablo 16'de bu tür bataryaların özellikleri sunulmuştur. Li-S ye alternatif olarak kullanılabilen karbon bazlı (Karbon Nanotüpler (CNT) ve Grafen), Geçiş Metali Oksitleri (TiO_2, MnO_2, V_2O_5), Geçiş Metali Sülfürleri (MoS_2, CoS_2, TiS_2), MXene (Geçiş Metali Karbürleri/Nitrürleri), Metal-Organik Çerçeveler (MOF) ve Kovalent-Organik Çerçeveler (COF) ve İletken Polimerler (PANI, PPy, PEDOT) sülfür konak malzemeleri kullanılabilmektedir.

Tablo 16. Gelecek Nesil Katot Malzemeleri

Kimya	Teorik Enerji	Pratik Hedef	Ana Engel	THS
Li-S (Lityum Sülfür)	~2.600 Wh/kg (malz.)	400–600 Wh/kg	Polisülfür shuttle effect; kısa ömür	4–5
Li-O_2 (Li-Air)	~11.400 Wh/kg	Pratikte çok düşük	Karmaşık kimya; nem hassasiyeti	2–3

7.3.1.3.2. Anot Malzemeleri

Doğal ve Sentetik Grafit Anotlar

Anot aktif malzemeleri, şarj edilebilir batarya sistemlerinde hücre performans parametrelerinin optimizasyonu açısından en kritik bileşenlerden biridir. Özellikle son yıllarda ulaştırma ve savunma sektörlerinin temel beklentisi haline gelen "hızlı şarj" kavramının ortaya çıkması, anot tarafındaki arayüzey kinetiği ve malzeme geliştirme çalışmalarının önemini daha da artırmıştır. EIA verilerine göre Çin, küresel doğal grafit üretiminde yaklaşık %79'luk paya sahip olup, grafit işleme ve batarya anot malzemeleri üretiminde de küresel ölçekte yüksek bir yoğunlaşmaya sahiptir. [54]. Bu durum, IEA'nın aktardığı kritik mineral tedarik konsantrasyonu çerçevesinde değerlendirilmelidir [45]. Fiyat/performans ve elektrokimyasal olgunluk parametreleri açısından değerlendirildiğinde, grafit günümüzde ticari lityum iyon hücre pazarını domine etmeye devam etmektedir. Doğal grafit madencilik sonrası küreselleştirme (spheroidization) ve saflaştırma adımlarına ihtiyaç duyarken, sentetik grafit petrol koku veya kömür katranı zifti gibi girdilerin yüksek sıcaklıkta grafitleştirilmesi esasına dayanır. Tablo 17'de doğal ve sentetik grafitin temel özellikleri sunulmuştur ve her iki durum içinde ülkemizde potansiyel mevcuttur.

Tablo 17. Doğal ve Sentetik Grafit Karşılaştırması

Parametre	Doğal Grafit	Sentetik Grafit
Teorik Kapasite	372 mAh/g (LiC_6)	372 mAh/g
Pratik Kapasite	340–365 mAh/g	340–370 mAh/g
ICE (İlk Döngü Verimi)	~%90–94	~%91–94
Hacim Genişlemesi	~%10–12 (şarjda)	~%10–12
Çin Payı (İşlenmiş) (EIA, 2025)	>%80 spheroidization	>%70 grafitleştirme
Türkiye Hammadde	Orhaneli (Bursa) — sınırlı	Tüpraş/Petkim petrol koku potansiyeli
Kısa Vade Strateji	Mozambik/Tanzanya tedarik çeşitlendirme	Needle coke güvencesi; fırın fizibilitesi

Silis Tabanlı Anotlar

Yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu, doğada bol bulunması ve muazzam teorik kapasitesi nedeniyle silisyum (Si), yeni nesil hücre geliştirme faaliyetlerinin en güçlü anot adayı olarak kabul edilmektedir. 'Structural Engineering of Anode Materials for Low-Temperature Lithium-Ion Batteries' başlıklı çalışmada Si-grafit kompozit anotların düşük sıcaklık performansını iyileştirme mekanizmaları ele alınmaktadır [78]. Si teorik kapasitesi 3.579 mAh/g; tam Si kullanımında ~%280–400 hacim genişlemesi mekanik bütünlüğü bozar; bu nedenle Si-grafit kompozit (%5–20 Si) tercih edilir. Tablo 18'de Si ve grafit kompozit elektrotların temel özellikleri verilmiş ve bu sistemlerin kullandığı firmalar paylaşılmıştır. Yakın gelecekte Si içeren kompozit anotların geliştirilerek daha iyi performans sergileyeceği ön görülmektedir.

Tablo 18. Silikon Anot Tipleri

Tip	Kapasite	ICE	Genişleme	THS	Öncü
%5 Si-Grafit	~400 mAh/g	~%91	%15	8	Panasonic, LG ES
%10 Si-Grafit	~440 mAh/g	~%88	%22	8	Samsung SDI Gen.5, BTR
%20 Si-Grafit	~510 mAh/g	~%84	%35	7	Sila Nano, Group14
Si-C Kompozit (SCC)	~1.000–1.500 mAh/g	~%83	%80–120	7	Group14 (SCC55), Nexeon
Tam Silikon	~2.000–3.000+ mAh/g	~%70–75	>%280	5	Sila Nano, Enovix

Sert/Yumuşak Karbonlar ve Sodyum-İyon Anotları

Grafit kristal yapısının dışındaki amorf karbon formları da hücre tasarımlarında kendine yer bulmaktadır. Sert karbon (hard carbon) ve yumuşak karbon (soft carbon) olarak adlandırılan bu yapılar, grafit tabakalarının düzensiz ve kristalografik olarak birbirine paralel olmayan yönelimler sergilediği mimarilerdir. Özellikleri Tablo 19'da verilen sert ve yumuşak karbon olarak adlandırılan yapılar şarj edilebilir bataryalarda kullanılmaktadır. Sert karbon olarak isimlendirilen ve grafit tabakalarının düzensiz bir özellik gösterdiği bu malzemeler hem Li-iyon hem de Na-iyon bataryalarda anot olarak kullanılmaktadır. Daha çok Na-iyon bataryalarda kullanılan bu anot malzemesinin en temel avantajı biyo atıklardan kolaylıkla üretilebilmesidir. IEA'ya göre downstream Na-iyon tedarik zinciri hücre, katot ve hard carbon anot olarak hâlâ Çin tarafından domine edilmektedir [45]. Hard carbon, sodyum-iyon bataryaların standart anot malzemesidir; ticari hücrelerde ~200–320 mAh/g kapasite ve ~%75–85 ICE sergilemektedir.

Tablo 19. Hard Carbon ve Soft Carbon Karşılaştırması

Parametre	Hard Carbon	Soft Carbon
Na Kapasitesi	200–320 mAh/g	~150–200 mAh/g
ICE (%)	~75–85	~85–90
Hacim Genişlemesi	~%8	~%5
Hammadde	Reçine, selüloz, biyokütle	Petkok, zift
Türkiye Potansiyeli	Biyokütle bazlı (buğday, fındık, pamuk atığı)	Tüpraş/Petkim altyapısıyla

Lityum Titanyum Oksit (LTO - $Li_4Ti_5O_{12}$)

Yüksek performans özelliğine sahip en önemli anot malzemelerinden birisi LTO yapısıdır. LTO sıfır gerilme anotu olarak isimlendirilmekte ve şarj/deşarj sırasında hacim değişimi <0,1% şeklindedir. Bu özellik 10.000–30.000+ döngü ömrü, dendrit sorunun olmaması ve aşırı şarj toleransı sağlar. Nominal hücre voltajının yaklaşık 1,55 V seviyesinde olması, yaklaşık 175 mAh/g özgül kapasiteyle birlikte değerlendirildiğinde enerji yoğunluğunu sınırlasa da, yüksek güvenilirlik ve güvenlik gerektiren askerî ve kritik altyapı uygulamalarında önemli bir seçenek oluşturmaktadır.

Gelecek Nesil ve Gelişmekte Olan Anot Malzemeleri

Özellikleri ve kullanım alanlarına göre birçok anot malzemesi keşfedilmiş ve bunlardan bazıları Tablo 20'de verilmiştir. Anot malzemesi seçiminde, uygulama gereksinimlerinin yanı sıra hammadde bulunabilirliği ve maliyet-performans dengesi gibi faktörlerin belirleyici olduğu görülmektedir.

Tablo 20. Gelişmekte Olan Anot Malzemeleri

Malzeme	Kapasite	Sistem	THS	Not
TiO_2 (Anatas)	~168 mAh/g	Li/Na	6–7	Ucuz; LTO benzeri güvenlik
Kalay (Sn)	~994 mAh/g (Li)	Li/Na	5	~%300 genişleme; nano formülasyon şart
Antimon (Sb)	~660 mAh/g (Na)	Na	5	Na-iyon için cazip; karbon kompozit gerekli
Kırmızı Fosfor (P)	~2.596 mAh/g	Li/Na	4	%300–400 genişleme; nem hassas
Lityum Metal (Li°)	3.860 mAh/g	Li-SSB	5	KHB anotu; dendrit sorunu çözülmeli

7.3.1.3.3. Seperatör Teknolojileri

Batarya hücrelerinin güvenli ve kararlı bir şekilde çalışmasında en kritik komponentlerin başında separatör (ayrıştırıcı) sistemleri gelmektedir. Yapılan araştırma-geliştirme ve sanayi çalışmalarında, hücre içi elektrokimyasal yürütücü kuvvetlerin emniyet sınırlarında kalmasını sağlamak üzere farklı fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip separatör tipleri geliştirilmiştir.

Mordor Intelligence verilerine göre küresel lityum-iyon batarya separatör pazarı, özellikle elektrikli araç segmentindeki büyümeyle birlikte genişlemektedir. Küresel üretim kapasitesinin dağılımı incelendiğinde, Asahi Kasei, SK IE Technology, Toray ve ENTEK gibi önde gelen üreticilerin önemli bir kapasite payına sahip olduğu görülmektedir. Bu yoğunlaşma, yerli hücre üretim altyapısının geliştirilmesi açısından separatör teknolojilerinde tedarik çeşitliliği, yerli üretim kapasitesi ve teknolojiye erişim konularının değerlendirilmesini önemli hale getirmektedir [79] [80].

Standart Poliolefin Separatörler

Poliolefin esaslı membranlar, gözenekli yapıları, kimyasal kararlılıkları ve ısıl kararlılık kısıtları altında sundukları otomatik kapatma (shutdown) mekanizmalarıyla sivil pil pazarının endüstriyel standardını oluşturmaktadır. Hücre içi sıcaklığın kritik eşiklere gelmesi durumunda, bu polimerik gözeneklerin eriyerek kapanması (shutdown) ve iyon hareketini keserek termal kaçağı durdurması temel koruma fonksiyonudur. Poliolefin seperatörlerin temel özellikleri Tablo 21'de gösterilmektedir.

Tablo 21. Poliolefin Separatör Tipleri

Tip	Malzeme	Kalınlık	Shutdown °C	Üretici	THS
PP Monolayer	Polipropilen	~25 µm	~155°C	Celgard	9
PE Monolayer	Polietilen	~16–25 µm	~137°C	Asahi Kasei, Toray	9
PP/PE/PP Trilayer	PP+PE+PP	~25 µm	~137°C (PE)	Celgard 2325/2340	9
PE/PP Bilayer	Polietilen+PP	~20–25 µm	~135°C	SK IE Technology	9

Seramik Kaplı Separatörler

Özellikle kısa devre durumunda seperatörün bozulmasını önlemek amacı ile seramik kaplı seperatörler geliştirilmiştir ve Tablo 22'de temel özellikleri sunulmaktadır. TechSci Research verilerine göre seramik kaplı separatör pazarı 2030'a kadar %20,91 CAGR ile büyümesi beklenmektedir [81] [82] [83]. Al_2O_3 kaplı seramik separatör pazar raporu 2031 projeksiyonlarını kapsamaktadır [84]. Bu segment, Türkiye açısından değerlendirilebilecek önemli fırsat alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 22. Seramik Kaplı Separatör Tipleri

Kaplama Türü	Malzeme	Max Sıcaklık	Ek Kalınlık	Temel Avantaj	THS
Al_2O_3 seramik	Alümina nanopartikül	~180–200°C	+3–5 µm	En yaygın; iyi iyonik iletim	8–9
Boehmite (AlOOH)	Al oksihidroksit	~190°C	+2–4 µm	Hafif; CATL LFP standart kaplaması	8–9
PVDF+Al_2O_3 Hibrit	Polimer + seramik	~200°C	+4–6 µm	Daha iyi elektrolit tutma	7–8
ZrO_2 kaplama	Zirkonyum dioksit	~250°C	+3–5 µm	Çok yüksek sıcaklık toleransı	6–7
SiO_2 kaplama	Silika nanopartikül	~170°C	+2–4 µm	Düşük maliyet alternatif	7
MgO kaplama	Magnezyum oksit	~180°C	+3–5 µm	HF giderimi; stabilite	6

Fonksiyonel ve İleri Separatörler

FactMR verilerine göre batarya separatör kaplama pazarı 2036'ya kadar önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir [85]. İleri separatör teknolojileri için var olan sistemler ile ilgili temel özellikler Tablo 23'de verilmiştir. Global Market Insights 2035 projeksiyonlarına göre separatör pazarı 19,1 milyar dolara ulaşacaktır [86]. Türkiye'nin mevcut polimer ve elektrospinning altyapısı, separatör teknolojilerinde uzmanlaşmış ve katma değerli üretim kapasitesinin geliştirilmesi için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Tablo 23. İleri Separatör Teknolojileri

Tip	Malzeme	Max °C	Mekanik	THS	Türkiye Potansiyeli
Aramid Nanofiber (ANF)	p-Aramid (Kevlar-analogu)	>300°C	Çok Yüksek	6	Altyapısı mevcut
PAN Elektrospun	Poliakrilonitril	~140°C	Orta	6	Karbon fiber öncüsüyle ortak üretim
PVDF-HFP Jel	PVDF kopolimer	~150°C	Orta	7	Semi-solid batarya yol haritası
Selüloz/ Biyopolimer	Bakteriyel selüloz, kitosan	~200°C	Orta	5	Biyokütle avantajı; sürdürülebilir
PVDF Shutdown	PVDF + PE çift katman	~150°C	İyi	7	Sıcaklık tetikli güvenlik

7.3.1.3.4. Elektrolit Sistemleri

Elektrolitler batarya hücre yapılarında katot ve anot kutupları arasındaki lityum ve sodyum iyonlarının transfer mekanizmasını, iyonik iletkenliği ve arayüzey kinetiğini sağlayan sistemlerdir. Batarya hücrelerinin elektrokimyasal çevrim kalitesini, deşarj hızlarını, operasyonel güvenlik sınırlarını ve döngü ömürlerini belirleyen en kritik bileşenlerin başında gelmektedir. Şarj ve deşarj esnasında iyon hareketini (iyonik transport) sağlayan bu yapılar, fiziksel durumlarına ve kimyasal kompozisyonlarına göre temel olarak sıvı, jel/polimer ve katı hal elektrolitleri olarak üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır Çalışma kapsamında; konvansiyonel sıvı organik solvent matrisleri, iletken tuzlar, kararlı pasivasyon tabakası kuran fonksiyonel katkı kimyasalları ile yeni nesil katı hal ve polimerik inorganik elektrolit mimarileri teknik analize tabi tutulmuştur.

Her bir elektrolit sisteminin kendine özgü elektrokimyasal avantajları ve yapısal kısıtları bulunmaktadır. Günümüz kitlesel ticari pazar uygulamalarında ve lityum polimer (Li-Po) hücre yapılarında, sıvı ve jel matrisli elektrolit formülasyonları baskın durumdadır. Buna karşın katı hal elektrolitleri, sıvı çözücülerin barındırdığı yanıcılık ve sızıntı risklerini tamamen ortadan kaldıran yüksek yapısal güvenlik karakterleriyle öne çıkmaktadır. Hızla gelişen bir elektrokimyasal mimari olan katı hal elektrolit teknolojilerinin, yakın gelecekte sivil ve askeri uygulamalarda kitlesel bir standarda dönüşeceği öngörülmektedir.

Konvansiyonel Sıvı Elektrolitler ve Solventler

Bataryalarda kullanılan sıvı elektrolitler Lityum tuzları ve bunların katkı maddeleri şeklinde iki kısımda incelenebilir. İlk olarak çözücüleri incelediğimizde Tablo 24'te de görüldüğü üzere bataryanın çalışma sıcaklığı, akım yoğunluğu beklentisi vb koşullara göre bu solventlerin türü oranı değişmektedir. Solventlerin türü kullanılan katot ve anot mimarisine bağlı olarak da değişiklikler göstermektedir. Bu durum tamamen üreticinin hedefleri ve kullandığı dizayna göre özgünlük içermektedir.

Tablo 24. Temel Elektrolit Solventleri

Solvent	Kısaltma	Erime/Kaynama	Rol	Kritik Not
Etilen karbonat	EC	36°C / 248°C	Bazik solvent — SEI oluşumunda zorunlu	Yüksek dielektrik; katı halde depolar
Dimetil karbonat	DMC	4°C / 90°C	Düşük viskozite; EC ile %30–50	Yanıcı; düşük T kristalleşebilir
Etil metil karbonat	EMC	−55°C / 110°C	Geniş sıcaklık; EV standart	En iyi sıcaklık aralığı kombinasyonu
Propilen karbonat	PC	−49°C / 242°C	Düşük sıcaklık formülasyonlarında	Grafit anotla tek başına uyumsuz
Floro-etilen karbonat	FEC	18°C / —	SEI katkı solvent	Si anot için zorunlu [84]
Sulfolane	SuL	28°C / 285°C	Yüksek voltaj / FR solvent	Düşük yanıcılık; 4,5 V+ stabilitesi
Dimetil eter	DME	−58°C / 85°C	Li metal / Na-iyon	Li-S ve hard carbon Na-iyon için

Elektrolit tuzları

Elektrolitin en önemli komponentinin diğer biri ise tuzlardır. Tablo 25'te bataryalarda genel kullanılan tuzlar, konsantrasyonları, avantaj ve dezavantajları sunulmuştur. Kullanılacak tuzlar ve bu tuzların konsantrasyonları ve solventler her firmaya özgü nitelikte ve uygulamaya özel olarak dizayn edilmektedir.

Tablo 25. Temel Elektrolit Tuzları

Tuz	Konsantrasyon	Avantaj	Dezavantaj	THS
$LiPF_6$	~1,0–1,2 M	En yaygın; iyi iletkenlik; Al korozyon önler	HF üretir; nem hassas; Çin payı %75–80	9
LiFSI	0,5–2,0 M	Yüksek iletkenlik; Si uyumlu; nem toleransı	Yüksek dozda Al korozyon; pahalı	7
LiTFSI	0,5–1,5 M	Termal stabilite; geniş sıcaklık aralığı	Al korozyon (düşük yoğunluk); pahalı	8
LiBOB	0,5–1,0 M	İyi SEI; yüksek sıcaklık stabilitesi	Düşük iletkenlik; sınırlı çözünürlük	7
$NaPF_6$	~1,0 M	Na-iyon standart	Çin bağımlılığı; $LiPF_6$ kadar olgunlaşmadı	7
NaFSI	0,5–1,5 M	Na-iyon geniş sıcaklık; eter uyumlu	Erken pazar — erken giriş fırsatı	5

Kritik elektrolit katkı maddeleri

Elektrolitlerin batarya hücresinde kullanılmasında performansını artıran katkı maddeleri geliştirilmiştir. Bu katkı maddeleri genel olarak Tablo 26'da sunulduğu üzere kullanılan anot, katot, ve çalışma koşullarına göre değişiklik gösterse de katı elektrolit arayüzü (SEI) oluşumunda kararlı bir yapının elde edilmesi batarya performansını etkilediği için kritik bir role sahiptir.

Tablo 26. Temel Elektrolit Katkıları

Katkı	Kısaltma	Fonksiyon	Hedef Uygulama
Florlu etilen karbonat	FEC	SEI stabilizasyon; ICE iyileştirme (Wang vd. 2024)	Si anot — zorunlu katkı
Vinil karbonat	VC	SEI kalite artışı; çevrim ömrü	Genel — NMC ve grafit
LiBOB	LiBOB	SEI katkı; yüksek T stabilitesi	LFP/LMFP formülasyonlar
Tri-etil fosfat	TEP	Flame retardant — yanmazlık	Askerî platformlar — kritik
Dimetil metil fosfonat	DMMP	Flame retardant	Askerî; iyonik iletimi hafif düşürür
F-EMC / FEMC	FEMC	Düşük sıcaklık; donma noktası düşürür	−40°C askerî formülasyon (Wang vd. 2024)

Katı-Hal Batarya Elektrolitleri

Katı elektrolit içeren batarya sistemleri katı hal batarya olarak isimlendirilmiştir. Sıvı elektrolitlerin birçok avantajı olsa da son yıllarda ortaya çıkan batarya yangınları, patlamalar bu malzemelerin alternatifi yeni sistemlerin araştırılmasını mecbur kılmıştır. Burada katı elektrolit çalışmalarını iki ana başlıkta inceleyebiliriz, bunlar inorganik katı elektrolitler ve polimer katı elektrolitler şeklinde sınıflandırılabilir.

Oksit Bazlı Katı Elektrolitler

İnorganik oksit malzemelerde iyonik iletkenliğin yüksek olduğu malzemeler uzun yıllardır bilinmektedir. Bu tür iyonik iletken malzemelerin Lityum-iyon bataryalarda kullanılabilmesi için Lityum içerikli bir kimyasal yapıya sahip olması beklenir. Tablo 27'de görüldüğü üzere iyonik iletkenliği yüksek oksit kimyasal malzemelerin çalışma voltajları ve bu tür malzemelerin batarya sektöründe kullanımına öncülük eden firmalar sunulmuştur. Burada belirtmek gerekir ki oksit katı elektrolitlerin en temel problemleri arayüzey dirençlerinin yüksek olması ve oda sıcaklığının üstündeki (örnek olarak 60oC gibi) sıcaklıklarda performanslarının çok daha iyi olmasıdır.

Tablo 27. Oksit Bazlı Katı Elektrolitler

Malzeme	Formül	İyonik İletkenlik	Pencere (V)	THS	Öncü
LLZO (Garnet)	$Li_7La_3Zr_2O_{12}$	0,1–1,1 mS/cm (kübik, dopantlı)	~0–5	5–6	Toyota, Panasonic
LLZTO	$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$	0,5–1,1 mS/cm	~0–5	5–6	Toyota, Samsung SDI
LATP	$Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$	~1 mS/cm	~3,5–5	5	Ohara Corp.
LAGP	$Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO_4)_3$	~1–2 mS/cm	~3,5–5	5	Araştırma
LIPON	$Li_{2.9}PO_{3.3}N_{0.46}$	~10^{-6} S/cm (ince film)	~0–5,5	6–7	Micro-batarya ticari

Sülfür Bazlı Katı Elektrolitler

Sülfür elektrolitler oda sıcaklığında en yüksek iyonik iletkenliğe (~10–12 mS/cm, LGPS) sahip katı elektrolit sınıfıdır. LGPS iyonik iletkenliği doğrudan sıvı elektrolitlerle kıyaslanabilir. Ana dezavantajları ise H_2S açığa çıkaran hava/nem hassasiyeti olarak görülebilir. Tablo 28'de bazı sülfür bazlı katı elektrolit sistemlerin temel özellikleri, avantaj ve dezavantajları sunulmuştur. Burada hem üretim maliyetleri hemde hassasiyetleri ile dikkat çeken özellikleri mevcuttur.

Tablo 28. Sülfür Bazlı Katı Elektrolitler

Sistem	İyonik İletkenlik	Avantaj	Kısıt	THS
Li_2S-P_2S_5 (75:25)	~0,1–1 mS/cm	İşlenebilirlik; soğuk presleme	H_2S; hava hassas	6
Argyrodite (Li_6PS_5Cl)	~1–10 mS/cm	Ucuz; Ge yok; geniş pencere	Hava hassas	6
LGPS ($Li_{10}GeP_2S_{12}$)	10–12 mS/cm	Rekor iletkenlik; hızlı şarj	Ge pahalı; Li metal uyumu sınırlı	6
LSPS ($Li_{10}SnP_2S_{12}$)	~4 mS/cm	Ge yerine Sn — daha ucuz	LGPS'den düşük iletkenlik	5-6

Polimer ve Kompozit Katı Elektrolitler

Polimer bazlı katı elektrolitlerin hem maliyetleri düşüktür hem de esnek özelliklerinden dolayı arayüzey dirençleri katı elektrolitlere göre çok daha düşüktür. Dolayısı ile sıvı elektrolitlerin yerine kullanılma potansiyelleri yüksektir. Tablo 29'da bazı katı elektrolitler ve özellikleri sunulmuştur. Polimer bazlı katı elektrolitlerin çalışma voltaj aralıklarının kullanılan polimere göre değişmekle birlikte inorganik katı elektrolitler gibi daha düşük olması temel dezavantajlarından biridir. Yeni geliştirilen polimer ve tuz optimizasyon çalışmalarında laboratuvar ortamında 4V üzerinde çalışabilen polimer elektrolitler de geliştirilmiştir. Performanslarının ve kararlılıklarının artırılması için inorganik dolgu malzemeleri ile daha iyi performans sergiledikleri görülmektedir. Kompozit tipi polimer katı elektrolitler iyonik iletkenlik açısından sıvı elektrolitlere rakip olabilecek potansiyele sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 29. Polimer Katı Elektrolitler

Sistem	Polimer	Çalışma Sıcaklığı	İyonik İletkenlik	THS
PEO tabanlı	Poli(etilen oksit)	60–80°C	~10^{-5}–10^{-4} S/cm (60°C)	7
PVDF-HFP Jel	PVDF kopolimer	Oda sıc.	~10^{-4}–10^{-3} S/cm	7
PAN tabanlı	Poliakrilonitril	Oda sıc.	~10^{-4} S/cm	6
Polimer+Seramik Kompozit	PEO+LLZO/LATP	Geniş	~10^{-4}–10^{-3} S/cm	6

Katı-Hal Batarya Sistemleri Açısından Değerlendirme

Katı hal bataryalar özellikle yüksek güvenlik özellikleri ile hem günlük hayatta hem de savunma sanayi açısından büyük öneme sahiptir. Tablo 30'da bahsedilen katı elektrolitlerin değerlendirilmesi sunulmuştur. Tabloda sunulan değerlendirmeler, polimer kompozit katı elektrolit kullanan katı hâl bataryaların yakın gelecekte yaygınlaşma potansiyeline işaret etmektedir.

Tablo 30. Katı-Hal Batarya Teknoloji Sistemi Karşılaştırması

Tipi	Enerji Yoğ.	Güvenlik	Üretim Kolaylığı	2030 Seri Üretim	THS
Polimer SS (PEO)	150–200 Wh/kg	Çok Yüksek	Kolay (rulo-rulo)	Mümkün (sınırlı)	7
Yarı-Katı (Semi-solid)	220–280 Wh/kg	Yüksek	Orta	Muhtemel	7
Sülfür SS (LGPS/Argy.)	350–400 Wh/kg	Çok Yüksek	Zor (kuru oda)	Zorlu	6
Oksit SS (LLZO)	350–400 Wh/kg	Çok Yüksek	Çok Zor (sinterleme)	Düşük olasılık	5-6
LIPON (ince film)	350–400 Wh/kg	Çok Yüksek	Çok Zor (sputtering)	Niş (mikro)	5-6

7.3.1.3.5. Diğer Bileşenler

Bir batarya hücresinin kararlı çalışması, yüksek enerji yoğunluğu sunması ve hedeflenen takvim ömrüne ulaşabilmesi için aktif elektrokimyasal malzemelerin dışsal ve içsel etkenlere karşı kusursuz bir mekanik matris içinde korunması gerekir. Bu kapsamda, hücre mimarisini tamamlayan yardımcı elemanlar; çevresel izolasyon, yapısal kararlılık, homojen parça dağılımı ve düşük iç direnç (IR) eldesi gibi fonksiyonel görevleri üstlenmektedir. OÇG-1 faaliyetleri kapsamında, aktif bileşenlerin dışındaki bu kritik tamamlayıcı malzemeler üç ana başlık altında incelenmiştir:

Kutu ve Kapak Sistemleri

Kutu ve kapak bileşenleri, batarya hücresinin form faktörünü (silindirik, prizmatik veya kese/pouch) belirleyen, elektrokimyasal iç yapıyı atmosferik nem, oksijen ve mekanik darbelerden koruyan dış kabuktur. Hücre içi sızdırmazlığın sürdürülmesi, elektrolit buharlaşmasının önlenmesi ve aşırı basınç durumunda hücrenin patlamasını engelleyen emniyet valflerinin (venting) entegrasyonu bu sistemlerin birincil görevidir [27].

Prizmatik ve Silindirik Hücre Kutuları: Genellikle hafiflik, yüksek mekanik mukavemet, iyi ısı transferi kabiliyeti ve korozyon direnci nedeniyle Alüminyum (özellikle Al 3003 alaşımı) veya nikel kaplı çelik malzemelerden üretilir.

Kese (Pouch) Hücre Ambalajları: Esnek form faktörlü hücrelerde alüminyum lamine filmler kullanılır. Bu filmler çok katmanlı olup, en dışta mekanik koruma sağlayan naylon/PET, ortada nem ve gaz bariyeri kuran alüminyum folyo, en içte ise elektrolite dayanıklı, ısıl yapışma sağlayan polipropilen (PP) katman barındırır.

Kapak ve Emniyet Ventilleri: Hücre kapakları, artı ve eksi kutup terminallerini mekanik olarak taşırken, içeride gaz basıncı kritik eşiğe ulaştığında kontrollü yırtılma sağlayan akıllı emniyet diskleri ve CID (Current Interruption Device) gibi akım kesici devre elemanlarıyla donatılır.

Bağlayıcılar

Bağlayıcılar, elektrot üretim prosesinde katot veya anot aktif malzeme tozlarını, iletken karbon katkılarını birbirine bağlayan ve bu kompozit yapının metalik akım toplayıcı folyo yüzeyine güçlü bir şekilde yapışmasını sağlayan polimerik zincirlerdir. Elektrot ağırlığının yalnızca %1 - %5 gibi küçük bir kısmını oluştursalar da elektrotun mekanik esnekliğini, çevrim ömrünü ve şarj/deşarj esnasında yaşanan hacimsel değişimlere karşı dayanımını doğrudan belirlerler.

PVDF (Poliviniliden Florür): Özellikle katot elektrot formülasyonlarında ve yüksek voltaj tasarımlarında endüstriyel standarttır. Elektrokimyasal kararlılığı ve termal dayanımı mükemmeldir; ancak çözücü olarak toksik ve pahalı olan NMP (N-Metil-2-Pirolidon) kullanımını zorunlu kılması en büyük dezavantajıdır.

SBR / CMC (Stiren Bütadyen Kauçuk / Karboksimetil Selüloz): Grafit bazlı anot üretiminde su bazlı yeşil proseslere imkan tanıyan, çevre dostu ve düşük maliyetli standart bağlayıcı kombinasyonudur. CMC mekanik stabilizesi ve reoloji ajanlığı yaparken, SBR yüksek esneklik ve yapışma kuvveti sağlar.

Yeni Nesil Bağlayıcılar (PAA, Aljinat, Kitosan): Özellikle %10 ve üzeri oranlarda silikon içeren yüksek kapasiteli anot mimarilerinde, silikonun %300'ü bulan hacimsel genleşmesini absorbe edebilmek amacıyla yüksek gerilme direncine sahip akıllı polimerik bağlayıcılar (Poliakrilik Asit - PAA vb.) geliştirilmektedir.

Akım Toplayıcılar

Akım toplayıcılar, elektrot katmanından üretilen veya dış kaynaktan hücreye beslenen elektronların kayıpsız bir şekilde toplanmasını ve terminal kulakçıklarına (tabs) iletilmesini sağlayan, elektrokimyasal olarak pasif metalik folyolardır. Yüksek elektriksel iletkenlik, düşük iç direnç, kimyasal korozyona karşı tam kararlılık ve elektrot kaplama proseslerine uygun mekanik mukavemet sergilemek zorundadırlar.

Katot Akım Toplayıcı (Alüminyum Folyo): Katot tarafındaki yüksek çalışma voltajlarında elektrokimyasal korozyona ve oksidasyona uğramayan Alüminyum (Al) folyolar kullanılır. Tipik kalınlıkları 10 – 15 µm aralığındadır. Hücre enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla bu kalınlıkların düşürülmesi hedeflenmektedir.

Anot Akım Toplayıcı (Bakır Folyo): Anot tarafındaki düşük çalışma potansiyellerinde lityum ile alaşım oluşturmadığı için Bakır (Cu) folyolar tercih edilir (Alüminyum düşük voltajda lityum ile alaşımlandığı için anot tarafında kullanılamaz). Genellikle elektro-depozisyon (ED) yöntemiyle üretilen bu folyoların kalınlıkları 4 - 10 µm bandındadır

Yüzey Modifikasyonları ve Karbon Kaplama: Akım toplayıcı folyoların yüzeyine mikrometre altı düzeyde iletken karbon (karbon kaplı Al/Cu folyo) kaplanarak, aktif malzeme ile metal yüzey arasındaki temas direnci radikal şekilde düşürülür ve hızlı şarj kabiliyeti artırılır.

İletken Karbon

Batarya elektrotlarında, özellikle katot aktif malzemelerinin (NMC, LFP vb.) doğası gereği zayıf olan elektriksel iletkenliğini telafi etmek için bulamaca (slurry) katılan iletken karbonlar, elektronların aktif parçacıklar ile metal akım toplayıcı arasında kesintisiz ve hızlı bir şekilde akmasını sağlayan mikroskobik otoyollar olarak görev yapar. Elektrot yapısı içinde üç boyutlu bir "perkolasyonağı" (iletim köprüleri) kurarak hücrenin iç direncini (empedans) keskin bir şekilde düşüren ve yüksek akım çekişlerinde (C-rate) performansı koruyan bu katkı maddelerinde, geleneksel olarak küresel yapılı karbon siyahı (Super P, Ketjenblack) tercih edilmektedir. Ancak günümüzde hücrenin enerji yoğunluğunu maksimize etmek amacıyla, elektrot kütlesindeki bu aktif olmayan madde oranını %3-5 seviyelerinden %1'in altına düşürebilen ve çok daha az miktarla çok daha güçlü, uzun menzilli bir iletken ağ örebilen Karbon Nanotüpler (CNT) ile grafen dispersiyonları yüksek performanslı hücre üretiminin yeni endüstriyel standardı haline gelmektedir.

7.3.1.4. Hücre Teknolojileri

Batarya teknolojilerindeki gelişim, temel olarak malzemenin moleküler doğası ile makine, imalat ve yazılım mühendisliğinin sınırlarının kesiştiği multidisipliner bir düzlemde gerçekleşmektedir. Bir batarya hücresinin teorik enerji limitlerini, gerilim eğrisini ve elektrokimyasal potansiyelini belirleyen ilk ve en temel unsur şüphesiz hücre kimyasıdır. Ancak endüstriyel ve ticari olgunluk noktasında, kimyasal kompozisyon tek başına yeterli olmamaktadır. Mobilite, havacılık, savunma sanayii ve şebeke ölçekli sabit depolama gibi farklı uygulama alanlarının dayattığı ekstrem operasyonel ihtiyaçlar, hücrenin sadece iç elektrokimyasal mimarisini değil; fiziksel form faktörünü, geometrik tasarımını, ısıl yönetim kabiliyetini ve makro seviyedeki yapısal entegrasyon süreçlerini de radikal bir dönüşüme zorlamaktadır.

Günümüzde hücre düzeyindeki teknolojik evrim; aktif malzeme optimizasyonu, ileri imalat yöntemleri ve akıllı sistem entegrasyonu olmak üzere üç sacayağı üzerinde yükselmektedir. Hücrenin iç direncini (IR) minimumda tutarak hızlı şarj (XFC - Extremely Fast Charging) yeteneğini artırmak, şarj/deşarj döngülerinde meydana gelen mikron altı hacimsel genleşmeleri absorbe edebilmek ve hücre bazındaki enerji yoğunluğunu paket seviyesine (pack-level) kayıpsız aktarabilmek, modern hücre mühendisliğinin en kritik araştırma konularını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, küresel batarya ekosisteminde ticarileşme yarışını belirleyen temel kriter; teorik olarak vaat edilen ultra yüksek performans değerleri ile endüstriyel ölçeklenebilirlik, hammadde tedarik güvenliği ve maliyet etkin üretim ($/kWh) parametreleri arasında kurulacak optimum dengedir. OÇG 1 faaliyetleri kapsamında, geleceğin batarya mimarilerini şekillendirecek hücre kimyaları, format yenilikleri ve yeni nesil imalat teknolojileri bu bütünsel perspektif altında analiz edilmiştir.

7.3.1.4.1. Hücre Kimyası ve Elektrokimyasal Sistemler

Hücre kimyası, bir batarya sisteminin enerji yoğunluğunu, güç kapasitesini, çevrim ömrünü ve güvenlik sınırlarını çizen ana parametredir. Endüstriyel uygulamalarda piller kullanım senaryolarına göre birincil (tek kullanımlık / şarj edilemeyen) ve ikincil (şarj edilebilir) olarak ikiye ayrılırken, arka plandaki elektrokimyasal mimariler geleceğin teknolojilerini şekillendirmektedir:

- **Lityum-İyon (Li-iyon) Hücre Teknolojileri:** Günümüz taşınabilir elektronik ve elektrikli araç (EV) pazarının endüstri standardı ve itici gücü olan temel hücre teknolojisidir.
- **Sodyum-İyon (Na-iyon) Hücre Teknolojileri:** Lityum arzında karşılaşılan tedarik zinciri kısıtlamalarına ve jeopolitik risklere karşı maliyet odaklı, bol bulunan ve şebeke ölçeğindeki sabit enerji depolama sistemleri (BESS) için hızla yükselen stratejik bir alternatiftir.
- **Potasyum-iyon (K-iyon) Hücre Teknolojileri:** Elektrokimyasal potansiyeli ve hammadde bolluğu nedeniyle lityum tabanlı sistemlere alternatif olarak AR-GE seviyesinde incelenen bir diğer iyon transfer mekanizmasıdır.
- **Çok Değerlikli İyon (Multivalent İyon - Mg, Zn, Al vb.) hücre teknolojileri:** Her bir iyonda birden fazla elektron taşıyabilme kapasitesiyle teorik enerji yoğunluğu sınırlarını zorlayan yeni nesil hücre sistemleridir.
- **Katı Hal (Solid-State) Teknolojileri:** Yanıcı sıvı organik elektrolitlerin getirdiği güvenlik ve enerji yoğunluğu limitlerini aşarak, batarya değer zincirinde "oyun değiştirici" (game-changer) olarak kabul edilen mimarilerdir. Geleneksel hücrelere benzer anot ve katot yapıları barındırmasına rağmen, geliştirilen özel katı hal iyonik iletken tabakaları vasıtasıyla enerjiyi depolar. Sıvı yerine katı elektrolit kullanılması, hücre bazında enerji yoğunluğunu %50'ye kadar artırmakta, yanma ve termal kaçak riskini neredeyse sıfıra indirmekte ve daha hızlı şarj imkanı sunmaktadır. Geliştirilen kimyasal kompozisyona göre sodyum iyon katı hal veya lityum manganez demir fosfat (LMFP) katı hal hücreleri olarak da sınıflandırılabilmektedir.
- **Anotsuz Bataryalar (Anode-free batteries):** Geleneksel batarya tasarımında yer alan ve başlangıçta aktif malzeme içeren anot katmanının tamamen ortadan kaldırıldığı radikal bir elektrokimyasal dönüşümdür. Bu teknolojide, hücre imal edildiğinde bir anot katmanı bulunmaz; ilk şarj prosesi esnasında katottan gelen lityum veya sodyum iyonları, akım toplayıcı folyo (genellikle bakır) üzerinde ince, metalik bir katman oluşturur. Anot katmanının çıkarılması, hücrenin %20 ile %40 arasında daha küçük ve hafif olmasını sağlayarak litre başına sunulan watt-saat Wh/L değerini teorik limitlerine yaklaştırır. Anotsuz tasarım, sıvı elektrolitlerde metalik lityum birikiminin yol açtığı dendrit (sivri kristaller) ve kısa devre risklerini önlemek adına genellikle katı hal veya jel elektrolit mimarileri ile birlikte kurgulanmaktadır.
- **Lityum-Sülfür (Li-S) Bataryalar:** Katot aktif malzemesi olarak doğada son derece bol, ucuz ve çevre dostu olan kükürtü kullanan, teorik olarak günümüz standart pillerinden 3 ila 5 kat daha yüksek gravimetrik (ağırlıkça) enerji yoğunluğu vaat eden sistemlerdir. En büyük avantajları, sağladıkları bu muazzam hafiflik-enerji oranı ve tedarik zincirinde kritik metallere (kobalt, nikel vb.) bağımlılığı ortadan kaldırmasıyken; kükürdün elektriksel iletkenliğinin zayıf olması, şarj/deşarj sırasında yüksek oranda hacimsel genleşme yaşaması ve hücre ömrünü dramatik şekilde kısaltan "polisülfit mekiği" (polysulfide shuttle) problemi en temel dezavantajlarıdır. Günümüzde standart tüketici elektroniği veya otomobiller için çevrim ömrü henüz yetersiz olsa da; düşük ağırlığın maliyetten ve uzun ömürden çok daha kritik olduğu yüksek irtifa sahte uyduları (HAPS), askeri insansız hava araçları (İHA) ve geleceğin elektrikli havacılık/uzay projeleri gibi niş alanlarda kullanılmak üzere hızla ticarileşme aşamasına geçmektedir.

- **Metal-hava (Metal-air) Bataryalar:** Havada bulunan oksijeni katot aktif maddesi olarak kullandıkları için teorik olarak lityum-iyon pillerden çok daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. En büyük avantajları olan bu ultra yüksek enerji yoğunluğu ve oksijenin sınırsız/ücretsiz olması sayesinde getirdiği düşük maliyet potansiyeline karşın; havadaki nem ve karbondioksitin hücreyi bozması, yavaş reaksiyon kinetiği ve şarj edilebilir (sekonder) versiyonlarındaki (örn. Li-Hava) oldukça zayıf çevrim ömrü en kritik dezavantajlarıdır. Günümüzde ticari olarak Çinko-Hava (Zn-Air) formunda işitme cihazları, tıbbi sensörler, demiryolu ve askeri sinyalizasyon gibi çok uzun süreli ama düşük güç gerektiren alanlarda tek kullanımlık (primer) olarak yaygın şekilde kullanılırken; elektrikli araçlar ve uçaklar için hedeflenen şarj edilebilir versiyonları halen ileri laboratuvar (Ar-Ge) aşamasındadır.
- **Rezerv Piller:** Kritik anlara kadar inaktif kalarak (örneğin elektroliti sonradan eklenerek veya ısıl yollarla aktive edilerek) raf ömrünü on yıllara çıkaran, genellikle savunma ve uzay havacılık odaklı niş sistemlerdir. Füzeler, torpidolar, uçak fırlatma koltukları veya acil durum işaret fişekleri gibi "yıllarca bekleyip tek bir seferde kusursuz çalışması gereken" sistemler rezerv pillerin kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir. Kimya olarak AgO-Zn, AgO-Al Piller, Lityum-Tiyonil Klorür Piller elektrolit dolumu ile aktive olan pillere örnek verilebilir. Deniz altı uygulamalarında deniz suyu ile aktive olabilen rezerv pil uygulamaları da mevcuttur. Termal (Isıl) piller ise rezerv pillerin bir alt başlığı olmakla birlikte içerisinde bulunan tuzların ısı ile eriyik hale gelmesi ile aktive olurlar.
- **Çift iyon hücre Teknolojileri:** Çift iyon hücrelerin çalışma mekanizmasını, geleneksel pillerdeki tek yönlü iyon transferi yerine, merkezden zıt yönlere hareket eden çift taraflı bir sistem olarak düşünebiliriz. Şarj işlemi başladığında, ortadaki elektrolit sıvısının içinde bulunan pozitif yüklü iyonlar eksi kutba (anot) doğru çekilirken, negatif yüklü iyonlar aynı anda artı kutba (katot) depolanır; yani elektrolit içindeki yükleri her iki uca dağıtır. Batarya kullanıldığında (deşarj) ise her iki kutuptaki bu zıt iyonlar eşzamanlı olarak yerlerinden kopar ve tekrar merkeze, elektrolit sıvısına geri döner. Bu yapıda elektrolit sadece iyonların içinden geçip gittiği pasif bir köprü değil, yüklerin bizzat içinden çıkıp tekrar geri döndüğü aktif bir depo gibi çalışır.
- **Hibrit Hücre Teknolojileri:** Bataryaların "enerji yoğunluğu" ile süperkapasitörlerin "güç yoğunluğu" arasındaki o spesifik ve kritik boşluğu dolduran bir köprü konsepttir. Elektrokimyasal enerji depolama (Faradaik süreçler) ile elektrostatik enerji depolamayı (Faradaik olmayan süreçler) tek bir hücre mimarisinde birleştiren sistemlerdir. En bilinen örnekleri olan Lityum-İyon Kapasitörler (LIC) ve Sodyum-İyon Kapasitörler (NIC); bir bataryanın interkalasyon anotuna ve bir süperkapasitörün yüksek yüzey alanlı katoduna (örneğin aktif karbon) sahiptir. Geleneksel Li-iyon pillere göre çok daha yüksek güç yoğunluğu (saniyeler içinde şarj/deşarj olabilme) ve on binlerce çevrime ulaşan uzun ömür sunarken; standart süperkapasitörlerden çok daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşırlar. Özellikle anlık ve çok yüksek akım çekilmesi/basılması gereken rejeneratif frenleme sistemleri (KERS), ağır iş makineleri, şebeke frekans regülasyonu ve ani güç (pulse power) gerektiren endüstriyel/askeri uygulamalarda kullanılabilmektedir.
- **Organik Bataryalar:** Elektrot malzemelerinde (anot, katot veya her ikisi) metal oksitler yerine karbon temelli, doğada çözünebilen ve sürdürülebilir organik moleküllerin kullanıldığı bir teknolojidir. Bu bataryalar "yeşil enerji" vizyonunun en önemli parçalarından biridir. Organik piller, giyilebilir teknolojiler için en uygun adaylardır.
- **Betavoltaik Piller (Nükleer Piller):** Radyoaktif izotopların (örneğin Trityum veya Nikel-63) beta bozunumu sırasında yaydığı yüksek enerjili elektronları, yarı iletken malzemeler (p-n eklemleri) yardımıyla doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Enerji ve güç yoğunlukları mikro-watt seviyelerinde kalsa da, çevresel koşullardan bağımsız olarak izotopun yarı ömrüne göre on yıllarca (20-50 yıl) kesintisiz güç sağlayabilirler. Uzay görevleri, derin deniz sensörleri, askeri uygulamalar ve tıbbi implantlar gibi şarjın veya bakımın imkânsız olduğu ekstrem senaryolar için tasarlanmışlardır.
- **Kuantum Piller:** Geleneksel elektrokimyasal kütle transferi yerine, enerjiyi depolamak ve aktarmak için kuantum dolanıklık (quantum entanglement) ve süper-ışıma (superradiance) gibi kuantum fiziği prensiplerini kullanan, henüz teorik ve erken laboratuvar aşamasındaki konseptlerdir [87]. Geleneksel bataryalar kimyasal bağlarda enerji tutarken, kuantum bataryalar enerjiyi fotonlar (ışık parçacıkları) veya atomik enerji seviyeleri aracılığıyla depolar. Foton Hapsetme ile bir mikro-kavite (microcavity) içine hapsedilen ışık ve madde etkileşime sokularak enerji depolanabilir. Süper-radyans sayesinde birçok kuantum biriminin (örneğin yapay

atomların) aynı anda ve eşgüdümlü olarak enerji yayması veya soğurması ilkesine dayanır. Kuantum pillerinin en çarpıcı vaadi, sisteme eklenen hücre/parçacık sayısı arttıkça şarj süresinin kısalması potansiyelidir (super-extensive charging). Bu durum, termodinamiğin klasik sınırlarını aşarak gelecekte neredeyse anlık şarj olabilen sistemlerin kapısını aralamaktadır.

7.3.1.4.2. Uygulama ve Hücre Formatı İlişkisi

Geleneksel olarak hücreler silindirik, prizmatik veya kese (pouch) formatlarında üretilirken, günümüzde uygulama alanlarının genişlemesi yeni entegre hücre formatlarını zorunlu kılmaktadır. Batarya artık sistemden bağımsız bir enerji deposu değil, platformun entegre bir yapısal parçası haline gelmektedir.

Yapısal Bataryalar (Structural Batteries): Elektrikli araçlarda veya havacılık platformlarında, bataryanın sadece enerji sağlamakla kalmayıp aynı zamanda aracın şasisinin mekanik bir yük taşıyıcı parçası olarak görev yaptığı yenilikçi tasarımlardır [88]. Sistem seviyesinde (pack-level) radikal bir ağırlık tasarrufu ve hacimsel verimlilik sağlayan bu teknolojinin kalbinde katı polimer elektrolitler veya hibrit yarı-katı sistemler yer almaktadır. Bu doğrultuda yürütülen araştırmalar, hem iyon iletkenliği olan hem de epoksi reçine gibi sertleşerek yüksek mekanik dayanım sağlayan multifonksiyonel elektrolitler ile karbon fiberlerin anot/katot görevi gördüğü kompozit yapılar üzerine yoğunlaşmıştır.

Bıçak (Blade) Tipi Hücreler: Yapısal bataryalar konseptinin endüstriyel ölçekteki en başarılı örneklerinden biridir. Bıçak tipi tasarım, bir bıçak namlusu gibi uzun, ince ve yassı bir prizmatik form faktörüne sahiptir [89]. Bu hücreler, modül ara katmanlarına ihtiyaç duymadan doğrudan batarya paketine (Cell-to-Pack / CTP) dizilerek paketin mekanik gövde rijitliğini ve burulma dayanımını bizzat üstlenmektedir [90].

Uygulama Odaklı Piller: Pil formatları, hedef sistemlerin özel gereksinimlerinin etkisi ile gelişimini sürdürmektedir. Bu doğrultuda; giyilebilir teknolojiler için mikro/esnek piller, şebeke ölçekli depolama (BESS) tesisleri için 500 Ah üzeri devasa konteyner tipi prizmatik hücreler veya taktik dronlar için ultra yüksek akım deşarjı (>50 C) sağlayabilen özel güç hücreleri üretilmektedir.

Hücre üretim teknolojilerindeki gelişim alanları değerlendirildiğinde; hücre üretim hatlarının verimliliğini, kaplama kalitesini ve ölçek ekonomisini artırmak adına endüstride aşağıda verilen ana gelişim alanları öne çıkmaktadır:

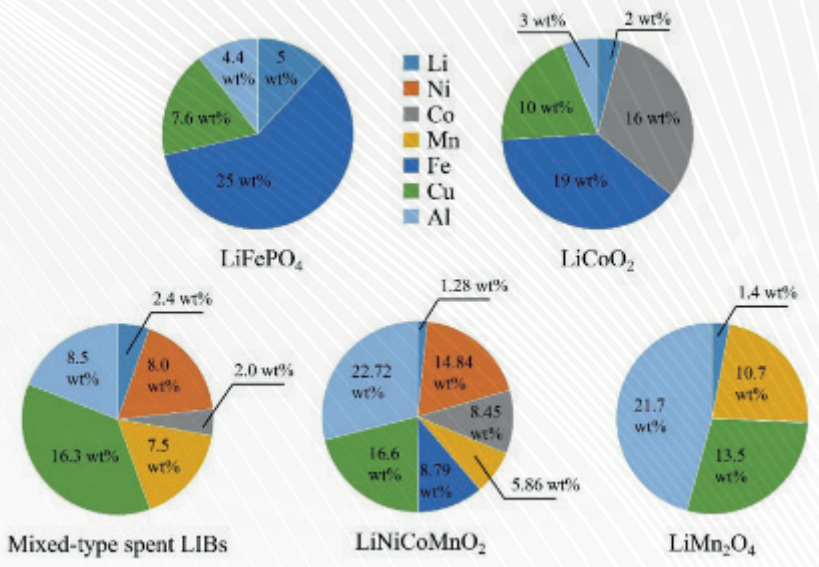
1. **Kuru Elektrot Kaplama (Dry Electrode Coating):** Geleneksel imalatta kullanılan pahalı, toksik ve enerji yoğun çözücülerin (N-Metil-2-pirolidon / NMP gibi) tamamen ortadan kaldırıldığı yenilikçi bir yöntemdir (Tesla bu teknolojinin endüstriyel ölçeklemesi üzerine çalışmaktadır). Yöntem, elektrot aktif tozlarını özel bağlayıcılarla karıştırarak geleneksel ıslak çamur (slurry) oluşturmaksızın, tamamen kuru bir film tabakası haline getirme prensibine dayanır. Devasa kurutma fırınlarını üretim hattından çıkararak fabrika alan ihtiyacını (footprint) küçültür, enerji tüketimini dramatik ölçüde düşürür ve hücre imalat maliyetlerini aşağı çeker [91].
2. **Katı Hal Üretiminin Ölçeklendirilmesi (Scalable Solid-State Manufacturing):** İnorganik veya sülfür bazlı katı elektrolitlerin laboratuvar ortamından çıkarılarak, endüstriyel ölçekteki devasa rulodan-ruloya (roll-to-roll) üretim bantlarına entegre edilmesidir. Kırılgan katı seramiklerin veya polimerik katmanların hassas toleranslarla, yüksek hat hızlarında ve katı-katı arayüzey direnci yaratmaksızın sürekli üretilebilmesi, bu kimyanın ticarileşmesinin önündeki en büyük teknik bariyer olup yoğun bir AR-GE konusudur.
3. **Hücreden Pakete (Cell-to-Pack / CTP):** Hücrelerin ara modül yapılarını tamamen atlayarak doğrudan ana batarya paketine entegre edilmesidir. Paket içi ölü hacimlerden maksimum tasarruf sağlayarak enerji yoğunluğunu paket seviyesinde artırır, parça sayısını ve montaj maliyetini azaltır [98].
4. **Üretimde Dijital İkiz (Digital Twin) ve Yapay Zeka:** Batarya imalat süreçlerindeki mikro düzeydeki kaplama veya hizalama hataları, son üründe felaketlere (termal kaçak, iç kısa devre) yol açabilmektedir. Üretim bandındaki her bir hücrenin dijital bir ikizinin oluşturulması, yapay zeka destekli kameralar ve akıllı sensörlerle kaplama kalınlıklarının veya elektrot geometrilerinin mikrometre hassasiyetinde, gerçek zamanlı olarak optimize edilmesi hücre kalite kontrol süreçlerindeki en büyük teknolojik dönüşüm alanıdır
5. **Hücrede Dış Kılıfında Ek Güvenlik Önlemleri:** Bazı hücre geometrileri hücreyi daha güvenli hale

getirme amacıyla ek donanımlar içermektedir. Prizmatik batarya hücrelerinde olası bir aşırı şarj, kısa devre veya termal kaçak (thermal runaway) durumunda feci arızaları ve patlamaları önlemek için hücre kılıfına (genellikle üst kapağa) entegre edilen iki temel mekanik güvenlik bileşeni bulunur [93]. Tahliye Valfi (Safety Vent / Relief Valve), genellikle kapağın üzerine entegre edilmiş, lazerle inceltilmiş veya yapısal olarak zayıflatılmış bir alüminyum ya da çelik folyo kesitinden oluşur. İç basınç, tasarımın belirlediği kritik bir eşiği (genellikle 0.5 ila 1.5 MPa arası) aştığında bu ince bölge yırtılarak açılır ve içerideki gazın kontrollü bir şekilde dışarı atılmasını (venting) sağlar [94]. Akım Kesici (CID - Current Interrupt Device / OSD – Overcharge Safety Device) ise hücre içinde tehlikeli bir durum oluşmaya başladığında (gaz çıkışı ve basınç artışı ile anlaşılır), hücrenin dış devreyle olan elektriksel bağlantısını fiziksel olarak koparark akım akışını tamamen durduran mekanizmadır. Prizmatik hücrelerde CID, genellikle esnek bir iletken diyafram şeklinde tasarlanır [95]. İç basınç valfin yırtılma seviyesine gelmeden önce diyaframı dışa doğru şişirir. Bu şişme, terminal (kutup) ile iç elektrot yapısı arasındaki kaynaklı zayıf bağlantıyı kırarak devreyi açar. Bazı büyük kapasiteli prizmatik hücrelerde (özellikle elektrikli araçlarda kullanılanlarda), diyafram şiştiğinde devreyi koparmak yerine terminal ile kasa arasında kasti bir kısa devre yaratır. Bu durum, hücrenin içindeki veya dışındaki ana sigortanın (fuse) atmasına neden olarak çok yüksek akımların güvenle kesilmesini sağlar.

6. **Tahribatsız Muayene Yöntemleri:** Pillerin fiziksel bütünlüğünü bozmadan ve operasyon halindeyken analiz edilmesini sağlayarak, mikro kısa devre gibi gizli güvenlik risklerini felakete dönüşmeden (termal kaçak vb.) minimize eder [96]. Pilot ölçekli hatlardan seri üretime kadar olan süreçlerdeki (elektrot kaplama, kaynak, metalik kirlilikler) üretim hatalarını erken evrede yakalayarak, hücre standardizasyonunu yükseltir ve üretim firelerini büyük ölçüde azaltır. Yeni nesil malzemelerin veya hücre içi konstrüksiyonların doğrulama sürelerini kısaltır, araştırma ve geliştirme iterasyonlarını daha analitik, veri odaklı ve hızlı bir zemine oturtur [97].

7.3.1.5. Geri Dönüşüm

Batarya teknolojileri, savunma sanayii, havacılık, uzay sistemleri ve kritik altyapılar başta olmak üzere birçok stratejik alanda vazgeçilmez bir bileşen hâline gelmiştir. Bu teknolojilerin sürekliliği, yalnızca batarya üretim kapasitesine değil; aynı zamanda bataryalarda kullanılan kritik hammaddelere güvenli ve sürdürülebilir erişim sağlanmasına bağlıdır. Küresel ölçekte yaşanan jeopolitik gelişmeler, tedarik zinciri kırılganlıkları ve ihracat kısıtları, batarya hammaddelerinin stratejik önemini her geçen gün artırmaktadır [98]. Atık Lityum-iyon Bataryalar Cu, Al, Co, Ni ve Li gibi birçok değerli metal içerir. Şekil 14'te kullanım ömrünü tamamlamış Lityum-iyon batarya türlerindeki değerli metal içeriklerinin ağırlıkça yüzdesi gösterilmektedir.



Şekil 16. Kullanım ömrünü tamamlamış Lityum-iyon bataryalardaki değerli metallerin ağırıkça miktarları [99].

Lityum-iyon batarya paketleri bir veya birçok hücreden oluşmaktadır ve Bu hücreler tıpkı diğer pil sistemlerinde olduğu gibi enerjiyi üretmek ve depolamaktan birinci derece sorumlu bulunmaktadır. Şekil 16'te, pil üretiminde kullanılan mineral türlerini gösterilmektedir. Buna göre, ikincil kaynaklar arasında lityum (%1,5-7), kobalt (%5-20), manganez (%15-20), bakır (%8-10), alüminyum (%5-8) ve nikel (%5-10) içeren Lityum-iyon bataryalar bulunur [100].

Lityum-iyon bataryalar çoğunlukla metal kasalar, katot-anot elektrotlardan, organik elektrolitlerden, yalıtım malzemelerinden ve ayırıcılardan oluşur. Lityum-iyon batarya bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri doğal cevherden oldukça farklıdır ve karmaşık yapıları nedeniyle, bu atıklardan metallerin ekonomik ve teknolojik olarak geri kazanılması birçok aşama gerektirmektedir. Bu bağlamda batarya geri dönüşümü, çevresel bir atık yönetimi faaliyeti olmanın ötesine geçerek; kritik hammaddelerin ikincil kaynaklar yoluyla güvence altına alınmasını sağlayan stratejik bir araç haline gelmiştir.

Batarya metallerinin geri dönüşümü, aynı zamanda hızla büyüyen yeni bir ticari fırsat alanı olarak öne çıkmaktadır. Nikel, kobalt ve lityum gibi geri dönüştürülmüş batarya metallerinin üretimi, düşük bir başlangıç seviyesinden gelmesine rağmen son dönemde hızlı bir artış göstermiştir. Geri kazanılan metal miktarları, geri dönüşüme uygun mevcut besleme miktarıyla karşılaştırıldığında, 2023 yılında nikel ve kobalt için %40'ın üzerine, lityum için ise %20 seviyesine ulaşmıştır.

Geri dönüştürülmüş batarya metallerinin piyasa değeri de 2015–2023 yılları arasında yaklaşık 11 kat artmış, bu büyümenin yarısından fazlası ise son üç yılda gerçekleşmiştir. Elektrikli araç (EV) bataryaları henüz büyük ölçekli geri dönüşüm için yeterli miktarda atık oluşturmamış olsa da, bu gelişmeler uygun politika teşvikleri sağlandığı takdirde geri dönüşümün önemli ölçüde genişleme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [64].

Lityum, nikel, kobalt ve manganez gibi geleneksel batarya metallerinin yanı sıra; grafit, gümüş, bakır ve alüminyum gibi yeni nesil batarya ve enerji teknolojilerinde önemi artan bileşenlerin geri kazanımı, savunma sanayii açısından doğrudan arz güvenliği ve operasyonel dayanıklılık ile ilişkilidir [101].

An itibari ile bataryalarda kullanılan lityum ve diğer nadir kaynaklar bölgesel olarak yığılmalar gösterse de yakın vadede kullanılmış bataryaların dünya geneline yayılacağı ve direk olarak değerli maden statüsünde değerlendirilerek işlenme potansiyelinden dolayı geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi bu alanda söz sahibi olmak için çok önemli bir adımdır. Dolayısı ile geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi jeopolitik önemden teknoloji merkezli bir yapıya doğru evrileceği açıktır.

Küresel uygulamalar incelendiğinde, batarya geri dönüşümünde başlıca üç teknoloji yaklaşımının öne çıktığı görülmektedir: pirometalurjik, hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm. Buna ek olarak, çevresel etkilerin azaltılması ve süreç verimliliğinin artırılması amacıyla yeşil kimya temelli yaklaşımlar da giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak bu yöntemlerin her biri, geri kazanılan metallerin niteliği, yeni nesil batarya teknolojileriyle uyum ve stratejik değer açısından farklı avantaj ve sınırlılıklara sahiptir.

7.3.1.5.1. Geri Dönüşüm Yaklaşımları

Pirometalurjik Yaklaşımlar

Pirometalurjik geri dönüşüm yaklaşımları, lityum-iyon batarya atıklarının yüksek sıcaklıklarda ergitilerek metalik fazlara ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Küresel ölçekte bu yöntemler; farklı batarya kimyalarına karşı toleranslı olmaları, yüksek işlem kapasitelerine ulaşabilmeleri ve operasyonel olarak görece olgun teknolojiler olmaları nedeniyle yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Pirometalurjik yaklaşımlar, özellikle heterojen ve batarya kimyasının önceden ayrıştırılmasının mümkün olmadığı veya büyük hacimli atıkların kısa sürede güvenli biçimde bertaraf edilmesinin gerektiği durumlarda avantaj sağlamaktadır. Yüksek nikel ve kobalt içeren bataryalarda bu metallerin alaşım veya tuz formunda geri kazanımı mümkündür ve süreç endüstriyel ölçekte istikrarlı biçimde işletilebilmektedir. Bu yönüyle pirometalurji, geri dönüşüm zincirinde ilk güvenli işleme ve hacim azaltma adımı olarak değerlendirilebilir.

Buna karşın pirometalurjik yaklaşımların en önemli sınırlılığı, yalnızca lityum açısından değil; grafit gibi batarya performansı ve gelecek teknolojiler açısından kritik bileşenlerin tamamen yok olmasıdır. Yüksek sıcaklık koşulları altında grafit anot yapısı yanmakta veya yapısal bütünlüğünü kaybederek geri kazanım zincirinin dışına çıkmaktadır. Oysa grafit, lityum-iyon bataryalarda en

yüksek kütlesel paya sahip bileşenlerden biri olmasının yanı sıra, yeni nesil batarya teknolojilerinde de stratejik önemini koruyan bir malzemedir.

Grafitin pirometalurjik süreçlerde geri dönüşüm dışında kalması; yalnızca ekonomik bir kayıp değil, aynı zamanda stratejik bir hammadde kaybı anlamına gelmektedir. Özellikle küresel ölçekte doğal ve sentetik grafit arzının sınırlı sayıda ülke tarafından kontrol edilmesi, grafiti savunma ve ileri teknoloji uygulamaları açısından kritik ve hassas bir bileşen haline getirmektedir.

Bu noktada, grafitin geri kazanımının mümkün olduğu mekanik–hidrometalurjik temelli ayırma yaklaşımlarının stratejik değeri daha da belirginleşmektedir. Nitekim grafit anot ayırma ve geri kazanımına yönelik çalışmaların, ülkemizdeki çalışma ekipleri tarafından uygulamalı olarak ele alındığı; grafitin kontrollü ön işlem ve ayırma adımlarıyla geri kazanılabildiği gösterilmiştir [102]. Bu tür uygulamalar, pirometalurjik yaklaşımlarda kaçınılmaz olan grafit kaybının, alternatif teknolojilerle önlenebileceğini ortaya koymaktadır.

Pirometalurjik süreçler, elektrolit bileşenleri ile birlikte gümüş, bakır ve alüminyum gibi yeni nesil batarya ve enerji teknolojilerinde önemi artan metaller açısından da seçici bir geri kazanım sunmamaktadır. Özellikle düşük konsantrasyonlarda bulunan gümüş gibi metallerin, bu süreçlerde alaşım veya cüruf fazına kontrolsüz biçimde geçmesi, geri dönüşümün stratejik değerini düşürmektedir.

Hidrometalurjik Yaklaşımlar

Hidrometalurjik geri dönüşüm yaklaşımları, batarya atıklarının mekanik ön işlem sonrasında sulu çözeltiler ve seçici kimyasal reaksiyonlar kullanılarak ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemler, pirometalurjik süreçlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda çalışmaları ve metal bazında seçici geri kazanım imkânı sunmaları nedeniyle, batarya sınıfı hammadde üretimi açısından yüksek bir potansiyel taşımaktadır.

Hidrometalurjik süreçlerin etkinliği, işleme giren batarya tipinin (kimyasının) doğru biçimde belirlenmesine doğrudan bağlıdır. NMC, NCA, LFP, LCO veya diğer lityum-iyon batarya türlerinin karışık akımlar halinde hidrometalurjik proseslere beslenmesi hem geri kazanım verimlerini düşürmekte hem de proses kontrolünü ve ürün saflığını ciddi biçimde zorlaştırmaktadır. Özellikle NMC ve LFP gibi metal içerikleri ve kimyasal davranışları birbirinden farklı sistemlerin birlikte işlenmesi; ilave reaktif tüketimine, artan atık oluşumuna ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır [103].

Bu nedenle hidrometalurjik geri dönüşümün ön koşulu, batarya atıklarının kimya bazlı olarak ayrıştırılması ve her batarya türü için uygun proses hattının uygulanmasıdır. Bu yaklaşım hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmelidir.

Batarya geri dönüşümünde hidrometalurji öncesinde uygulanacak cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemleri, prosesin başarısını belirleyen en kritik aşamalardan biridir. Mekanik kırma, eleme, sınıflandırma, yoğunluk ve manyetik ayırma gibi adımlar; batarya bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre ayrıştırılmasını sağlayarak, hidrometalurjik işlemlerin daha sade, kontrollü ve verimli yürütülmesine olanak tanımaktadır [100].

- Cevher hazırlama ve zenginleştirme yaklaşımının uygulanması;
- Ekonomik açıdan: Reaktif tüketimini ve proses süresini azaltmakta,
- Çevresel açıdan: Atık su ve yan ürün oluşumunu sınırlamakta,
- Operasyonel açıdan: Proses karmaşıklığını düşürerek ölçeklenebilirliği artırmaktadır.

Bu bağlamda batarya geri dönüşümü, klasik bir kimyasal işlemden ziyade; madencilikte uygulanan cevher hazırlama ve zenginleştirme prensipleriyle birlikte ele alındığında gerçek potansiyeline ulaşmaktadır. Bu yaklaşım, hidrometalurjinin yalnızca bir ayırma teknolojisi değil; öncesi ve sonrası iyi kurgulanmış entegre bir süreç zinciri olarak tasarlanmasını gerektirmektedir.

Doğrudan Geri Dönüşüm Yaklaşımları

Doğrudan geri dönüşüm yaklaşımları, batarya atıklarından metal iyonlarını ayrı ayrı çözündürmek yerine; katot aktif malzemelerin (ve sınırlı ölçüde anot malzemelerinin) yapısal bütünlüğünü mümkün olduğunca koruyarak geri kazanılmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım, klasik pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlere kıyasla daha yüksek katma değerli ürünler elde edilmesini mümkün kılmakta; ancak batarya kimyasına son derece duyarlı olması nedeniyle kontrollü ve seçici uygulamalar gerektirmektedir.

Doğrudan geri dönüşümün başarısı, işleme giren bataryaların kimya bazlı olarak ayrıştırılmış olmasına doğrudan bağlıdır. NMC, LCO veya LFP gibi farklı katot kimyalarının karışık biçimde beslenmesi, katot kristal yapısının bozulmasına ve geri kazanılan ürünün batarya performansını kaybetmesine neden olmaktadır. Bu nedenle doğrudan geri dönüşüm, ancak homojen ve iyi tanımlanmış batarya akımları için uygulanabilir bir yöntemdir.

Bu özellik, doğrudan geri dönüşümü geniş hacimli ve heterojen atık akımları için değil; kontrollü, izlenebilir ve yüksek kalite hedeflenen uygulamalar için uygun hale getirmektedir.

Doğrudan geri dönüşümün en önemli avantajı, geri kazanılan katot aktif malzemelerin yeniden sentezlenmesine kıyasla:

- Daha düşük enerji tüketimi,
- Daha az kimyasal reaktif kullanımı,
- Daha kısa proses zinciri

sunmasıdır. Bu yönüyle yöntem hem ekonomik hem de çevresel açıdan cazip bir potansiyel taşımaktadır.

Ayrıca, doğrudan geri dönüşüm yaklaşımları; katot malzemelerinin yeniden lityumlanması veya yüzey modifikasyonu gibi işlemlerle yeniden batarya performansına kavuşturulabilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, özellikle nikel-zengin NMC sistemleri için önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

Buna karşın doğrudan geri dönüşüm yaklaşımları; batarya tasarımı, bağlayıcı türleri, katkı maddeleri ve yaşlanma mekanizmalarındaki farklılıklara karşı oldukça hassastır. Ayrıca LFP gibi demir-fosfat bazlı sistemlerde, doğrudan geri dönüşümün ekonomik ve performans avantajları daha sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle yöntemin evrensel bir çözüm olarak görülmesi mümkün değildir.

Yeşil Kimya Yaklaşımları (Solventsiz Geri Dönüşüm ve Biyoliç)

Yeşil kimya temelli geri dönüşüm yaklaşımları, batarya geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkilerini azaltmayı ve kimyasal tüketimini sınırlamayı hedeflemektedir. Solventsiz geri dönüşüm ve biyoliç gibi yöntemler, özellikle enerji tüketimi ve atık oluşumu açısından avantaj sunmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, günümüz itibarıyla endüstriyel olgunluk seviyesine ulaşmamış, çoğunlukla Ar-Ge ve pilot ölçek aşamasında bulunan yöntemlerdir.

7.3.1.5.2. Batarya Pasaportu ve İzlenebilirlik

Batarya pasaportu uygulamaları, bataryaların üretiminden kullanım sonuna kadar olan süreçte kimya, içerik, kullanım geçmişi ve çevresel etki bilgilerinin izlenmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, geri dönüşüm süreçlerinde kimya-özgül ayırma ve doğru teknoloji seçimi açısından kritik bir altyapı sunmaktadır.

7.3.1.5.3. Mevzuat, Yeşil Mutabakat ve Stratejik Uyum

Batarya geri dönüşümüne ilişkin mevzuat ve Yeşil Mutabakat çerçevesi, ilk bakışta kısıtlayıcı bir unsur gibi görünse de doğru şekilde ele alındığında yerli geri dönüşüm kapasitesini teşvik eden bir kaldıraç işlevi görebilmektedir. Geri kazanım hedefleri, geri dönüştürülmüş içerik zorunlulukları ve izlenebilirlik gereklilikleri, Türkiye için stratejik geri dönüşüm altyapısının hızla geliştirilmesi açısından fırsat sunmaktadır.

Bu çerçeve yalnızca dış düzenlemelere uyum ihtiyacından ibaret olmayıp, aynı zamanda ulusal politika belgelerinde de karşılık bulan bir yönelimdir. Nitekim 12. Kalkınma Planı'nda bataryaların toplanması ve geri dönüştürülmesine yönelik kapasitenin geliştirilmesi amacıyla AB Batarya ve Batarya Atıkları Tüzüğü'ne uyum sağlanacağı açık bir politika hedefi olarak tanımlanmıştır.

7.3.1.5.4. İkinci Ömür Uygulamaları

İkinci ömür uygulamaları, kullanım ömrü sona ermiş ancak belirli bir kapasiteyi hala koruyan bataryaların, enerji depolama gibi ikincil alanlarda değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu yaklaşım, bataryaların geri dönüşüme girmeden önce ekonomik değer üretmesini sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte savunma ve kritik altyapı uygulamaları açısından ikinci ömür bataryalar; performans belirsizliği, güvenlik riskleri ve izlenebilirlik sorunları nedeniyle sınırlı ve kontrollü alanlarda değerlendirilmelidir. Bu bağlamda ikinci ömür uygulamaları, geri dönüşümün alternatifi değil; geri dönüşüme giden süreci geciktiren sınırlı bir ara aşama olarak ele alınmalıdır.

7.3.2. Teknoloji Konuları

Tablo 31. OÇG 1 Yakın Vade Konu Önerileri

#	Konu Sınıfı	Konu Adı
1	Rezerv tip pil teknolojileri	Bu bölüm raporun Hizmete Özel versiyonunda bulunmaktadır.
2	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
3	Hücre üretim teknolojileri	
4	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
5	Katı hal teknolojileri	
6	Rezerv tip pil teknolojileri	
7	Hücre malzeme teknolojileri	
8	Hücre üretim teknolojileri	
9	Katı hal teknolojileri	
10	Rezerv tip pil teknolojileri	
11	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
12	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
13	Hücre geometrileri teknolojileri	
14	Hücre malzeme teknolojileri	
15	Hücre malzeme teknolojileri	
16	Hücre üretim teknolojileri	
17	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
18	Geri dönüşüm teknolojileri	
19	Katı hal teknolojileri	
20	Hücre üretim teknolojileri	
21	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
22	Hücre malzeme teknolojileri	
23	Hücre malzeme teknolojileri	
24	Geri dönüşüm teknolojileri	

Tablo 32. OÇG 1 Uzak Vade Konu Önerileri

#	Konu Sınıfı	Konu Adı
1	Hücre malzeme teknolojileri	Bu bölüm raporun Hizmete Özel versiyonunda bulunmaktadır.
2	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	
3	Hücre malzeme teknolojileri	
4	Geri dönüşüm teknolojileri	
5	Hücre üretim ve malzeme teknolojileri	
6	Katı hal teknolojileri	
7	Giyilebilir hücre teknolojisi	
8	Hücre malzeme teknolojileri	
9	Geri dönüşüm teknolojileri	
10	Hücre üretim teknolojileri	
11	Geri dönüşüm teknolojileri	
12	Süperkapasitör teknolojileri	
13	Hücre malzeme teknolojileri	
14	Hücre üretim teknolojileri	
15	Geri dönüşüm teknolojileri	
16	Hücre üretim teknolojileri	
17	Hücre malzeme teknolojileri	
18	Hücre malzeme ve üretim teknolojileri	

7.3.3. Değerlendirmeler

Çalışma kapsamında; küresel değer zincirindeki jeopolitik risk haritaları, Türkiye'nin mevcut endüstriyel kabiliyetleri ve elektrokimyasal hammadde potansiyeli dikey bir senteze tabi tutularak ulusal strateji önerileri yapılandırılmıştır.

Fosfat Grubu ve Yerli Manganez Fırsatı (LFP / LMFP): Fosfat Grubu ve Yerli Manganez Potansiyeli (LFP / LMFP): Hücre düzeyindeki değerlendirmeler, yüksek termal kararlılığı ve güvenlik özellikleri nedeniyle LFP kimyasının özellikle askeri uygulamalar ve sabit enerji depolama sistemleri (BESS) açısından güçlü bir seçenek olduğunu göstermektedir. LFP'nin enerji yoğunluğuna ilişkin sınırlamalarını azaltmayı hedefleyen LMFP teknolojisi ise katot yapısına manganez ilavesiyle daha yüksek çalışma gerilimi ve enerji yoğunluğu potansiyeli sunmaktadır. Türkiye'nin Balıkesir ve Kütahya gibi bölgelerdeki manganez kaynakları, bu teknoloji açısından yerli öncü (precursor) malzeme üretiminin geliştirilmesine yönelik bir potansiyel oluşturmaktadır [104].

Eti Maden ve Yerli Lityum Kaynağı: Ulusal hammadde açısından dikkat çeken gelişmelerden biri, Eti Maden tarafından bor atıklarından lityum karbonat geri kazanımına yönelik yürütülen pilot ölçekli çalışmalardır. Bu tür uygulamalar, bor üretim süreçlerinden ortaya çıkan atıkların katma değerli bir hammaddeye dönüştürülmesi ve yerli lityum tedarik kapasitesinin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır [105].

Sodyum-İyon ve Yerli Sert Karbon (Hard Carbon): Sodyum-iyon batarya teknolojileri, lityum kaynaklarına olan ihtiyacı azaltması ve bazı kritik hammaddelere yönelik bağımlılığı sınırlama potansiyeli nedeniyle alternatif hücre kimyaları arasında öne çıkmaktadır. Bu teknolojinin anot tarafında kullanılan sert karbon açısından ise Türkiye'nin buğday, fındık kabuğu ve pamuk gibi tarımsal biyokütle kaynakları, yerli hammadde geliştirme bakımından değerlendirilebilecek potansiyel girdiler sunmaktadır [106].

Silisyum-Grafit Kompozitleri: Tam silisyum anotların yüksek hacimsel değişim ve mekanik kararsızlık sorunları, bu teknolojinin kısa vadede yaygınlaştırılmasının önündeki temel teknik zorluklar arasında yer almaktadır. Buna karşılık, silisyumun grafit ile kompozit yapıda kullanılması, mevcut anot teknolojileriyle daha kademeli bir geçiş imkânı sunmaktadır.

Geri Dönüşüm Yaklaşımları: Yüksek sıcaklık gerektiren pirometalurjik proseslerde anot grafitinin önemli ölçüde kaybedilmesi ve lityumun cüruf fazında yoğunlaşabilmesi, yöntemin özellikle grafit ve lityumun birlikte geri kazanılmasının hedeflendiği döngüsel ekonomi yaklaşımları açısından bazı sınırlılıklar taşımasına neden olmaktadır. Bu nedenle pirometalurji, özellikle kritik ve yüksek katma değerli malzemelerin mümkün olduğunca korunmasını amaçlayan geri dönüşüm senaryolarında diğer yöntemlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Hidrometalurjik prosesler, uygun proses koşulları ve ön işlem adımlarıyla lityum, nikel ve kobalt gibi metallerin yüksek saflıkta bileşikler halinde geri kazanılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, proses performansı batarya kimyasına göre doğru ve etkin bir tasnif yapılmasına ve hidrometalurji öncesinde uygulanacak fiziksel zenginleştirme adımlarına önemli ölçüde bağlıdır. Yoğunluk ve manyetik ayırma gibi fiziksel yöntemlerin proses akışına entegre edilmesi, hidrometalurji aşamasındaki reaktif ihtiyacının ve atık su yükünün azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Bu çerçevede, geri dönüşüm proseslerinin tek bir yöntem üzerinden değil; kimyasal tasnif, mekanik/fiziksel ön işleme, zenginleştirme ve kimyasal geri kazanım aşamalarının birbirini tamamladığı entegre bir proses zinciri olarak ele alınması, farklı batarya kimyalarının ekonomik ve çevresel özelliklerinin birlikte değerlendirilmesine imkân vermektedir.

Rezerv ve Isıl Pil Teknolojileri: Malzeme ve hücre teknolojileri bölümlerinde değerlendirildiği üzere, mühimmat sistemleri, güdümlü füze ve torpido uygulamalarında kullanılan enerji kaynakları açısından uzun süreli depolama kararlılığı ve gerektiğinde hızlı ve güvenilir aktivasyon önemli teknik gerekliliklerdir. Bu gereksinimler, geleneksel lityum-iyon bataryaların kendi kendine deşarjı ve sıvı elektrolitlerin zamanla gösterdiği performans kaybı nedeniyle belirli uygulamalarda sınırlamalar yaratabilmektedir. Uzun süre rafta bekleme ve ihtiyaç anında tek seferlik yüksek güvenilirlik gerektiren sistemlerde ısıl piller (termal piller) ile rezerv pil teknolojileri (gümüş oksit, lityum-tiyonil klorür vb.), farklı performans gereksinimlerini karşılayabilecek tamamlayıcı enerji çözümleri olarak öne çıkmaktadır.

Giga-Fabrika Yatırımlarında Kuru Elektrot Teknolojisi: Gelecekte kurulabilecek büyük ölçekli batarya üretim tesislerinde geleneksel ıslak çamur (slurry) yönteminin gerektirdiği solvent kullanımı, kurutma süreçleri ve yüksek enerji ihtiyacı, üretim maliyetleri ve çevresel performans açısından dikkate alınması gereken unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle NMP gibi solventlerin kullanımı ve geri kazanımı, proses güvenliği ve çevresel düzenlemeler bakımından ek gereklilikler ortaya çıkarmaktadır. Kuru elektrot kaplama (Dry Electrode Coating) teknolojisi ise solvent kullanımını ve kurutma ihtiyacını azaltması, üretim hattının enerji ve alan gereksinimini düşürme potansiyeli taşıması nedeniyle yeni nesil yüksek hacimli üretim teknolojileri arasında değerlendirilmektedir.

Yapısal Batarya ve Platform Entegrasyonu: Hücre formatları ve paket mimarisindeki gelişmeler, modül katmanının azaltıldığı veya tamamen ortadan kaldırıldığı Cell-to-Pack tasarımlarının yanı sıra, bataryanın aynı zamanda taşıyıcı yapının bir parçası olarak işlev gördüğü yapısal batarya mimarilerine doğru bir yönelime işaret etmektedir. Bu yaklaşım, bataryanın yalnızca enerji depolayan bir bileşen olmaktan çıkarak araç şasisi, İHA gövdesi veya kanadı gibi yapısal unsurlarla bütünleşmesini hedeflemektedir. Türkiye'nin karbon fiber ve ileri kompozit malzeme üretimindeki mevcut yetkinlikleri ile katı hâl ve jel polimer batarya teknolojilerine yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin kesişimi, yapısal batarya uygulamaları açısından değerlendirilebilecek bir gelişim alanı oluşturmaktadır.

7.3.4. GZFT Analizi

Bu bölümde; Türkiye'nin batarya ekosistemindeki mevcut kabiliyetleri, teknolojik olgunluk seviyesi ve küresel pazardaki konumu Batarya Malzemeleri, Hücre Teknolojileri ve Geri Dönüşüm olmak üzere birbirini besleyen üç temel stratejik başlıkta GZFT (SWOT) metodolojisiyle masaya yatırılmış, analiz tabloları sırasıyla Tablo 33, Tablo 34 ve Tablo 35'te paylaşılmıştır.

Tablo 33. Batarya Malzemeleri Konusunun GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Türkiye'nin köklü cevher hazırlama ve zenginleştirme birikimi
Eti Maden'in bor atığından lityum geri kazanım pilot tesisi
Eti Bakır'ın pirit külünden Kobalt (Co), Çinko (Zn) ve Bakır (Cu) üretim deneyimi
Temel bilimler ve mühendislik alanlarında uzmanlaşmış ulusal insan kaynağı
AB-uyumlu mevzuat geliştirme kapasitesi
Üniversiteler ve araştırma merkezlerinde mevcut olan gerekli altyapı ve tecrübe
ZAYIF YÖNLER
Ticari boyutta batarya malzemesi üretimi yapan tesis sayısının yetersizliği
Laboratuvar seviyesindeki başarıların ticari üretime geçişindeki (ölçeklendirme) altyapı ve yatırım eksiklikleri
Yerli sivil hücre üretim kapasitesinin henüz başlangıç aşamasında olması nedeniyle iç pazar talebinin sığ kalması
FIRSATLAR
Küresel tedarik zincirlerinde 2025 yılı itibarıyla artan ihracat kısıtlamaları ve tedarik çeşitlendirme eğilimlerinin, Türkiye'nin mevcut hammadde, sanayi altyapısı ve lojistik avantajları üzerinden bölgesel bir tedarikçi olarak konumlandırması
Jeopolitik konumun getirdiği lojistik avantajlar ve Avrupa'nın "yakından tedarik" stratejilerine entegrasyon potansiyeli
Avrupa Birliği (Horizon Europe vb.) fonlarına erişim ve uluslararası projelerde rol alabilme imkanı
Türkiye'nin lityum, kobalt, nikel, vb kaynakları açısından bir potansiyele sahip olması
TEHDİTLER
Küresel tedarik zincirlerinde 2025 yılı itibarıyla artan ihracat kısıtlamaları ve tedarik çeşitlendirme eğilimlerinin, Türkiye'nin mevcut hammadde, sanayi altyapısı ve lojistik avantajları üzerinden bölgesel bir tedarikçi olarak konumlandırması
Jeopolitik konumun getirdiği lojistik avantajlar ve Avrupa'nın "yakından tedarik" stratejilerine entegrasyon potansiyeli
Avrupa Birliği (Horizon Europe vb.) fonlarına erişim ve uluslararası projelerde rol alabilme imkanı
Türkiye'nin lityum, kobalt, nikel, vb kaynakları açısından bir potansiyele sahip olması

Tablo 34. Hücre Teknolojileri Konusunun GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Devlet araştırma merkezlerinin pilot ölçekli üretim altyapılarına sahip olması
Özel sektör yatırımlarının GWh ölçekli gigafabrikaları hızla devreye alma ve dinamik karar alma kabiliyeti
Küresel ortaklıklar kanalıyla yerli ekosisteme doğrudan bilgi birikimi ve patentli teknoloji transferi imkanı
ZAYIF YÖNLER
Aktif katot ve anot kimyasallarında (lityum, nikel, grafit) ve hammadde rafinasyon süreçlerinde dışa bağımlılığın yüksek olması
Küresel üreticilerin optimize olmuş hat verimliliklerine (+%90) kıyasla, yeni kurulan yerli üretim hatlarında devreye alma dönemindeki başlangıç fire oranlarının yüksek olması
Büyük silindirik ve yüksek kapasiteli prizmatik (+500 Ah) hücrelerin seri üretim proseslerinde endüstriyel tecrübe eksikliği
FIRSATLAR
Hücre ve aktif malzeme Ar-Ge/üretim yatırımlarına yönelik sağlanan stratejik devlet teşvikleri ve korumacı politikalar
Artan sürdürülebilirlik gereklilikleri doğrultusunda, Türkiye'nin Avrupa pazarlarına yakınlığı ve mevcut sanayi altyapısıyla bölgesel üretim ve tedarik merkezi olma potansiyeli
TEHDİTLER
Küresel ölçekte yüksek üretim kapasitesi ve ölçek ekonomilerinin sağladığı maliyet avantajlarının, hücre üretiminde fiyat rekabetini artırması ve yerli üreticilerin kârlılık marjları üzerinde baskı oluşturması
Kuru elektrot ve silikon anot gibi ezber bozan yeni nesil teknolojilere ait temel patentlerin küresel devlerin tekelinde bulunması ve teknolojik blokaj riski.

Tablo 35. Geri Dönüşüm Konusunun GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Türkiye'nin cevher hazırlama, hidrometalurji ve pirometalurji alanlarında köklü bir akademik ve mühendislik altyapısına sahip olması.
Endüstriyel atıklardan ve yan ürünlerden (bor atığı, pirit külü) katma değerli kritik metalleri geri kazanabilme noktasında gelişmiş hidrometalurjik ve proses mühendisliği hafızasının bulunması.
Savunma sanayii ve otomotiv sektörlerindeki artan yerli üretim kabiliyeti sayesinde, geri dönüşüm zincirini besleyecek üretim atıklarının ve Ar-Ge kapasitesinin yerelde bulunması.
AB mevzuatıyla uyum süreçlerinin, geri dönüşüm ve karbon ayak izi izlenebilirliği alanında kurumsal dönüşüm için güçlü bir itici güç oluşturması.
ZAYIF YÖNLER
Lityum-iyon bataryalara özgü, endüstriyel ölçekte entegre ve kapalı döngü siyah kütle işleme ve geri dönüşüm altyapısının henüz sınırlı olması.
Geri dönüştürülmüş malzemelerden "batarya sınıfı" saflıkta kimyasal, aktif malzeme ve prekürsör üretim kapasitesinin yetersizliği.
Ömrünü tamamlamış bataryaların toplama, lojistik, güvenli depolama, sınıflandırma ve izlenebilirlik sistemlerinin ulusal ölçekte henüz standardize edilmemiş olması.
Yeni nesil batarya teknolojilerindeki kimyasal çeşitlenmenin mevcut geri dönüşüm altyapısının teknolojik uyumluluğu ve yatırım fizibilitesi üzerinde risk oluşturması
FIRSATLAR
Türkiye'nin coğrafi konumu ve lojistik altyapısının, çevre ülkelerde oluşan batarya atıklarının toplanması ve işlenmesi açısından bölgesel geri dönüşüm merkezi olma potansiyeli sunması
Yeni nesil batarya teknolojilerinde ve kritik bileşenlerde lityum, nikel, kobaltın yanı sıra gümüş, bakır ve alüminyum gibi metallerin de stratejik öneminin ve ekonomik değerinin artması.
Yeşil enerji dönüşümü, elektrikli araçlar ve savunma sanayii uygulamalarının aynı kritik ham maddeler üzerinde eş zamanlı yarattığı artışının, geri dönüşüm pazarını finansal olarak daha cazip hale getirmesi.
TEHDİTLER
Kritik metallere yönelik küresel arz kısıtları, kaynak ülkelerin uyguladığı ihracat kontrolleri ve jeopolitik gelişmelerin tedarik zincirlerinde belirsizlik ve kırılganlık oluşturması
Geri kazanılan emtialarda (özellikle gümüş, bakır, alüminyum ve lityum) küresel piyasalarda gözlenen yüksek fiyat oynaklığı ve dikey entegre devlerin agresif stratejik stoklama eğilimleri.
Katma değerli hidrometalurjik geri kazanım teknolojilerinde ve spesifik saflaştırma proseslerinde küresel ölçekteki lisans ve patent/know-how bağımlılığı riski.
Batarya kimyasındaki ve hücre tasarımlarındaki hızlı teknolojik değişimlerin, mevcut mekanik veya kimyasal geri dönüşüm tesis yatırımlarını kısa sürede işlevsiz ya da verimsiz bırakabilme ihtimali.

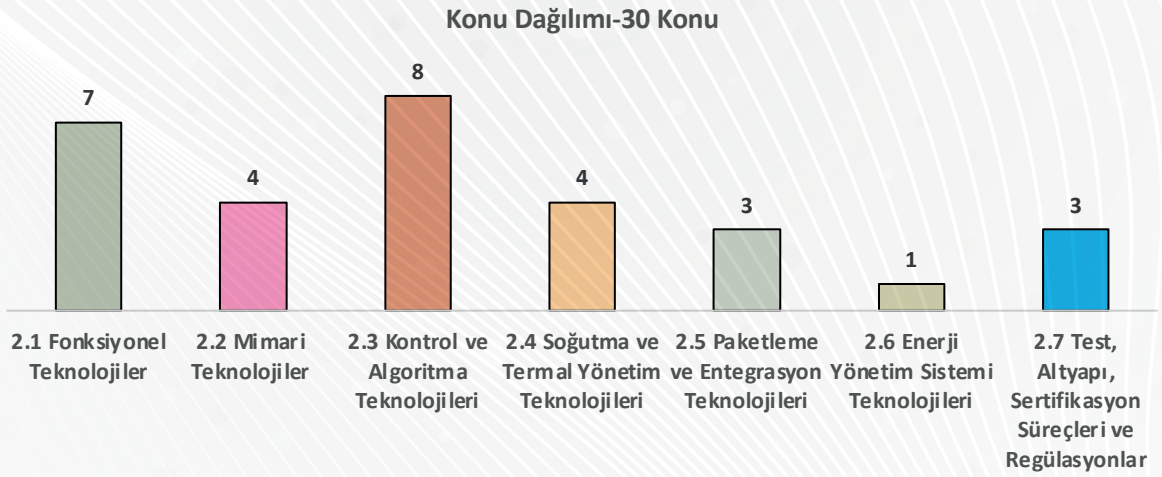
7.4. OÇG 2

OÇG-2 bünyesinde yürütülen veri toplama sürecinde; 53 farklı kamu kurumu, üniversite, özel sektör firması ve sivil toplum kuruluşundan (STK) toplam 85 uzman ve araştırmacıdan geri bildirim alınmıştır. Çalışma grubuna katkı sağlayan paydaşların sektörel dağılımını gösteren detaylı görsel Şekil 17'de detaylandırılmıştır.



Şekil 17. OÇG-2 Katılımcıları

Bu çalışmaların devamı olarak, 4-5 Aralık 2025 tarihlerinde SSB tarafından her iki Odak Çalışma Grubu'nun katılımıyla, ilgili başlıklardaki niş konuların ve Ar-Ge odaklarının tanıtıldığı teknik bir toplantı düzenlenmiştir. OÇG-2 kapsamında gerçekleştirilen bu oturumlarda; 4 farklı üniversite, 5 farklı kamu kurumu ve 9 farklı özel sektör firmasından katılım sağlayan toplam 22 uzman tarafından 30 özgün proje ve konu başlığının sunumu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. 30 Konu Önerisinin Taksonomi Başlıklarına Göre Dağılımı

Sürecin devamında, Alt Çalışma Grupları kendi iç toplantılarını ve genel değerlendirme oturumlarını sürdürerek Türkiye ve dünyadaki duruma ilişkin detaylı raporlama faaliyetlerini olgunlaştırmıştır. Buna paralel olarak; SSB, TUSAŞ ve OÇG liderleri ASPİLSAN ve TÜBİTAK RUTE ile koordineli bir şekilde, toplanan teknik konu başlıkları tasnif edilerek değerlendirilmiştir. 20-21 Nisan 2026 tarihinde paydaşların katılımıyla düzenlenen genişletilmiş toplantıda, bu ortak değerlendirme sonuçları tüm katılımcıların incelemesine sunulmuş; alınan sektörel yorumlar ve geri bildirimler doğrultusunda çalışmaya nihai şekli verilmiştir.

7.4.1. Genel Bilgi

Batarya Yönetim Sistemleri (BMS), modern enerji depolama uygulamalarının güvenli, verimli ve uzun ömürlü işletilmesini sağlayan kritik elektronik sistemlerdir [4]. Elektrikli araçlar (EV), şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemleri (ESS) ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi alanlarda lityum-iyon bataryaların kullanımının hızla artmasıyla birlikte BMS teknolojileri kapsamlı bir dönüşüm yaşamaktadır [5].

7.4.1.1. Fonksiyonel Teknolojiler

7.4.1.1.1. Ölçüm ve İzleme Teknolojileri

BMS'nin çekirdek işlevi, hücre voltajı, akım ve sıcaklık parametrelerinin kesintisiz ölçümüne dayanmaktadır. Voltaj ölçümü yüksek çözünürlüklü ADC'ler ile, akım ölçümü ise shunt dirençleri veya Hall-efekt sensörleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu verilerin doğruluğu SOC/SOH tahmin algoritmalarının güvenilirliğini doğrudan belirlemektedir. Sıcaklık ölçümü için NTC termistörler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, büyük formatlı paketlerde çok noktalı ölçüm zorunluluğu ortaya çıkmaktadır [6]. IoT tabanlı gerçek zamanlı izleme sistemleri, batarya parametrelerinin bulut altyapısında depolanıp analiz edilmesine olanak tanımakta; bu yaklaşım büyük veri analitiğine dayalı tahmin modellerinin geliştirilmesi için güçlü bir altyapı sunmaktadır [7].

7.4.1.1.2. Koruma ve Güvenilirlik Sistemleri

BMS'nin koruma katmanı; aşırı gerilim, düşük gerilim, aşırı akım, kısa devre ve termal sınır ihlali gibi tehlikeli koşullara karşı hücre ve paketi koruyan donanım ve yazılım mekanizmalarını kapsamaktadır [8]. Lityum-iyon bataryalardaki en kritik güvenlik riski olan termal kaçış (thermal runaway), ısıl yönetim sistemleri, gaz sensörleri, basınç monitörleri ve özel kimyasal kaplamalar aracılığıyla önlenmeye çalışılmaktadır [9] [10]. Sertifikasyon gereklilikleri çerçevesinde IEC 62133, UL 2580 ve UN 38.3 gibi uluslararası standartlar, koruma mekanizmalarının tasarım sınırlarını belirlemektedir [11].

7.4.1.1.3. Enerji Dağıtımı ve Performans Optimizasyonu

Hücreler arası gerilim ve kapasite dengesizliği, batarya ömrünü kısaltan ve kullanılabilir enerji kapasitesini azaltan kritik bir işletim sorunudur. Aktif hücre dengeleme yöntemleri (kapasitör, indüktör veya transformatör tabanlı) enerjiyi transfer ederken, pasif yöntemler fazla enerjiyi ısıya dönüştürmektedir [12]. Yapılan kapsamlı karşılaştırmalı çalışmalar, aktif dengelemenin özellikle yüksek performans gerektiren EV uygulamalarında pasif yöntemlere kıyasla belirgin biçimde daha yüksek verim sağladığını ortaya koymaktadır [13].

7.4.1.1.4. İletişim ve Veri Yönetimi

BMS iç ve dış iletişim altyapısı; CAN (Controller Area Network), LIN, SPI, SMBus ve CAN FD gibi protokoller üzerine inşa edilmektedir [5]. Bu protokoller BMS'nin araç kontrol birimi (ECU), şarj istasyonları ve V2X sistemleriyle entegrasyonunu sağlamaktadır [14]. Bulut bilişim entegrasyonu ile yazılım tanımlı araç (SDV) mimarileri, gelecekteki BMS iletişim altyapısını şekillendiren iki temel teknoloji trendini oluşturmaktadır [15].

7.4.1.2. Mimari Teknolojiler

7.4.1.2.1. Merkezi Mimari Yapılar

Merkezi BMS'de tüm algılama, işleme ve kontrol görevleri tek bir kontrol biriminde yürütülmektedir [16]. Bu yaklaşım küçük ve orta boyutlu batarya paketleri için düşük maliyet ve basit sistem entegrasyonu sunmaktadır; ancak kablolama karmaşıklığı ve tek hata noktası (single point of failure) riski, büyük ölçekli uygulamalarda önemli sınırlamalar doğurmaktadır [17].

7.4.1.2.2. Dağıtık, Hibrit ve Modüler Mimari Yapılar

Dağıtık BMS mimarisinde her batarya modülü kendi Hücre İzleme Ünitesi'ni (CMU) barındırmaktadır. CMU'lar merkezi Batarya Kontrol Ünitesi (BCU) ile haberleşmektedir [18]. Bu yapı hata toleransı, ölçeklenebilirlik ve modüler bakım kolaylığı bakımından merkezi mimariye üstünlük sağlamaktadır [4]. Hibrit mimariler ise her iki yaklaşımın avantajlarını birleştirerek sistem verimliliğini artırmakta olup özellikle büyük kapasiteli ESS uygulamaları için tercih edilmektedir [16].

7.4.1.2.3. Kablosuz Mimari Yapılar

Kablosuz BMS (WBMS), kablolama ağırlığını ve montaj maliyetini azaltmak amacıyla Kablosuz Sensör Ağları (WSN) üzerinde çalışmaktadır. Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee ve özel düşük gecikmeli protokoller bu yapılarda kullanılmaktadır. Veri güvenilirliği, gecikme yönetimi ve siber güvenlik, WBMS'nin ticarileşme sürecindeki başlıca araştırma engelleri olarak tanımlanmaktadır [19].

7.4.1.2.4. İkincil Kullanım ve Geri Dönüşüme Uygun Mimari Yapılar

EV bataryaları araç ömrünü tamamladıktan sonra başlangıç kapasitesinin yaklaşık %70–80'ini koruyabilmekte ve sabit enerji depolama uygulamaları için yeniden kullanılabilmektedir [20]. İkinci yaşam uygulama senaryoları yük kaydırma, talep yanıtı, UPS ve şebeke frekans regülasyonunu kapsamaktadır. Geri dönüşüme uygun modüler mimari tasarım, döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde artan akademik ilgi görmektedir [21].

7.4.1.3. Kontrol ve Algoritma Teknolojileri

7.4.1.3.1. SOC/SOH Tahmin Algoritmaları

Şarj durumu (SOC) ve sağlık durumu (SOH) tahmini, BMS araştırmalarının en yoğun incelenen alanlarını oluşturmaktadır. SOC tahmini için üç ana yaklaşım söz konusudur: doğrudan ölçüm (Coulomb sayma, açık devre gerilimi), model tabanlı yöntemler (Kalman filtresi türevleri, gözlemci tabanlı) ve veri odaklı yöntemler. Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Uyarlanabilir EKF, model tabanlı yöntemler içinde en yaygın kullanılanlar arasında yer almaktadır; ancak hesaplama yükü ve batarya modeli parametrelerine duyarlılıkları önemli sınırlılıklar doğurmaktadır [22].

Veri odaklı yaklaşımlar, özellikle LSTM ve CNN-LSTM modelleri, SOC tahmininde %1 MAE ve SOH tahmininde %1–2 RMSE gibi üstün doğruluk düzeyleri sergilemektedir [23] [24]. SOH tahmini üzerine gerçekleştirilen kapsamlı bir sistematik literatür taramasında (534 makale), LSTM ağlarının %22 oranla en yaygın kullanılan derin öğrenme mimarisi olduğu ve makine öğrenimi yöntemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha tutarlı performans sunduğu ortaya konmuştur [25] [26].

7.4.1.3.2. Termal Yönetim Algoritmaları

Termal yönetim algoritmaları, batarya paketini optimum çalışma sıcaklık bandında (15–35°C) tutmak amacıyla soğutma ve ısıtma sistemlerini koordineli biçimde kontrol etmektedir. Model Öngörücü Kontrol (MPC), bulanık mantık ve takviyeli öğrenme tabanlı kontrol stratejileri, termal yük değişkenliğine adaptif yanıt verme kapasiteleri nedeniyle öne çıkan yaklaşımlar arasında yer almaktadır [27].

7.4.1.3.3. Yapay Zekâ Destekli Algoritmalar

Yapay zekâ uygulamaları BMS'de yalnızca SOC/SOH tahmini ile sınırlı kalmamakta olup şarj stratejisi optimizasyonu, arıza tespiti, hücre dengeleme ve kalan kullanım ömrü (RUL) tahmini gibi geniş bir işlev yelpazesine yayılmaktadır [28]. Gömülü sistemlere uyarlanmış hafif yapay zekâ modelleri (TinyML, quantization, pruning), gerçek zamanlı BMS uygulamaları için kritik bir araştırma gündemini oluşturmaktadır [28]. Özellikle kaynak kısıtlı mikrodenetleyici platformlarında çalışabilen modellerin geliştirilmesi, bu alandaki temel araştırma boşluğunu temsil etmektedir [23].

7.4.1.3.4. Siber Güvenlik Algoritmaları

BMS'nin dijital dönüşümü ve şebeke entegrasyonu, yanlış veri enjeksiyonu saldırıları (FDIA), yetkisiz uzaktan erişim ve hizmet dışı bırakma (DoS) saldırıları gibi siber tehditlere açıklığı beraberinde getirmektedir [29]. IEEE 1547.3 (2023) ve NIST Siber Güvenlik Çerçevesi (CSF 2.0) bu alandaki referans standartlar olarak benimsenmektedir. Batarya enerji depolama sistemlerine özgü politika ve standart boşluğu, düzenleyici açıdan kritik bir araştırma alanı olarak saptanmıştır [30].

7.4.1.3.5. Arıza Tespit, Kestirimci Bakım ve Optimizasyon Algoritmaları

Makine öğrenimi tabanlı arıza tespiti, geleneksel eşik değeri yöntemlerine kıyasla daha erken uyarı kapasitesi sunmakta ve sahte alarm oranını düşürmektedir [31]. Prognostik Sağlık Yönetimi (PHM), bataryanın bozunma sürecini bütüncül biçimde izleyerek kestirimci bakım stratejilerinin uygulanmasını mümkün kılmaktadır [32]. Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojisi, gerçek zamanlı BMS optimizasyonu ve arıza öngörüsü için devrim niteliğinde bir araç olarak değerlendirilmekte; bulut tabanlı DT sistemleri SOC ve SOH tahminini eş zamanlı gerçekleştirebilmektedir [33] [34] [35].

7.4.1.4. Uzaktan Erişim ve Kontrol Teknolojileri

Bulut tabanlı BMS platformları, araçtan bağımsız gerçek zamanlı izleme, uzaktan yazılım güncellemesi (OTA) ve çok boyutlu filo yönetimi için altyapı oluşturmaktadır [5]. V2X (Vehicle-to-Everything) iletişim protokolleri ve yazılım tanımlı araç (SDV) mimarisi, gelecekteki uzaktan erişim altyapısını biçimlendiren iki temel teknoloji trendini oluşturmaktadır [14].

7.4.1.5. Soğutma ve Termal Yönetim Teknolojileri

7.4.1.5.1. Yeni Malzeme Teknolojileri

Faz Değiştiren Malzemeler (PCM), latent ısı depolama kapasiteleri sayesinde batarya paketlerindeki sıcaklık dalgalanmalarını pasif olarak sönümleyebilmektedir [36]. Nano-takviyeli PCM'ler (Al_2O_3, grafen, karbon nanotüp katkıları), karbon köpüğü (carbon foam) ve metal köpük matris entegrasyonu gibi yeni nesil malzeme teknolojileri, termal iletkenliği artırarak PCM tabanlı soğutma sistemlerinin etkinliğini iyileştirmektedir [37].

7.4.1.5.2. Aktif ve/veya Pasif Soğutma Teknolojileri

Dört ana Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTMS) türü tanımlanmaktadır: hava soğutmalı, sıvı soğutmalı, PCM tabanlı ve termoelektrik tabanlı sistemler [38]. Hava soğutmalı sistemler kısa mesafeli ve düşük güç yoğunluklu uygulamalara uygunken, sıvı soğutmalı sistemler yüksek termal yüklü uzun mesafeli EV uygulamalarında tercih edilmektedir [39]. PCM tabanlı sistemler ise sabit termal yük gerektiren uygulamalarda üstün performans sunmaktadır [40].

7.4.1.6. Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri

7.4.1.6.1. Hücreden Modüle – Modülden Pakete Tasarım Yaklaşımları

Geleneksel Hücreden Modüle (CTM) mimarisinden Hücreden Pakete (CTP) ve Hücreden Gövdeye (CTB/CTC) mimarilerine geçiş, EV batarya paketi tasarımında yapısal bir dönüşümü temsil etmektedir [39]. CTP mimarisi, ara modülleri devre dışı bırakarak hacimsel enerji yoğunluğunu %15–20 oranında artırabilmektedir. CTB mimarisi ise batarya paketini doğrudan araç şasisi ile bütünleştirerek yapısal sertlik ve ağırlık azaltma konusunda ek avantajlar sunmaktadır [41].

7.4.1.6.2. Hafif, Kompakt Yapısal Entegre Tasarımlar

Yapısal pil entegrasyonu ve topoloji optimizasyonu kombinasyonu, çok işlevli hafif tasarım için yeni bir araştırma paradigmasını temsil etmektedir [42]. Batarya paketinin araç gövdesiyle bütünleşik tasarımı, yapısal tokluğun korunması ile batarya güvenlik marjlarının dengelenmesi açısından çok disiplinli optimizasyon yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır [43].

7.4.1.7. Enerji Yönetim Sistemi Teknolojileri

7.4.1.7.1. Akıllı Şebeke Entegrasyon Teknolojileri

Akıllı şebeke entegrasyonunda batarya EMS'leri; yük kaydırma, frekans regülasyonu, reaktif güç desteği ve yenilenebilir enerji dengeleme hizmetlerini bütünleşik olarak yönetmektedir. Yenilenebilir kaynak ağırlıklı hibrit güç tesisleri (HPP) için geliştirilmiş EMS mimarileri, üretim belirsizliği ve talep değişkenliği koşullarında sistem güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir [44]. IoT tabanlı akıllı ölçüm altyapısı ve gerçek zamanlı veri analitiği, şebeke-batarya entegrasyonunun temel teknik gerekliliklerini oluşturmaktadır [18].

7.4.1.7.2. V2Grid Entegrasyon Teknolojileri

V2G teknolojisi, EV'lerin yük tarafı tüketicisi rolünden çıkıp dağıtık enerji depolama varlıklarına dönüşmesini sağlamaktadır [45]. Çift yönlü şarj sistemleri ISO/IEC 15118 ve IEEE 2030.5 gibi iletişim standartlarıyla uyumlu olup V2G katılım payının %20–30 EV penetrasyonunda tepe talebi %15 oranında azaltabileceği ve yenilenebilir enerji kullanımını %25 artırabileceği öngörülmektedir [46] [47]. Sabit enerji depolama alternatiflerine kıyasla V2G'nin ekonomik rekabetçiliği ise hem avantajlar hem de sınırlamalar açısından aktif tartışma konusu olmaya devam etmektedir [48].

7.4.1.8. Test, Altyapı, Sertifikasyon ve Regülasyonlar

7.4.1.8.1. Test ve Altyapı Teknolojileri

BMS ve batarya sistemi testleri kapsamlı bir protokol yelpazesini içermektedir: döngü ömrü testleri,

kapasitesi ölçümü, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), termal kötüye kullanım (thermal abuse) ve mekanik kötüye kullanım testleri [49]. Donanım-üzerinde-yazılım (HIL – Hardware-in-the-Loop) test ortamları, BMS algoritmalarının gerçek zamanlı doğrulanması için endüstri standardı hale gelmiştir. Dijital ikiz altyapısı, fiziksel prototip öncesinde kapsamlı sanal doğrulama imkânı sunmaktadır [31].

7.4.1.8.2. Sertifikasyon ve Regülasyonlar

Batarya sertifikasyon ekosistemi küresel ölçekte çok sayıda standart ve düzenlemeyi kapsamakta olup başlıca belgeler aşağıda özetlenmektedir [11] [50] [51] [52] [53].

Tablo 36. Başlıca Batarya Standartları/Düzenlemeleri

Standart / Düzenleme	Yayımlayan Kurum	Kapsam
IEC 62133-1/2	IEC	Taşınabilir pil güvenliği
UL1642	UL	Pil güvenliği
IEC 62660-1/2	IEC	EV Li-iyon performans ve güvenlik
IEC 62619	IEC	Sabit ve endüstriyel ESS güvenliği
UN/DOT 38.3	BM/IATA	Lityum pil nakliye testi (zorunlu)
UL 2580	UL	ABD EV batarya paketi güvenliği
ECE R136	BM/UNECE	EV batarya sistem güvenliği (AB/BM)
EU 2023/1542	Avrupa Parlamentosu	AB Batarya Tüzüğü (sürdürülebilirlik)
IEEE 1547.3	IEEE	BESS siber güvenlik yol gösterici

7.4.2. Teknoloji Konuları

Tablo 37. OÇG 2 Yakın Vade Konu Önerileri

#	Konu Sınıfı	Konu Adı
1	Yüksek Güç / Yüksek Enerjili Batarya Teknolojileri	Bu bölüm raporun Hizmete Özel versiyonunda bulunmaktadır.
2	Batarya Mimari Teknolojileri	
3	Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri	
4	Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri	
5	Koruma ve Güvenilirlik Teknolojileri	
6	Koruma ve Güvenilirlik Teknolojileri	
7	Batarya Mimari Teknolojileri	
8	Soğutma ve Termal Yönetim Teknolojileri	
9	Soğutma ve Termal Yönetim Teknolojileri	
10	Modelleme ve Simülasyon Teknolojileri	
11	Modelleme ve Simülasyon Teknolojileri	
12	Akıllı Şebeke Entegrasyon Teknolojileri	
13	Ölçüm ve İzleme Teknolojileri	
14	Akıllı Şebeke Entegrasyon Teknolojileri	
15	SOC/SOH Tahmin Algoritmaları	

Tablo 38. OÇG 2 Uzak Vade Konu Önerileri

#	Konu Sınıfı	Konu Adı
1	Uzay Kalifiye Batarya Teknolojileri	Bu bölüm raporun Hizmete Özel versiyonunda bulunmaktadır.
2	Yaşam Döngüsü İzleme Teknolojileri	
3	SOC/SOH Tahmin Algoritmaları	
4	Batarya Mimari Teknolojileri	
5	Modelleme ve Simülasyon Teknolojileri	
6	Batarya Mimari Teknolojileri	
7	Test Teknolojileri	
8	SOC/SOH Tahmin Algoritmaları	

7.4.3. Değerlendirmeler

Belirlenen teknoloji konuları öncelik sırasına göre değerlendirildiğinde, yakın vadede listenin üst sıralarında yer alan başlıkların önemli bir bölümünün görev gereksinimleri ve sistem güvenliğiyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Denizaltılar, insansız hava araçları ve dron sistemlerine yönelik batarya modül/paket teknolojileri ile yüksek güç ve düşük ağırlık gereksinimlerine odaklanan mimari çözümler, savunma ve havacılık uygulamalarında operasyonel performans açısından önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Bu uygulamalarda enerji yoğunluğu, ağırlık, güvenilirlik ve güvenlik parametrelerinin birlikte ele alınması gerektiğinden, hücreden pakete veya hücreden şaseye entegrasyon gibi yeni nesil yapısal yaklaşımlar ile termal kaçak riskini azaltmaya yönelik elektromekanik güvenlik teknolojileri öncelikli gelişim alanları arasında değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, acil müdahale teknolojileri sistem güvenliğini destekleyen tamamlayıcı bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Hibrit batarya teknolojileri ile aktif ve pasif termal yönetim çözümleri ise sistem performansının iyileştirilmesine ve kullanım ömrünün desteklenmesine katkı sağlayabilecek teknolojiler arasında değerlendirilmektedir. Bu teknolojiler, farklı görev profillerine sahip platformlarda esneklik sağlayarak batarya sistemlerinin farklı çalışma koşullarına uyarlanmasına katkıda bulunmaktadır. Batarya modelleme, simülasyon ve derin öğrenme tabanlı dinamik modelleme yaklaşımları, tasarım ve doğrulama süreçlerinin geliştirilmesine ve ürün geliştirme döngülerinin daha etkin yürütülmesine katkı sağlayabilmektedir. Daha doğru tahmin ve optimizasyon imkânları sunan bu yaklaşımlar, dijital ikiz teknolojileriyle birlikte değerlendirildiğinde sistem geliştirme ve performans optimizasyonu açısından yüksek katma değer potansiyeli taşımaktadır. Listenin devamında yer alan akıllı şebeke uyumlu enerji depolama sistemleri, V2G entegrasyonu, batarya paket izleme ve yapay zekâ tabanlı gömülü algoritmalar gibi teknolojiler, batarya sistemlerinin enerji yönetimi, izleme, kestirimci bakım ve optimizasyon kabiliyetlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Siber güvenlik uyumlu V2G çözümleri de bağlantılı enerji sistemlerinin güvenli ve kontrollü biçimde işletilmesi açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Daha uzun vadede değerlendirilen batarya pasaportu teknolojileri, kablosuz BMS, değiştirilebilir gerilim mimarileri, test altyapıları ve hata tahmin algoritmaları ise ağırlıklı olarak regülasyon uyumu, sistem doğrulama, izlenebilirlik ve ileri seviye izleme ihtiyaçlarına yönelik tamamlayıcı teknolojiler niteliğindedir. Bu alanlar, doğrudan performans artışından ziyade batarya sistemlerinin güvenilirliğinin, izlenebilirliğinin ve standardizasyonunun geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Uzay uygulamalarına yönelik batarya ve hücre teknolojileri ise yüksek güvenilirlik gereksinimleri nedeniyle önem taşımakla birlikte, uygulama alanının daha sınırlı olması nedeniyle daha niş bir yatırım ve Ar-Ge alanı olarak değerlendirilmektedir. Batarya teknolojilerinde rekabet avantajı elde etmek için yalnızca hücre seviyesinde değil, sistem, yazılım ve entegrasyon katmanlarının birlikte geliştirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda hücre kimyası yanında; batarya yönetim sistemleri (BMS), izleme ve kontrol algoritmaları, termal yönetim çözümleri, uygun yerleşim ve paketleme çözümleri ile birlikte bütünleşik sistem mimarisinin; sistem seviyesi nihai güvenlik ve performans gereksinimlerinin sağlanabilmesinde belirleyici rol oynayacağı değerlendirilmektedir

7.4.4. GZFT Analizi

Bu bölümde; Türkiye'nin batarya ekosistemindeki mevcut kabiliyetleri, teknolojik olgunluk seviyesi ve küresel pazardaki konumu BMS, Kontrol Teknolojileri, Paketleme ve Entegrasyon olmak üzere birbirini besleyen üç temel stratejik başlıkta GZFT (SWOT) metodolojisiyle masaya yatırılmış, analiz tabloları sırasıyla Tablo 39, Tablo 40 ve Tablo 41'de paylaşılmıştır.

Tablo 39. Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) için GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Gerçek zamanlı izleme yeteneği
Derin öğrenme tabanlı SOC tahmin yöntemleri
Yüksek doğruluk ve genelleme kabiliyeti
Ağ sıkıştırma, ağırlık budama ve optimizasyon ile gömülü sistem uyumluluğu
Geliştirilen yöntemlerin gerçek zamanlı testlerle doğrulanması
Gömülü sistemler ve IoT tecrübesi
Gelişmiş iletişim protokolleri (WiFi, CAN, RS485 vb.)
Gömülü web sunucu üzerinden izleme ve yönetme
Yazılım–donanım bütünlüğünü sağlayan mühendislik yaklaşımı
Yapay zekâ tabanlı batarya yönetimi konusunda artan bilgi birikimi
Kendi tasarımımız olan özgün donanım ve gömülü yazılım altyapısına sahip olmamız
Savunma uygulamalarına yönelik rugged (dayanıklı) BMS tasarım kabiliyeti
Düşük enerji tüketimi
Genç ve dinamik mühendislik yeteneği
Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanında batarya yönetim sistemleri konusundaki akademik uzmanlık
Laboratuvar altyapısının algoritma geliştirme/test için uygun olması
Disiplinlerarası yapay zekâ + enerji teknolojileri entegrasyonu
ZAYIF YÖNLER
Teknik ve Algoritmik Sınırlamalar
Karmaşıklık (donanım–yazılım bütünleşik yapının gelişmiş uzmanlık gerektirmesi)
Doğruluk (Accuracy) problemleri (özellikle SoC/SoH tahmini için)
Düşük kapasiteli işlemcilerde derin öğrenme modellerinin gerçek zamanlı çalıştırılmasının zorluğu
Model sıkıştırma ve optimizasyon süreçlerinin karmaşık ve zaman alıcı olması
Veri toplama, etiketleme ve eğitim süreçlerinin yüksek maliyet gerektirmesi
Gömülü sistemlerde bellek ve enerji sınırlamalarının algoritma performansını kısıtlaması
Yanlış SoH / SoC tahminleri riskinin tamamen ortadan kaldırılamaması
Test–Doğrulama–Standardizasyon Eksiklikleri
Endüstriyel ve saha test ortamı kısıtları
Uzun süreli saha testleri için dış destek gerekliliği
Uluslararası BMS standartlarına uyum için sertifikasyon altyapısının eksikliği
Fonksiyonel güvenlik eksikliği (ISO 26262, IEC 61508)
Kaynak ve Ekosistem Kısıtları
Uzman BMS tasarım personeli sayısının artan talebi karşılamada yetersiz kalması
Nitelikli iş gücü eksikliği ve tecrübeli çalışanların yurtdışına göç etmesi
Ulusal pazar hacminin sınırlı olması nedeniyle yüksek riskli Ar-Ge yatırımlarının ertelenmesi
Finansman & yatırım yetersizliği

FIRSATLAR
Türkiye'de hızla gelişen elektrikli araç ve enerji depolama pazarına yönelik artan talep
Türkiye ve dünyada düşük maliyetli, verimli gömülü BMS çözümlerine yönelik talebin hızla büyümesi
Elektrikli araç pazarının büyümesi ile BMS çözümlerine yönelik küresel ihtiyaç artışı
Şebeke ölçekli enerji depolama sistemlerinde BMS teknolojilerinin kritik önem kazanması
Çift kullanım (dual-use) potansiyeli (sivil + askeri BMS sistemleri)
EU batarya regülasyon baskılarının artmasıyla yerli BMS çözümlerine olan talebin yükselmesi
Güvenlik odaklı yeni regülasyonlar sayesinde gelişmiş BMS sistemlerinin zorunlu hale gelmesi
Lityum bataryalarının güvenli çalışması için donanım ve yazılım tabanlı BMS çözümlerinin ulusal ve yakın coğrafyada kritik öncelik haline gelmesi
Yeni nesil BMS kontrol algoritmaları ve AI-BMS konseptlerinin ticarileşme potansiyeli
Yapay zekâ tabanlı SOC, SOH ve SOP tahmin yöntemlerinin EV ve ESS sistemlerinde hızla yaygınlaşması
Model sıkıştırma ve optimizasyon yöntemleri ile patentlenebilir çözümler geliştirme imkânı
Uluslararası çağrılarda (Horizon Europe, CETP, EUREKA) AI-BMS çözümlerine özel destek mekanizmaları
Derin öğrenme tabanlı BMS algoritmalarının düşük kapasiteli gömülü sistemlere uygulanabilir hale gelmesi
Üniversite–sanayi iş birlikleri ile Ar-Ge kapasitesini artırma fırsatı
Uluslararası iş birlikleri ve ihracat potansiyelinin yüksek olması
TEHDİTLER
Yurt dışı pazarda artan rekabet ve düşük maliyetli yabancı BMS ürünlerinin pazar baskısı
Son teknoloji elektronik komponentlere ve hücrelere erişimde yaşanabilecek kısıtlamalar
Kritik hammaddelerde (lityum, kobalt, nikel) fiyat dalgalanmaları ve tedarik kırılganlığı
Model ve Algoritma Güvenilirliği Riskleri
Yanlış SOC/ SOH tahminleri sebebiyle güvenlik ve performans riskleri
Düşük kapasiteli işlemcilerde derin öğrenme modellerinin stabil çalışmaması
Uluslararası düzeyde gelişmiş SOC algoritmaları ile rekabet zorluğu
Farklı sürüş döngüleri ve batarya tiplerinde tahmin doğruluğu değişkenliği
Veri gizliliği, veri bütünlüğü ve uzaktan erişim tehditleri
Yetersiz güvenlik önlemleri nedeniyle BMS cihazlarında dış müdahale riskleri
Hızla değişen global batarya güvenlik ve yazılım standartlarına uyum zorluğu

Tablo 40. Kontrol Teknolojileri için GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Gelişmiş kontrol algoritmaları
Uyarlanabilirlik (adaptive control konseptlerine uygun geliştirme kabiliyeti)
Yapay zekâ ve model tabanlı kontrolün entegrasyonu
Termal yönetimde kontrol algoritmaları
Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri için kontrol stratejileri
Düşük enerji tüketimine yönelik optimizasyon
Yerli güç elektroniği yetkinliği (kontrol ile güçlü entegrasyon)
Yüksek doğruluklu veri işleme ve durum izleme altyapısı
Geliştirilen kontrol yöntemlerinin gerçek zamanlı koşullarda test edilmesi
Kontrol ve sensör füzyonu alanında bilgi birikimi
Komponent üreticilerinden doğrudan teknik destek ve bilgi akışı
Üniversite altyapısıyla algoritma geliştirme, veri toplama ve validasyon imkânı
ZAYIF YÖNLER
Kontrol sistemlerinde yüksek doğruluk için gereken detaylı veri setlerine sınırlı erişim
Termal yönetim kontrol algoritmalarının gelişmiş versiyonlarının henüz tam oturmamış olması
Kontrol algoritmalarının değişen pil kimyalarına adaptasyon sürecinin uzun olması
Test, Karakterizasyon ve Doğrulama Eksiklikleri
Kapsamlı kontrol testi yapabilecek tam ölçekli endüstriyel test altyapısının yetersizliği
Uzun süreli karakterizasyon süreçlerinin dış laboratuvarlara bağımlı olması
Uluslararası kontrol standartlarına (özellikle güvenlik & hata yönetimi) uyum eksiklikleri
Düşük kapasiteli işlemcilerde gelişmiş kontrol algoritmalarının performans düşüşü
Kontrol yazılımlarının gömülü sistemlerde bellek/enerji sınırlamalarına takılması
Veri toplama donanımlarının maliyetli olması
Gelişmiş kontrol sistemleri tecrübesine sahip uzman mühendis sayısının yetersizliği
Ar-Ge projelerinde bütçe ve donanım kısıtları nedeniyle gerekli test araçlarının temininde güçlük
FIRSATLAR
Yeni nesil kontrol teknolojilerinin enerji depolama, EV ve savunma sektörlerinde hızla önem kazanması
Pasif termal yönetim ve gelişmiş kontrol algoritmaları ile sistem verimliliğini artırma imkânı
Yapay zekâ entegrasyonu ile optimizasyon odaklı kontrol stratejilerinin ticarileşmesi
Gelişen regülasyonlarla güvenlik odaklı kontrol mekanizmalarının zorunlu hale gelmesi
Otonom ve insansız sistemlerde kontrol teknolojilerine olan talebin artması
Savunma ve Çift Kullanım Potansiyeli
Savunma sanayi ihtiyaçlarının artması (zorlu ortamlar için güvenilir kontrol teknolojileri)
Sahada artan ve çeşitlenen enerji ihtiyaçlarının yeni kontrol çözümlerine kapı açması
Dual-use / çift yönlü kullanım fırsatları (askeri ve sivil sistemlerde aynı platform)
Üniversite–sanayi projeleri kapsamında kontrol algoritmalarının hızlı prototiplenmesi
EU projelerinde (Horizon, EUREKA, CETP) kontrol teknolojileri için geniş fon fırsatları
İnovasyona açık pazar yapısı sayesinde rekabet avantajı

TEHDİTLER
Teknolojinin çok hızlı gelişmesi nedeniyle geliştirilen kontrol algoritmalarının kısa sürede güncelliğini yitirmesi
Uyarlanabilir kontrol sistemlerinin karmaşıklığı nedeniyle uygulama zorlukları
Pasif/aktif termal kontrol algoritmalarının yeni kimyalar için sürekli güncellenme gerekliliği
AI tabanlı kontrol algoritmalarında veri kalitesine bağımlılık
Farklı operasyonel senaryolarda kontrol modellerinin stabil çalışmama riski
Standardizasyon eksikliği nedeniyle kontrol performansında tutarsızlık
Kontrol kartlarının IoT yapısına geçmesiyle artan siber saldırı alanı
Uzak erişim noktalarında yetkisiz kullanım riski

Tablo 41. Paketleme ve Entegrasyon Teknolojileri için GZFT Analizi

GÜÇLÜ YÖNLER
Yetkin paketleme ve tasarım ekibine sahip olunması
Prototipleme, kalifikasyon ve seri üretim yeteneği
Sahada aktif kullanılan çok sayıda ürün tecrübesi
Uçtan uca sistem çözümü sunabilme (donanım + yazılım + entegrasyon)
Modülerlik
Yerli güç elektroniği, BMS ve paketleme bileşenlerinin birlikte tasarlanabilmesi
Sanayi potansiyeli ve coğrafi konum avantajları
Savunma sanayindeki özel gereksinimlere uygun mekanik ve elektriksel entegrasyon yeteneği
Hücrelerin aşırı sıcaklıktan korunmasını sağlayan etkili termal yönetim
Hücre ömrünü uzatarak batarya değişim maliyetlerini azaltma
Termal kaçak riskini azaltma
Soğuk ve sıcak bölgelerde uygulama avantajı
Hızlı şarj/deşarj koşullarına uygun paketleme ve güvenlik altyapısı
Düşük hacimde yüksek enerji depolama kapasitesini sağlayan yenilikçi tasarımlar
Anot malzemeleri üzerine doktora tezi ve patent tecrübesi
Polimer kompozitler ve termoplastik işleme konusunda uzmanlık
Çift vidalı ekstrüder, polimer film üretimi ve kompozit işleme gibi endüstriyel ölçekli altyapı
Sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm odaklı malzeme yaklaşımları
Yeni malzeme teknolojileri ile doğal kaynak kullanımını üçte bire kadar azaltma potansiyeli
ZAYIF YÖNLER
Hücre üretimi ve entegrasyon için tam ölçekli tesis altyapısının olmaması
Katot malzemeleri tarafında çalışmaların henüz başlangıç seviyesinde olması
Mevcut batarya paketlerine yeni donanım katmanlarının uygulanmasında entegrasyon zorlukları
Test ve karakterizasyon altyapısının geliştirilmesinin gerekmesi
Standardizasyon ve Sertifikasyon Eksiklikleri
Uluslararası sertifikasyon gerekliliklerine hazırlanmış kapsamlı bir altyapının henüz oluşmamış olması
Güvenlik, termal kaçak ve mekanik dayanıklılık testlerinde eksikler

Regülasyon ve standartlara tam uyum sağlayacak dokümantasyon sistematiğinin zayıf olması
Batarya teknolojilerinde uluslararası ölçekte marka bilinirliğinin sınırlı olması
Sivil pazara göre küçük ölçekli üretim
Uzun vadeli stratejik ortaklık ve yatırımcı eksikliği
Tedarik Zinciri ve Parça Erişimi Sorunları
Kritik bileşenlerde (sensör, soğutma modülleri, şarj kontrol devreleri, AI-donanımlar) güvenilir tedarik bulmanın zorluğu
Tedarik zincirinin dışa bağımlı olması
Teknoloji transferi engelleri
Gelişmiş paketleme/entegrasyon donanımlarının maliyetli olması
Termal yönetim çözümlerinin karmaşık ve maliyet artırıcı olması
Entegrasyon süreçlerinin uzun ve emek yoğun olması
FIRSATLAR
Yeni batarya teknolojilerinin (yüksek enerji yoğunluklu kimyalar, hibrit çözümler) yaygınlaşması
Elektrikli araç ve enerji depolama sektöründe gelişmiş paketleme çözümlerine artan talep
Geniş global pazar büyüklüğü (EV, ESS, UAV, savunma)
İhracata açıklık ve uluslararası iş birliği potansiyeli
Yenilikçi ve sürdürülebilir paketleme malzemelerinde (geri dönüştürülebilir polimerler) öncü olma fırsatı
Pasif/aktif termal yönetim ile verimliliği artırma imkânı
Yeni kimyalar için yüksek güvenlikli entegrasyon çözümleri geliştirme fırsatı
Politika ve Regülasyon Kaynaklı Fırsatlar
Yerelleştirme ve dışa bağımlılığı azaltma politikaları sayesinde devlet teşvikleri
Ulusal Stratejik Öncelikler kapsamında batarya paketleme projelerinin desteklenmesi
EU regülasyonlarının yerli üreticilere sağladığı avantajlar (coğrafi yakınlık + hızlı teknik destek)
Savunma sistemlerinde çeşitlenen enerji ihtiyaçlarına yönelik kompakt ve güvenilir paketleme çözümleri
Zorlu çevre koşullarına uygun rugged paketler geliştirme fırsatı
İnsansız/otonom sistemlerde hızlı entegrasyon ihtiyaçlarının artması
TEHDİTLER
Yerli üreticilerin standartlaşmış ve sertifikalı paket çözümleri geliştirme deneyiminin yeni oluşması
Küresel pazardaki “yerleşik” üreticilerle rekabet zorluğu
Kritik hammaddelerin maliyet ve tedarik sürelerindeki belirsizlik
Yeni nesil hücrelere erişimde dışa bağımlılık
Modül ve paket verilerine erişimde teknoloji transferi engelleri
Güvenlik ve sertifikasyon standartlarına tam uyum sağlama zorluğu (UL, IEC, UN38.3)
Değişen EU regülasyonlarının entegrasyon tasarımlarını sürekli revize etmeye zorlaması
Yeni kimyalara hızlı uyum sağlayamama
Hızla gelişen batarya sistemlerine entegrasyon süreçlerinin karmaşıklaşması
Termal kaçak senaryolarına karşı güvenlik tasarımında artan gereklilikler
Yanlış bilgi ve uyumsuz özelliklerle piyasaya sürülen düşük kaliteli ürünlerin pazar algısını bozması
Uygun olmayan donanımın entegrasyon projelerinde kullanılması nedeniyle güvenlik ve kalite algısının zayıflaması

8. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Batarya Teknolojileri OTAĞ kapsamında yürütülen çalışmalar, Türkiye'nin savunma sanayii ve enerji depolama vizyonu açısından önemli bir aşamayı temsil etmektedir. "Ortak Akıl" metodolojisiyle gerçekleştirilen faaliyetler sonucunda ülkemizin mevcut teknik yetkinlikleri, gelişim ihtiyaçları, küresel tedarik zincirindeki kırılganlıklar ve stratejik öncelikler bütüncül biçimde değerlendirilmiştir. OÇG-1 ve OÇG-2 kapsamında elde edilen bulgular, batarya teknolojilerinin yalnızca bir enerji depolama çözümü olmadığını; ulusal güvenlik, teknolojik bağımsızlık ve rekabet gücü bakımından kritik bir alan hâline geldiğini ortaya koymuştur.

OTAĞ sürecinde gerçekleştirilen GZFT analizleri ve önceliklendirme çalışmaları, Türkiye'nin mevcut yetkinlikleri ile hedeflenen teknolojik seviye arasındaki boşlukların belirlenmesine ve bu boşlukların giderilmesine yönelik somut bir yol haritasının oluşturulmasına katkı sağlamıştır. AHP, DEMATEL ve TOPSIS yöntemlerinden oluşan hibrit karar modeli ise uzman değerlendirmelerinin analitik ve tutarlı bir yapı içinde ele alınmasına imkân vermiştir.

Küresel eğilimler, batarya teknolojilerinde hızlı ve çok boyutlu bir dönüşüm yaşandığına işaret etmektedir. Batarya teknolojilerine yönelik patent faaliyetleri 2023 itibarıyla tüm enerji patentlerinin yaklaşık %40'ını oluştururken, bu patentlerin %90'ının başta lityum-iyon olmak üzere batarya teknolojilerine odaklandığı görülmektedir. Çin, Japonya ve Güney Kore patent faaliyetlerinde öne çıkan ülkeler arasında yer alırken, 2023 sonrasında akademik yayın hacminde de belirgin bir artış gözlenmektedir. Teknolojik gelişmeler, tek bir baskın hücre kimyasına yönelmekten ziyade uygulama gereksinimlerine göre farklılaşan NMC, LFP, sodyum-iyon ve katı hâl gibi kimyaların birlikte geliştiği bir yapıya işaret etmektedir. LFP bataryalar; maliyet, güvenlik ve çevrim ömrü açısından sunduğu özellikler nedeniyle enerji depolama ve elektrikli araç uygulamalarındaki kullanım alanını korurken, sodyum-iyon bataryalar lityum kullanımını azaltma potansiyeli taşıyan alternatif bir teknoloji olarak laboratuvar çalışmalarından saha uygulamalarına doğru ilerlemektedir. Katı hâl bataryaların ise üretim ve ölçekleme süreçlerindeki gelişmelere bağlı olarak 2030'ların başından itibaren daha geniş bir pazar kullanımına ulaşabileceği öngörülmektedir. Silikon katkılı NMC kimyasına sahip hücreler, yüksek enerji yoğunluğu potansiyelleri nedeniyle özellikle ağırlığın önemli bir tasarım parametresi olduğu VTOL gibi uygulamalarda değerlendirilmektedir. Tabless hücre tasarımları ise hücre içi elektriksel direncin azaltılması ve ısıl performansın iyileştirilmesi yoluyla yüksek güç gerektiren uygulamalara yönelik avantajlar sunabilmektedir. Savunma sanayii uygulamalarında ise yüksek güç yoğunluğu, uzun süreli depolama ve güvenilirlik gereksinimleri doğrultusunda gümüş-çinko ve ısıl pil gibi birincil rezerv batarya teknolojileri belirli uygulamalardaki önemini sürdürmektedir. Bunun yanı sıra, yapay zekâ destekli BMS algoritmaları, bulut tabanlı batarya izleme sistemleri ve Hücreden Pakete (CTP), Hücreden Şaseye (CTC) gibi kompakt ve yapısal entegrasyona dayalı mimariler, batarya sistemlerinin izleme, yönetim, güvenlik ve paketleme verimliliğinin geliştirilmesine yönelik yükselen teknoloji eğilimleri arasında değerlendirilmektedir.

OÇG-1 kapsamında gerçekleştirilen teknik değerlendirmeler sonucunda; LFP, NMC ve sodyum-iyon katot kimyaları, silisyum-grafit ve sert karbon anotlar, seramik kaplı separatörler ile sıvı elektrolitlerden katı hâl sistemlerine uzanan teknoloji seçenekleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Üretim teknolojilerinde Kuru Elektrot Kaplama, Hücreden Pakete (CTP) ve Dijital İkiz uygulamaları verimlilik potansiyelleriyle öne çıkmıştır. Geri dönüşüm süreçlerinde pirometalurjik yöntemlerin lityum ve grafit kaybına yol açması nedeniyle hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm yöntemlerinin önceliklendirilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Kuru elektrot ve yapısal batarya gibi ileri imalat teknolojilerine yatırım yapılması, maliyet ve performans açısından küresel rekabet gücü kazanılması için gerekli alanlar arasında değerlendirilmiştir.

OÇG-2 çalışmaları sonucunda BMS fonksiyonlarının temel ölçüm ve izlemenin ötesine geçerek aktif hücre dengeleme, termal yönetim, durum kestirimi ve sistem güvenliğini kapsayan bütünleşik bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Geleneksel model tabanlı yöntemlerin yanında gibi derin öğrenme algoritmalarının kullanımının yaygınlaştığı; kablolu sistemlerden Kablosuz BMS (WBMS) ve bulut tabanlı izleme mimarilerine geçişin ise kablolama karmaşıklığını azaltırken yeni siber güvenlik gereksinimleri oluşturduğu belirlenmiştir. Paketleme ve entegrasyon tarafında Hücreden Pakete (CTP) ve Hücreden Gövdeye (CTB/CTC) yaklaşımları; sistem düzeyinde ise V2G entegrasyonu, dijital ikiz uygulamaları ve siber güvenlik protokolleri kritik gelişim başlıkları olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular, küresel rekabetin yalnızca hücre kimyasında değil; yazılım, paketleme, elektronik ve termal tasarım, sistem emniyeti, siber güvenlik ve platforma özgü yapısal entegrasyon alanlarında da yoğunlaştığını göstermektedir.

9. SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI TEKNOLOJİ KAZANIM ÇALIŞMALARI

Başkanlığımızın 2024 – 2028 Stratejik Planı kapsamında Ar-Ge ve Teknoloji alanında geleceğe yön verecek teknoloji ve yetenekleri milli imkanlarla geliştirmek amacıyla, günümüz ve geleceğin teknolojilerine yönelik kapsayıcı ve istikrarlı gelişimin sürdürülmesi ve çığır açan teknoloji alanlarında yetenek kazanımının sağlanması hedeflenmektedir.

Savunma sanayii alanında dışa bağımlılığı asgari seviyeye indirmek, ana sistemlerin ve tüm kritik alt sistemlerin yerlileştirilmesi ile mümkündür. Bunun yanı sıra, teknolojiyi takip eden değil teknolojide öncü olan bir ülke olmak için, ileri teknolojiye yatırım yapmak büyük önem arz etmektedir.

Bu doğrultuda, Başkanlığımız tarafından günümüzdeki teknolojik gelişimin hızıyla 3-5 yıl olarak tanımlanabilecek yakın vadeden ötesini ve o yılların harekât ortamlarını tasvir etmek ve bu ortamlarda etkin olacak konseptler ile onların gerçekleştirilmesini sağlayacak teknolojileri belirlemek amacı ile Geleceğin Harekât Ortamını Şekillendirecek Teknolojiler (GHOST) etkinliği gerçekleştirilmektedir.

GHOST kapsamında geleceğe etki potansiyeli yüksek olarak belirlenen teknolojiler Savunma Sanayii Başkanlığı Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından düzenlenmekte olan Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ) çalışmaları kapsamında ele alınmaktadır. Her yıl belirlenen teknoloji alanlarında; üniversiteler, araştırma kuruluşları, ihtiyaç makamları, sanayi ve KOBİ'lerden ilgili temsilcilerin katılımıyla OTAĞ faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. OTAĞ faaliyetlerine ilişkin bilgilere, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Portali'nden (https://arge.ssb.gov.tr/) ulaşılabilmektedir.

OTAĞ faaliyetleri ile ele alınan teknolojiler bütüncül bir yaklaşımla, ekosistemde yer alan tüm paydaşların katkıları ile, belirlenen ve önceliklendirilen konu önerileri doğrultusunda Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları oluşturulmaktadır.

Ar-Ge Paneli'ne sunulacak konuların belirlenmesinde, Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları öncelikli girdidir.

Gereksinimleri net olarak belirlenmemiş ya da belirlenemeyen konular, Savunma Sanayii Ar-Ge Geniş Alan (SAGA) Çağrısı olarak, diğer durumlarda, Ar-Ge Projesi Önerisi olarak ArGe Paneli'ne sunulur. Ar-Ge Paneli Kararları alındıktan sonra SSB projelendirme faaliyetleri gerçekleştirilir.

Başkanlığımız tarafından sektörel yetkinlik ve kapasitelerin değişik aşamalarda, farklı kategorilerde ve süreklilik içinde değerlendirilmesi ve puanlandırılması amacıyla Endüstriyel Yetkinlik Değerlendirme ve Destekleme Programı (EYDEP) yürütülmektedir. EYDEP ile savunma sanayiinde faaliyet gösteren firmaların, sektörde nitelikli tedarikçi olabilmelerini teminen durum analizleri yapılmakta ve gelişme planlarının oluşturulması amaçlanmaktadır. EYDEP'e başvurular "https://yeten.ssb.gov.tr/eydepinfo" internet adresinden yapılabilmektedir. Ayrıca, Savunma Sanayii Yetenek Envanteri (YETEN) kapsamında birçok kamu kurum ve kuruluşu ile entegrasyon sağlanarak mevcut veri tabanlarından bilgi transferi sağlanmaktadır. Bu kapsamda, savunma sanayii alanında faaliyet gösteren firmaların ürünlerinin, üretim ve test altyapılarının, finans ve insan kaynağı bilgilerinin YETEN'e kayıt etmesi gerekmektedir. Böylece TSK'nın ihtiyaç duyacağı her türlü harp sanayii ürününün ve hizmetlerinin milli sanayiinin kaynak ve imkânları ile azami ölçüde yurt içinden karşılanması için mevcut sanayiinin kapasitesi ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmakta, açık teknoloji alanları belirlenmekte, sanayii içinden yapay zekâ teknolojisi ile potansiyel firma önermesi yapılabilmekte ve teknoloji transferi ile yurt içinde imal edilebilecek olan ürünler ile bu ürünleri üretebilecek potansiyel firmalar belirlenebilmektedir. YETEN ile ilgili detaylı bilgi "https://yeten.ssb.gov.tr/" adresinde yer almaktadır.

10. KAYNAKÇA

YÖNTEM VE OÇG-1 KAYNAKÇA

[1] F. E. Gabus, «World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL,» Battelle Geneva Research Center, pp. 4-12, 1972.

[2] T. L. Saaty, «The analytic hierarchy process,» New York, McGraw-Hill, 1980.

[3] Hwang, C. L., & Yoon, K, «Multiple attribute decision making: Methods and applications Springer-Verlag,,» New York, 1981.

[4] IEA, «The State of Energy Innovation 2026,» Paris, 2026.

[5] 2026. [Çevrimiçi]. Available: https://informedclearly.com/en/geopolitics/54247/iea-energy-security-innovation-2026.

[6] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/news/energy-innovation-enters-security-focused-phase-as-batteries-dominate-patent-landscape.

[7] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/news/energy-innovation-enters-security-focused-phase-as-batteries-dominate-patent-landscape.

[8] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/the-state-of-energy-innovation-2026/executive-summary.

[9] [Çevrimiçi]. Available: https://en.highstar.com/blog/next-generation-batteries-2026-beyond.

[10] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon ve O. Tomomewo, «Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies,» Future Batteries, cilt 4, p. 100007, 2024.

[11] [Çevrimiçi]. Available: https://www.evlithium.com/lifepo4-battery-news/2026-battery-technology-trends-lfp-solid-state-sod.html.

[12] [Çevrimiçi]. Available: https://cnevpost.com/2025/11/12/catl-mass-production-5th-gen-lfp-batteries/.

[13] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/commentaries/sodium-ion-battery-momentum-grows-but-challenges-remain.

[14] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/electric- vehicle-batteries.

[15] [Çevrimiçi]. Available: https://www.batterytechonline.com/battery-manufacturing/honda-launches-demonstration-line-for-all-solid-state-batteries.

[16] [Çevrimiçi]. Available: https://www.batterytechonline.com/automotive-mobility/sk-on-accelerates-solid-state-ev-battery-timeline-targets-2029-commercialization.

[17] [Çevrimiçi]. Available: https://global.toyota/en/newsroom/corporate/39865919.html.

[18] M. Rahman, U. Nisar, A. Abouimrane, I. Belharouak ve R. Amin, «Valuation of Anode Materials for High-Performance Lithium Batteries: From Graphite to Lithium Metal and Beyond,» Electrochemical Energy Reviews cilt 8, 2025.

[19] Z. W. Y. Zhang, Z. Mo, X. Lei, X. Xie, X. Xue, H. Qin ve H. Jiang, «Research progress of silicon-based anode materials for lithium-ion batteries,,» RSC Adv. , cilt 15, p. 10731–10753, 2025.

[20] IEA, «Global EV Outlook 2026,» Paris, 2026.

[21] Y. Dou, S. Zhou, J. Dawkins, K. Zaghib, K. Amine, G. Xu ve S. Deng, «Manganese-Based Spinel Cathodes: A Promising Frontier for Solid-State Lithium-Ion Batteries,» Advanced Materials, cilt 38, 2026.

[22] Y. Li, Y. Yan, K. Shen, M. He, Y. Li, H. Song, C. Zheng, W. Shi, F. Ye, K. Ozoemena, M. Safari ve Q. Pang, «High Energy Density Solid-State Lithium–Sulfur Batteries: Challenges and Advances in Cathode Materials,» ACS Nano, cilt 19, p. 34469–34491, 2025.

[23] C. Wang, Y. Wu, S. Wang, E. van der Heide ve X. Zhuang, «Interface issues between cathode and electrolyte in sulfide-based all-solid-state lithium batteries and improvement strategies of interface performance through cathode modification,» Mater. Res. Bull., cilt 181 , p. 113078, 2025.

[24] [Çevrimiçi]. Available: https://apricum-group.com/navigating-the-future-of-battery-tech-lithium-sulfur-batteries/.

[25] D. Smith ve J. Gucinski, «Synthetic silver oxide and mercury-free zinc electrodes for silver–zinc reserve batteries,» J. Power Sources, cilt 80, p. 66–71, 1999.

[26] V. Devasenapathy, G. Pathanjali ve N. Srinivasan, «Laser technique in diaphragm cum rupture disc for defence oriented silver oxide zinc reserve batteries,» Materials and Manufacturing Processes , cilt 34, p. 447–454, 2019.

[27] Kirby W. Beard, Linden's Handbook of Batteries, 5th ed., 2019.

[28] [Çevrimiçi]. Available: https://www.eaglepicher.com/markets/defense/missiles-and-munitions/.

[29] A. Karpinski, S. Russell, J. Serenyi ve J. Murphy, «Silver based batteries for high power applications,» J. Power Sources, cilt 91, p. 77–82., 2000.

[30] [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_Shark_torpedo.

[31] [Çevrimiçi]. Available: https://www.naval-technology.com/projects/f21-heavyweight-torpedo/.

[32] [Çevrimiçi]. Available: https://www.navalnews.com/naval-news/2020/02/naval-group-delivered-the-first-batches-of-f21-heavyweight-torpedoes/.

[33] E. Dow, «The development of aluminum aqueous batteries for torpedo propulsion: prototype development of a replenishment electrolyte management system for activation and control of a pile configured battery cartridge,» Proceedings of 11th Annual Battery Conference on Applications and Advances, IEEE, p. 61–66.

[34] [Çevrimiçi]. Available: https://www.osti.gov/biblio/382661.

[35] [Çevrimiçi]. Available: https://idrw.org/advanced-aluminum-silver-oxide-battery-technology-to-power-indias-next-generation-torpedoes/.

[36] [Çevrimiçi]. Available: https://www.sharescart.com/article/equity-research-hbl-power-systems-ltd.

[37] [Çevrimiçi]. Available: https://hbl.in/reports/investor-presentation.pdf.

[38] [Çevrimiçi]. Available: https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_14635.

[39] [Çevrimiçi]. Available: https://www.hsfkramer.com/insights/2025-10/china-export-controls-lithium-batteries-and-artificial-graphite-anode-materials.

[40] [Çevrimiçi]. Available: https://www.mayerbrown.com/en/insights/publications/2025/10/prc-announces-new-export-controls-on-rare-earth-and-battery-materials-and-technology.

[41] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025.

[42] K. Severson, P. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang, Z. Yang, M. Chen, M. Aykol, P. Herring, D. Fraggedakis, M. Bazant, S. Harris, W. Chueh ve R. Braatz, «Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation,» Nat. Energy, cilt 4, p. 383–391, 2019.

[43] [Çevrimiçi]. Available: https://www.mofcom.gov.cn/zcfb/blgg/gg/2025/index.html.

[44] [Çevrimiçi]. Available: https://www.mofcom.gov.cn/zwgk/zcfb/art/2025 art_79646f0161564975a938fe00fee158d5.html.

[45] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary.

[46] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/beyond-nmc-batteries-supply-chain-issues-for-emerging-battery-technologies.

[47] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/commentaries/with-new-export-controls-on-critical-minerals-supply-concentration-risks-become-reality.

[48] [Çevrimiçi]. Available: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65305.

[49] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/beyond-nmc-batteries-supply-chain-issues-for-emerging-battery-technologies.

[50] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries.

[51] [Çevrimiçi]. Available: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65305.

[52] [Çevrimiçi]. Available: https://www.researchnester.com/reports/lithium-ion-battery-market/1313.

[53] [Çevrimiçi]. Available: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lithium-ion-battery-market-49714593.html.

[54] [Çevrimiçi]. Available: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lithium-ion-battery-market-100123.

[55] [Çevrimiçi]. Available: https://www.custommarketinsights.com/report/lithium-ion-battery-market/.

[56] [Çevrimiçi]. Available: https://www.globenewswire.com/news-release/2025/12/06/3201051/0/en/Lithium-ion-Li-ion-Battery-Market-Size-to-Surpass-USD-250-04-Billion-by-2033-Research-by-SNS-Insider.html.

[57] [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/commentaries/global-battery-markets-are-growing-strongly-and-so-are-the-supply-risks.

[58] [Çevrimiçi]. Available: https://www.evemall.eu/selection-guide/lithium-ion-battery-market-forecast-2026.

[59] [Çevrimiçi]. Available: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market.

[60] [Çevrimiçi]. Available: https://about.bnef.com/insights/clean-transport/lithium-ion-battery-pack-prices-fall-to-108-per-kilowatt-hour-despite-rising-metal-prices-bloombergnef/.

[61] [Çevrimiçi]. Available: https://supplychaindigital.com/news/iea-battery-prices-drop-supply-chain-risks-grow.

[62] A. Begar, R. Chebbi, M. Djeghlal ve A. Fadel, «Sustainable recovery of zinc and silver from Algerian leaching residues for ecological valorization,» Discover Environment, cilt 4, p. 146, 2026.

[63] H. Boutefnouchet, R. Bouzina, B. Benouis, D. Turki, M. Saidani, S. Alleg ve S. Mechachti, «Hydrometallurgical extraction of zinc from wastes: optimization, feasibility and practical sustainable approach,» Sci. Rep., cilt 15, p. 36907, 2025.

[64] D. Latini, M. Vaccari, M. Lagnoni, M. Orefice, F. Mathieux, J. Huisman, L. Tognotti ve A. Bertei, «A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling,» J. Power Sources, cilt 546, p. 231979, 2022.

[65] [Çevrimiçi]. Available: https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/bakan-kacir-turkiyeyi-batarya-ve-enerji-depolama-teknolojileri-alanlarinda-mega-yatirim-merkezi-haline-getirecegiz/3211089.

[66] Ö. Keleş, D. B. Karahan ve K. C. Bayar, Elektrikli Araçlarda Lityum İyon Bataryalar, 1st ed., İstanbul: OTEP, 2024.

[67] Z. Cui, Q. Xie ve A. Manthiram, «A Cobalt-and Manganese-Free High-Nickel Layered Oxide Cathode for Long-Life, Safer Lithium-Ion Batteries,» Adv. Energy Mater, cilt 11, 2021.

[68] J. Pan, L. Xie, Y. Wang, J. Zheng, Y. Ma, C. Shu, Q. Zhang ve W. Tang, «Reevaluating the Critical Role of Cobalt in Ultra-High Nickel Cathodes: Toward Sustainable and High-Performance Lithium-Ion Batteries,» Adv. Funct. Mater., cilt 36, 2026.

[69] H. Jung, C. Oh, S. Park, S. An, J. Bang, J. Youn, J. Lee, J.-H. Park ve D. Han, «Lithium manganese iron phosphate (LiMn 1-y Fe y PO 4) rechargeable batteries: bridging material innovation with practical cell design,» Energy Materials, cilt 5, 2025.

[70] [Çevrimiçi]. Available: https://www.sneresearch.com/en/business/report_view/226/page.

[71] [Çevrimiçi]. Available: https://www.lifepo4-battery.com/News/eve-solid-state-battery-2026-launch.html.

[72] [Çevrimiçi]. Available: https://www.wardsauto.com/news/archive-auto-samsung-sdi-begins-production-4695-battery-cells-for-us-customer/744290/.

[73] X. Peng, Y. Zhang, Q. Wang, L. Chen, N. Chen, Y. Jiang, Z. Yang, H. Pan, H. Li, T. Zhao ve Y. Li, «A scalable and long-cycle-life 600 Wh kg−1 solid-state lithium metal pouch cell,» Nature Communications , cilt 16, p. 11695, 2025.

[74] M. Casas-Cabanas ve M. Palacín, «Challenges ahead in the development of solid-state batteries,» J. Power Sources, cilt 659, p. 238355, 2025.

[75] Z. Li, Y. You, Z. Zhu, L. Wang, S. Ou, J. Xu ve M. Yuan, «Surface iron concentration gradient: A strategy to suppress Mn3+ Jahn-Teller effect in lithium manganese iron phosphate,» Appl. Surf. Sci, cilt 685, p. 161689, 2025.

[76] Y. Liu, Y. Sun, X. Wen, T. Huang ve A. Yu, «Li2ZrO3 coated LiFe0.4Mn0.6PO4/C with enhanced cycling performance at elevated temperature for lithium-ion batteries,» J. Power Sources, cilt 613, p. 234938, 2024.

[77] H. Zeng, Y. Wan, S. Niu, X. Yu, Z. Chen, B. Li, D. Fu, P. Han ve J. Liu, «Lithium manganese iron phosphate materials: Design, progress, and challenges,,» Energy Materials and Devices, cilt 3, p. 9370060, 2025.

[78] G. Wang, G. Wang, L. Fei, L. Zhao ve H. Zhang, «Structural Engineering of Anode Materials for Low-Temperature Lithium-Ion Batteries: Mechanisms, Strategies, and Prospects,» Nanomicro Lett., cilt 16, p. 150, 2024.

[79] [Çevrimiçi]. Available: https://www.marketreportanalytics.com/reports/lithium-ion-battery-separator-154931.

[80] [Çevrimiçi]. Available: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-lithium-ion-battery-separator-market-for-electric-vehicle-application.

[81] H. Lee, M. Yanilmaz, O. Toprakci, K. Fu ve X. Zhang, «A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries,» Energy Environ. Sci., cilt 7, p. 3857–3886, 2014.

[82] S. Park, S. Choi, J. Lim, J. Seo, H. Lee, S. Kim, Y. Roh, J. Rhee ve Y. Lee, «Highly thermally conductive ceramic-coated separators with aluminum nitride for mitigating thermal runaway in lithium-ion batteries,» Chemical Engineering Journal, cilt 513, p. 162732, 2025.

[83] Y. Hwang ve M. Kim, «Effect of a Polypropylene Separator with a Thin Electrospun Ceramic/Polymer Coating on the Thermal and Electrochemical Properties of Lithium-Ion Batteries,» Polymers (Basel), cilt 16, p. 2627, 2024.

[84] C. Shi, J. Dai, X. Shen, L. Peng, C. Li, X. Wang, P. Zhang ve J. Zhao, «A high-temperature stable ceramic-coated separator prepared with polyimide binder/Al2O3 particles for lithium-ion batteries,» J. Memb. Sci., cilt 517, p. 91–99, 2016.

[85] [Çevrimiçi]. Available: https://www.factmr.com/report/battery-separator-coatings-market.

[86] [Çevrimiçi]. Available: https://www.gminsights.com/industry-analysis/battery-separator-market.

[87] A. Camposeo, T. Virgili, F. Lombardi, G. Cerullo, D. Pisignano ve M. Polini, «Quantum Batteries: A Materials Science Perspective,» Advanced Materials, cilt 37, 2025.

[88] F. Danzi, R. Salgado, J. Oliveira, A. Arteiro, P. Camanho ve M. Braga, «Structural batteries: A review,» Molecules, cilt 26, 2021.

[89] «Blade Battery,» https://www.byduae.ae/en/articles/blade-battery/, (2026).

[90] J. Gorsch, J. Schneiders, M. Frieges, N. Kisseler, D. Klohs, H. Heimes, A. Kampker, M. Muñoz Castro ve E. Siebecke, «Contrasting a BYD Blade prismatic cell and Tesla 4680 cylindrical cell with a teardown analysis of design and performance,» Cell Rep. Phys. Sci., cilt 6, p. 102453, 2025.

[91] P. Grant, D. Greenwood, K. Pardikar, R. Smith, T. Entwistle, L. Middlemiss, G. Murray, S. Cussen, M. Lain, M. Capener, M. Copley, C. Reynolds, S. Hare, M. Simmons, E. Kendrick, S. Zankowski, S. Wheeler, P. Zhu ve Slater, «Roadmap on Li-ion battery manufacturing research,» JPhys Energy, (2022).

[92] «CATL launches CTP 3.0 battery “Qilin,” achieves the highest integration level in the world,» 2022. [Çevrimiçi].

[93] Z. Chen, J. Zhang, C. Liu, C. Yang ve S. Chen, «Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries: A Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies,» Batteries, cilt 12, 2026.

[94] C. Menale, F. Vitiello, A. Mancino, A. Scotini, L. Della Seta, F. Vellucci ve R. Bubbico, «Performance of Protection Devices Integrated into Lithium-Ion Cells during Overcharge Abuse Test,» Energies (Basel), cilt 17, 2024.

[95] J. Deng, Z. Hu, J. Chen, J. Zhao ve Z. Bai, «Safety Methods for Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries—A Review,» Fire, cilt 8, (2025).

[96] W. Zuo, R. Liu, J. Cai, Y. Hu, M. Almazrouei, X. Liu, T. Cui, X. Jia, E. Apodaca, J. Alami, Z. Chen, T. Li, W. Xu, X. Xiao, D. Parkinson, Y. Yang, G.-L. Xu ve K. Amine, «Nondestructive Analysis of Commercial Batteries,» Chem. Rev., cilt 125, p. 369–444, 2025.

[97] P. Kumar ve S. Sinhmar, «Recent trends in battery manufacturing: A joining perspective,» Mater. Today Commun., cilt 52, p. 115213, 2026.

[98] G. Harper, R. Sommerville, E. Kendrick, L. Driscoll, P. Slater, R. Stolkin, A. Walton, P. Christensen, O. Heidrich, S. Lambert, A. Abbott, K. Ryder, L. Gaines ve P. Anderson, «Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles,» Nature, cilt 575, p. 75–86, 2019.

[99] Y. Yang, E. Okonkwo, G. Huang, S. Xu, W. Sun ve Y. He, «On the sustainability of lithium ion battery industry – A review and perspective,» Energy Storage Mater., cilt 36, p. 186–212, (2021).

[100] F. Mennik, N. Dinç ve F. Burat, «Selective recovery of metals from spent mobile phone lithium-ion batteries through froth flotation followed by magnetic separation procedure,» Results in Engineering, cilt 17, p. 100868, 2023.

[101] [Çevrimiçi]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/874736/Factsheet_GD_European%20Critical%20Raw%20Materials%20Act%20.pdf.pdf.

[102] [Çevrimiçi]. Available: https://madencilikturkiye.com/atik-lityum-iyon-pillerden-kritik-metallerin-geri-kazanimi-pilot-olcekte-ktu-isbirliginde-gerceklestiriliyor/.

[103] L. Gaines, «The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course„» Sustainable Materials and Technologies, cilt 1, p. 2–7, 2014.

[104] [Çevrimiçi]. Available: https://www.maden.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/40ac9371ec2671a_ek.pdf.

[105] [Çevrimiçi]. Available: https://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/sunumlar/2019-tr/65/.

[106] M. Thompson, Q. Xia, Z. Hu ve X. Zhao, «A review on biomass-derived hard carbon materials for sodium-ion batteries,» Mater. Adv., cilt 2, p. 5881–5905, 2021.

[107] M. A. Abdelkareem, A. H. Elsaid and A. G. Olabi, “Digital twin for electric vehicle battery management with cloud-based SoH prediction and SoC estimation,” Expert Systems with Applications, vol. 238, p. 120444, 2024.

[108] Y. Zhuge, H. Yang and H. Wang, Overview of Machine Learning-Enabled Battery State Estimation Methods, ShanghaiTech University, 2023.

[109] S. H. Zhang, X. Li, Z. F. Ma, Y. Ding and J. Li, “Threat modeling, vulnerability analysis, and cybersecurity of battery management systems,” IEEE Access, vol. 12, p. 1–18, 2025.

[110] Q. Zeng, Z. Luo, P. Liu and Q. Luo, “Phase change materials for thermal management of Li-ion batteries: A recent review,” Journal of Energy Storage, vol. 105, p. 114573, 2026.

[111] H. Yang, J. Lu, Y. Li and X. Gao, “Deep learning framework for lithium-ion battery state of charge estimation: A review,” Energy Storage, p. 109285, 2024.

[112] Z. Wu, H. Deng and Z. Zhao, “Configuration study of next-generation BMS based on wireless sensor networks,” International Journal of Sustainable Transport and Automation, vol. 5, p. 1–14, 2025.

[113] S. Wiley, “Standards and regulations for battery management systems,” Global Challenges, vol. 9, p. 202500129, 2025.

[114] R. Wei, X. Wang, Y. Jiang and H. Zhang, “A review of cell-to-body (CTB) battery-structure integration technology for EVs,” Frontiers in Mechanical Engineering, vol. 12, p. 1825484, 2026.

[115] Q. Wang, C. Mao, M. Mao, G. Chen and S. Zheng, “A comprehensive review of thermal runaway and mitigation strategies for battery energy storage systems,” Journal of Energy Storage, vol. 95, p. 112631, 2025.

[116] C. Vidal, P. Malysz, P. Kollmeyer and A. Emadi, “Machine learning applied to electrified vehicle battery state of charge and state of health estimation: State-of-the-art,” IEEE Access, vol. 8, p. 52796–52814, 2020.

[117] O. M. Tran, T. T. Nguyen, T. L. Dang, V. T. Nguyen and H.-M. Chen, “A critical review of battery cell balancing techniques, classifications and future trends,” Energy Reports, vol. 11, p. 2997–3011, 2024.

[118] D. Steen, L. A. Tuan and O. Carlson, “Vehicle-to-grid as a competitive alternative to energy storage in renewable-dominant power systems,” Energy, vol. 310, p. 133026, 2024.

[119] P. F. Souza, J. M. Oliveira, A. B. Paiva and M. A. Ribeiro, “State of the art in electric batteries’ state-of-health (SoH) estimation with machine learning: A review,” Energies, vol. 18, p. 746, 2025.

[120] K. A. Severson, P. M. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang and Z. Yang, “Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation,” Nature Energy, vol. 4, p. 383–391, 2019.

[121] K. Saneep and R. Sundareswaran, “Battery Fault Detection Using Machine Learning: A Review,” Semantic Scholar Preprint, 2025.

[122] D. Roman, S. Saxena, V. Robu, M. Pecht and D. Flynn, “Machine learning pipeline for battery state-of-health estimation,” Nature Machine Intelligence, vol. 3, p. 447–456, 2021.

[123] T. Reschiglian, A. Frassine and M. Roncolini, Repurposing Second Life EV Battery for Stationary Energy Storage Applications, DTU Technical University of Denmark, 2024.

[124] V. Rao and S. Vittal, "A Survey of Applications of Digital Twins to Battery Management Systems," 2023.

[125] T. Ramachandran, N. Chandrasekaran, P. Ramasamy and S. Babu, "Integration of vehicle-to-grid (V2G) technology for enhanced renewable energy storage," Journal of Neonatal Surgery, vol. 14, p. 1123–1140, 2025.

[126] P. Rahmani, S. Chakraborty, M. El Baghdadi, O. Hegazy and J. Mierlo, "Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies and future trends," Journal of Power Sources, vol. 629, p. 235827, 2025.

[127] A. Qin, J. Jia, C. Liu, D. Chen, Y. Li and K. Xu, "Battery system fault detection: A data-driven aggregation approach," IEEE Access, vol. 13, p. 1–14, 2025.

[128] S. A. Oladeji, V. T. Olateju and O. A. Popoola, Review of Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technology, 2024.

[129] V. Obrien and V. Sharma, "Cybersecurity of Battery Energy Storage Systems," 2024.

[130] F. Naseri, Z. Kazemi, P. Chakraborty, E. Schaltz and D. I. Stroe, "Lithium battery prognostics and health management for electric vehicle applications: A review," Journal of Energy Storage, vol. 91, p. 112015, 2024.

[131] R. M. Mohan, A. Kumar and P. Subha, "A review on energy management system for grid-connected renewable hybrid power plants," WIREs Energy and Environment, vol. 13, p. 70004, 2024.

[132] W. Martinez-Laserna, E. Sarasketa-Zabala, I. V. Sarria, D. I. Stroe, M. Swierczynski and A. Warnecke, "Second-life applications for retired electric vehicle batteries: A comprehensive review," Journal of Energy Storage, vol. 108, p. 115177, 2026.

[133] R. Mango, "Deep learning for lithium battery management systems: A systematic literature review," in Proceedings of the Energy Informatics Academy (EIA 2025), Paper ID, 2025.

[134] P. Liu, H. Liu, L. Li and J. Li, "A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries," Energy Storage Materials, vol. 47, p. 95–108, 2022.

[135] M. S. H. Lipu, M. S. Miah, T. Jamal, T. Rahman, S. Ansari, M. S. Rahman, R. H. Ashique, A. Shihavuddin and M. N. Shakib, "Artificial intelligence approaches for advanced battery management system in electric vehicle applications: A statistical analysis towards future research opportunities," Vehicles, vol. 5, p. 1880–1913, 2023.

[136] M. S. H. Lipu, M. A. Hannan, T. F. Karim, A. Hussain, M. H. M. Saad, A. Ayob, M. S. Miah and T. M. I. Mahlia, "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook," Journal of Cleaner Production, vol. 292, p. 126044, 2021.

[137] J. Lin, H. Li and M. Pecht, "Smart and secure battery management: The role of artificial intelligence in EV cyber-attack resilience," Journal of Energy Storage, vol. 97, p. 112780, 2026.

[138] N. Ksenia and A. Ivanov, "Optimized battery energy management using an improved type-2 fuzzy logic algorithm," Scientific Reports, vol. 16, p. 5442, 2026.

[139] A. Kraiem, Design and Implementation of a Battery Management System for a 60 V Lithium-Ion Battery Pack, Gatineau, Canada, 2025.

[140] R. A. Khalid, M. A. Waqar, M. Awais and N. Maqsood, "Advanced battery management system enhancement using IoT and LSTM networks for electric vehicles," Scientific Reports, vol. 14, p. 28517, 2024.

[141] A. R. Itagi, R. Kallimani, K. Pai, S. Iyer and O. L. A. Lopez, Cell balancing for the transportation sector: Techniques, challenges, and future research directions, 2024.

[142] M. Ismail and R. Ahmed, "A comprehensive review of cloud-based lithium-ion battery management systems for electric vehicle applications," IEEE Access, vol. 12, p. 119651–119676, 2024.

[143] M. Ismail and R. Ahmed, "A comprehensive review of cloud-based lithium-ion battery management systems for electric vehicle applications," IEEE Access, vol. 12, p. 119651–119676, 2024.

[144] F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, D. Picovici, D. Callaghan, D. Culliton and C. Nolan, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 192, p. 114171, 2024.

[145] X. Hu, F. Feng, K. Liu, L. Zhang, J. Xie and B. Liu, "A review and comparison of lithium-ion battery SOC estimation methods," IEEE Access, vol. 8, p. 183875–183906, 2020.

[146] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations," IEEE Access, vol. 6, p. 19362–19378, 2018.

[147] A. K. A. Habib, M. K. Hossain, P. Ker, M. Hannan, S. A. Ahmed and K. H. Chik, "Review article: Battery technologies and functionality of battery management systems for EVs," Journal of Power Sources, vol. 580, p. 233343, 2023.

[148] P. Eureka, Decentralized versus Centralized Battery Management Systems: A Comparative Study, 2025.

[149] Ennovi, How Is Cell-to-Pack Revolutionizing EV Battery Pack Designs, 2024.

[150] M. K. Darwish, S. Ioannou, A. Janbey, H. M. Amreiz and C. Marouchos, "Review of battery management systems," in Proceedings of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, 2021.

[151] J. R. C. E. Commission, "Overview of battery safety tests in standards for stationary battery energy storage systems," 2024.

[152] N. Chen, W. Zhang, M. Zhong, C. Fang and Y. Luo, "Real time monitoring system for lithium-ion cell using IoT," in Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2024.

[153] K. Chen, X. Peng, Y. Wang and M. Wu, "Phase change materials for lithium-ion battery thermal management: Recent advances and challenges," Journal of Energy Storage, vol. 74, p. 109330, 2023.

[154] E. Cetkin, F. Naseri, S. Gil, C. Barbu and P. G. Larsen, "Digital twin of electric vehicle battery systems: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 179, p. 113291, 2023.

[155] N. Carlstedt, L. Asp and K. Szyniszewski, "Integrating structural batteries and topology optimization: A path to multifunctional lightweight design," Composites Part B: Engineering, vol. 296, p. 112302, 2026.

[156] Y. Cao, X. Zhao, T. Zhu, X. Zhang and J. Tu, "A review of thermal management systems of lithium-ion batteries for EV applications," Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 38, p. 12, 2025.

[157] S. Bhatt and J. Sharma, "A comprehensive review of vehicle-to-grid (V2G) technology: Operational foundations, energy management systems and bidirectional power converters," Energy Reports, vol. 14, p. 102703, 2025.

[158] G. Belingardi and A. Scattina, "Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions," Vehicles, vol. 5, p. 134–155, 2023.

[159] N. Bayati, A. Abedi and E. Raajakivi, "A comprehensive review of energy and battery management systems—Control algorithms, EMS and BMS," Journal of Energy Storage, vol. 112, p. 115471, 2026.

[160] M. A. Badran and S. F. Toha, "Employment of artificial intelligence (AI) techniques in battery management system (BMS) for electric vehicles (EV): Issues and challenges," Pertanika Journal of Science & Technology, vol. 32, p. 859–881, 2024.

[161] N. Ahmed, S. Deng and A. Li, "Comparative evaluation of liquid cooling-based battery thermal management systems," International Journal of Energy Research, p. 5395508, 2024.

[162] (n.d.). [Çevrimiçi]. Available: https://informedclearly.com/en/geopolitics/54247/iea-energy-security-innovation-2026.

[163] [Çevrimiçi]. Available: https://informedclearly.com/en/geopolitics/54247/iea-energy-security-innovation-2026.

OÇG-2 KAYNAKÇA

[1] F. E. Gabus, «World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL,» Battelle Geneva Research Center, pp. 4-12, 1972.

[2] T. L. Saaty, «The analytic hierarchy process,» New York, McGraw-Hill, 1980.

[3] Hwang, C. L., & Yoon, K, «Multiple attribute decision making: Methods and applications Springer-Verlag,„» New York, 1981.

[4] M. A. Abdelkareem, A. H. Elsaid and A. G. Olabi, "Digital twin for electric vehicle battery management with cloud-based SoH prediction and SoC estimation," Expert Systems with Applications, vol. 238, p. 120444, 2024.

[5] Y. Zhuge, H. Yang and H. Wang, Overview of Machine Learning-Enabled Battery State Estimation Methods, ShanghaiTech University, 2023.

[6] S. H. Zhang, X. Li, Z. F. Ma, Y. Ding and J. Li, "Threat modeling, vulnerability analysis, and cybersecurity of battery management systems," IEEE Access, vol. 12, p. 1–18, 2025.

[7] Q. Zeng, Z. Luo, P. Liu and Q. Luo, "Phase change materials for thermal management of Li-ion batteries: A recent review," Journal of Energy Storage, vol. 105, p. 114573, 2026.

[8] H. Yang, J. Lu, Y. Li and X. Gao, "Deep learning framework for lithium-ion battery state of charge estimation: A review," Energy Storage, p. 109285, 2024.

[9] Z. Wu, H. Deng and Z. Zhao, "Configuration study of next-generation BMS based on wireless sensor networks," International Journal of Sustainable Transport and Automation, vol. 5, p. 1–14, 2025.

[10] S. Wiley, "Standards and regulations for battery management systems," Global Challenges, vol. 9, p. 202500129, 2025.

[11] R. Wei, X. Wang, Y. Jiang and H. Zhang, "A review of cell-to-body (CTB) battery-structure integration technology for EVs," Frontiers in Mechanical Engineering, vol. 12, p. 1825484, 2026.

[12] Q. Wang, C. Mao, M. Mao, G. Chen and S. Zheng, "A comprehensive review of thermal runaway and mitigation strategies for battery energy storage systems," Journal of Energy Storage, vol. 95, p. 112631, 2025.

[13] C. Vidal, P. Malysz, P. Kollmeyer and A. Emadi, "Machine learning applied to electrified vehicle battery state of charge and state of health estimation: State-of-the-art," IEEE Access, vol. 8, p. 52796–52814, 2020.

[14] O. M. Tran, T. T. Nguyen, T. L. Dang, V. T. Nguyen and H.-M. Chen, "A critical review of battery cell balancing techniques, classifications and future trends," Energy Reports, vol. 11, p. 2997–3011, 2024.

[15] D. Steen, L. A. Tuan and O. Carlson, "Vehicle-to-grid as a competitive alternative to energy storage in renewable-dominant power systems," Energy, vol. 310, p. 133026, 2024.

[16] P. F. Souza, J. M. Oliveira, A. B. Paiva and M. A. Ribeiro, "State of the art in electric batteries' state-of-health (SoH) estimation with machine learning: A review," Energies, vol. 18, p. 746, 2025.

[17] K. A. Severson, P. M. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang and Z. Yang, "Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation," Nature Energy, vol. 4, p. 383–391, 2019.

[18] K. Saneep and R. Sundareswaran, "Battery Fault Detection Using Machine Learning: A Review," Semantic Scholar Preprint, 2025.

[19] D. Roman, S. Saxena, V. Robu, M. Pecht and D. Flynn, "Machine learning pipeline for battery state-of-health estimation," Nature Machine Intelligence, vol. 3, p. 447–456, 2021.

[20] T. Reschiglian, A. Frassine and M. Roncolini, Repurposing Second Life EV Battery for Stationary Energy Storage Applications, DTU Technical University of Denmark, 2024.

[21] V. Rao and S. Vittal, "A Survey of Applications of Digital Twins to Battery Management Systems," 2023.

[22] T. Ramachandran, N. Chandrasekaran, P. Ramasamy and S. Babu, "Integration of vehicle-to-grid (V2G) technology for enhanced renewable energy storage," Journal of Neonatal Surgery, vol. 14, p. 1123–1140, 2025.

[23] P. Rahmani, S. Chakraborty, M. El Baghdadi, O. Hegazy and J. Mierlo, "Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies and future trends," Journal of Power Sources, vol. 629, p. 235827, 2025.

[24] A. Qin, J. Jia, C. Liu, D. Chen, Y. Li and K. Xu, "Battery system fault detection: A data-driven aggregation approach," IEEE Access, vol. 13, p. 1–14, 2025.

[25] S. A. Oladeji, V. T. Olateju and O. A. Popoola, Review of Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technology, 2024.

[26] V. Obrien and V. Sharma, "Cybersecurity of Battery Energy Storage Systems," 2024.

[27] F. Naseri, Z. Kazemi, P. Chakraborty, E. Schaltz and D. I. Stroe, "Lithium battery prognostics and health management for electric vehicle applications: A review," Journal of Energy Storage, vol. 91, p. 112015, 2024.

[28] R. M. Mohan, A. Kumar and P. Subha, "A review on energy management system for grid-connected renewable hybrid power plants," WIREs Energy and Environment, vol. 13, p. 70004, 2024.

[29] W. Martinez-Laserna, E. Sarasketa-Zabala, I. V. Sarria, D. I. Stroe, M. Swierczynski and A. Warnecke, "Second-life applications for retired electric vehicle batteries: A comprehensive review," Journal of Energy Storage, vol. 108, p. 115177, 2026.

[30] R. Mango, "Deep learning for lithium battery management systems: A systematic literature review," in Proceedings of the Energy Informatics Academy (EIA 2025), Paper ID, 2025.

[31] P. Liu, H. Liu, L. Li and J. Li, "A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries," Energy Storage Materials, vol. 47, p. 95–108, 2022.

[32] M. S. H. Lipu, M. S. Miah, T. Jamal, T. Rahman, S. Ansari, M. S. Rahman, R. H. Ashique, A. Shihavuddin and M. N. Shakib, "Artificial intelligence approaches for advanced battery management system in electric vehicle applications: A statistical analysis towards future research opportunities," Vehicles, vol. 5, p. 1880–1913, 2023.

[33] M. S. H. Lipu, M. A. Hannan, T. F. Karim, A. Hussain, M. H. M. Saad, A. Ayob, M. S. Miah and T. M. I. Mahlia, "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook," Journal of Cleaner Production, vol. 292, p. 126044, 2021.

[34] J. Lin, H. Li and M. Pecht, "Smart and secure battery management: The role of artificial intelligence in EV cyber-attack resilience," Journal of Energy Storage, vol. 97, p. 112780, 2026.

[35] N. Ksenia and A. Ivanov, "Optimized battery energy management using an improved type-2 fuzzy logic algorithm," Scientific Reports, vol. 16, p. 5442, 2026.

[36] A. Kraiem, Design and Implementation of a Battery Management System for a 60 V Lithium-Ion Battery Pack, Gatineau, Canada, 2025.

[37] R. A. Khalid, M. A. Waqar, M. Awais and N. Maqsood, "Advanced battery management system enhancement using IoT and LSTM networks for electric vehicles," Scientific Reports, vol. 14, p. 28517, 2024.

[38] A. R. Itagi, R. Kallimani, K. Pai, S. Iyer and O. L. A. Lopez, Cell balancing for the transportation sector: Techniques, challenges, and future research directions, 2024.

[39] M. Ismail and R. Ahmed, "A comprehensive review of cloud-based lithium-ion battery management systems for electric vehicle applications," IEEE Access, vol. 12, p. 119651–119676, 2024.

[40] M. Ismail and R. Ahmed, "A comprehensive review of cloud-based lithium-ion battery management systems for electric vehicle applications," IEEE Access, vol. 12, p. 119651–119676, 2024.

[41] F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, D. Picovici, D. Callaghan, D. Culliton and C. Nolan, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 192, p. 114171, 2024.

[42] X. Hu, F. Feng, K. Liu, L. Zhang, J. Xie and B. Liu, "A review and comparison of lithium-ion battery SOC estimation methods," IEEE Access, vol. 8, p. 183875–183906, 2020.

[43] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations," IEEE Access, vol. 6, p. 19362–19378, 2018.

[44] A. K. A. Habib, M. K. Hossain, P. Ker, M. Hannan, S. A. Ahmed and K. H. Chik, "Review article: Battery technologies and functionality of battery management systems for EVs," Journal of Power Sources, vol. 580, p. 233343, 2023.

[45] P. Eureka, Decentralized versus Centralized Battery Management Systems: A Comparative Study, 2025.

[46] Ennovi, How Is Cell-to-Pack Revolutionizing EV Battery Pack Designs, 2024.

[47] M. K. Darwish, S. Ioannou, A. Janbey, H. M. Amreiz and C. Marouchos, "Review of battery management systems," in Proceedings of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, 2021.

[48] J. R. C. E. Commission, "Overview of battery safety tests in standards for stationary battery energy storage systems," 2024.

[49] N. Chen, W. Zhang, M. Zhong, C. Fang and Y. Luo, "Real time monitoring system for lithium-ion cell using IoT," in Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2024.

[50] K. Chen, X. Peng, Y. Wang and M. Wu, "Phase change materials for lithium-ion battery thermal management: Recent advances and challenges," Journal of Energy Storage, vol. 74, p. 109330, 2023.

[51] E. Cetkin, F. Naseri, S. Gil, C. Barbu and P. G. Larsen, "Digital twin of electric vehicle battery systems: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 179, p. 113291, 2023.

[52] N. Carlstedt, L. Asp and K. Szyniszewski, "Integrating structural batteries and topology optimization: A path to multifunctional lightweight design," Composites Part B: Engineering, vol. 296, p. 112302, 2026.

[53] Y. Cao, X. Zhao, T. Zhu, X. Zhang and J. Tu, "A review of thermal management systems of lithium-ion batteries for EV applications," Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 38, p. 12, 2025.

[54] S. Bhatt and J. Sharma, "A comprehensive review of vehicle-to-grid (V2G) technology: Operational foundations, energy management systems and bidirectional power converters," Energy Reports, vol. 14, p. 102703, 2025.

[55] G. Belingardi and A. Scattina, "Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions," Vehicles, vol. 5, p. 134–155, 2023.

[56] N. Bayati, A. Abedi and E. Raajakivi, "A comprehensive review of energy and battery management systems—Control algorithms, EMS and BMS," Journal of Energy Storage, vol. 112, p. 115471, 2026.

[57] M. A. Badran and S. F. Toha, "Employment of artificial intelligence (AI) techniques in battery management system (BMS) for electric vehicles (EV): Issues and challenges," Pertanika Journal of Science & Technology, vol. 32, p. 859–881, 2024.

[58] N. Ahmed, S. Deng and A. Li, "Comparative evaluation of liquid cooling-based battery thermal management systems," International Journal of Energy Research, p. 5395508, 2024.

[59] Z. Zhang, Y. Wu, Z. Mo, X. Lei, X. Xie, X. Xue, H. Qin ve H. Jiang, «Research progress of silicon-based anode materials for lithium-ion batteries,» RSC Advances, cilt 15, no. 14, pp. 10731-10753, 2025.

[60] J. Zhang, Z. Liu, C. Zeng, J. Luo, Y. Deng, X. Cui ve Y. Chen, «High-voltage LiCoO ₂ cathodes for high-energy-density lithium-ion battery,» Rare Metals, cilt 41, no. 12, pp. 3946-3956, December 2022.

[61] B. D. K. Ö. K. Kerim Can Bayar, Elektr'kl' Araçlarda L"tyum İyon Bataryalar, 1 dü., cilt 1, O. keles, Dü., OTEP, 2024.

[62] H. Zeng, Y. Wan, S. Niu, X. Yu, Z. Chen, B. Li, D. Fu, P. Han ve J. Liu, «Lithium manganese iron phosphate materials: Design, progress, and challenges,» Energy Materials and Devices, cilt 3, no. 1, p. 9370060, March 2025.

[63] C. Wang, Y. Wu, S. Wang, E. van der Heide ve X. Zhuang, «Interface issues between cathode and electrolyte in sulfide-based all-solid-state lithium batteries and improvement strategies of interface performance through cathode modification,» Materials Research Bulletin, cilt 181, p. 113078, January 2025.

[64] M. Thompson, Q. Xia, Z. Hu ve X. S. Zhao, «A review on biomass-derived hard carbon materials for sodium-ion batteries,» Materials Advances, cilt 2, no. 18, pp. 5881-5905, 2021.

[65] D. F. Smith ve J. A. Gucinski, «Synthetic silver oxide and mercury-free zinc electrodes for silver–zinc reserve batteries,» Journal of Power Sources, cilt 80, no. 1-2, pp. 66-71, July 1999.

[66] C. Shi, J. Dai, X. Shen, L. Peng, C. Li, X. Wang, P. Zhang ve J. Zhao, «A high-temperature stable ceramic-coated separator prepared with polyimide binder/Al2O3 particles for lithium-ion batteries,» Journal of Membrane Science, cilt 517, pp. 91-99, November 2016.

[67] K. A. Severson, P. M. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang, Z. Yang, M. H. Chen, M. Aykol, P. K. Herring, D. Fraggedakis, M. Z. Bazant, S. J. Harris, W. C. Chueh ve R. D. Braatz, «Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation,» Nature Energy, cilt 4, no. 5, pp. 383-391, March 2019.

[68] M. M. Rahman, U. Nisar, A. Abouimrane, I. Belharouak ve R. Amin, «Valuation of Anode Materials for High-Performance Lithium Batteries: From Graphite to Lithium Metal and Beyond,» Electrochemical Energy Reviews, cilt 8, no. 1, p. 14, December 2025.

[69] S. Park, S. Choi, J. Lim, J. P. Seo, H. Lee, S. Kim, Y. Roh, J. Rhee ve Y. M. Lee, «Highly thermally conductive ceramic-coated separators with aluminum nitride for mitigating thermal runaway in lithium-ion batteries,» Chemical Engineering Journal, cilt 513, p. 162732, June 2025.

[70] J. Pan, L. Xie, Y. Wang, J. Zheng, Y. Ma, C. Shu, Q. Zhang ve W. Tang, «Reevaluating the Critical Role of Cobalt in Ultra-High Nickel Cathodes: Toward Sustainable and High-Performance Lithium-Ion Batteries,» Advanced Functional Materials, cilt 36, no. 5, January 2026.

[71] Y. Liu, Y. Sun, X. Wen, T. Huang ve A. Yu, «Li2ZrO3 coated LiFe0.4Mn0.6PO4/C with enhanced cycling performance at elevated temperature for lithium-ion batteries,» Journal of Power Sources, cilt 613, p. 234938, September 2024.

[72] Y. Li, Y. Yan, K. Shen, M. He, Y. Li, H. Song, C. Zheng, W. Shi, F. Ye, K. I. Ozoemena, M. Safari ve Q. Pang, «High Energy Density Solid-State Lithium–Sulfur Batteries: Challenges and Advances in Cathode Materials,» ACS Nano, cilt 19, no. 39, pp. 34469-34491, October 2025.

[73] H. Lee, M. Yanilmaz, O. Toprakci, K. Fu ve X. Zhang, «A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries,» Energy Environ. Sci., cilt 7, no. 12, pp. 3857-3886, 2014.

[74] D. Latini, M. Vaccari, M. Lagnoni, M. Orefice, F. Mathieux, J. Huisman, L. Tognotti ve A. Bertei, «A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling,» Journal of Power Sources, cilt 546, p. 231979, October 2022.

[75] K. W. Beard, Linden's Handbook of Batteries, 5 dü., 2019.

[76] A. P. Karpinski, S. J. Russell, J. R. Serenyi ve J. P. Murphy, «Silver based batteries for high power applications,» Journal of Power Sources, cilt 91, no. 1, pp. 77-82, November 2000.

[77] H. Jung, C. Oh, S. Park, S. An, J. Bang, J. Youn, J. Lee, J.-H. Park ve D. Han, «Lithium manganese iron phosphate (LiMn _{1-y} Fe _y PO ₄) rechargeable batteries: bridging material innovation with practical cell design,» Energy Materials, cilt 5, no. 9, June 2025.

[78] Y. Hwang ve M. Kim, «Effect of a Polypropylene Separator with a Thin Electrospun Ceramic/Polymer Coating on the Thermal and Electrochemical Properties of Lithium-Ion Batteries,» Polymers, cilt 16, no. 18, p. 2627, September 2024.

[79] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon ve O. S. Tomomewo, «Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies,» Future Batteries, cilt 4, p. 100007, December 2024.

[80] Y. Dou, S. Zhou, J. I. G. Dawkins, K. Zaghib, K. Amine, G. Xu ve S. Deng, «Manganese-Based Spinel Cathodes: A Promising Frontier for Solid-State Lithium-Ion Batteries,» Advanced Materials, cilt 38, no. 3, January 2026.

[81] V. Devasenapathy, G. A. Pathanjali ve N. Srinivasan, «Laser technique in diaphragm cum rupture disc for defence oriented silver oxide zinc reserve batteries,» Materials and Manufacturing Processes, cilt 34, no. 4, pp. 447-454, March 2019.

[82] Z. Cui, Q. Xie ve A. Manthiram, «A Cobalt- and Manganese-Free High-Nickel Layered Oxide Cathode for Long-Life, Safer Lithium-Ion Batteries,» Advanced Energy Materials, cilt 11, no. 41, November 2021.

[83] M. Casas-Cabanas ve M. R. Palacín, «Challenges ahead in the development of solid-state batteries,» Journal of Power Sources, cilt 659, p. 238355, December 2025.

[84] H. Boutefnouchet, R. Bouzina, B. Benouis, D. Turki, M. Saidani, S. Alleg ve S. Mechachti, «Hydrometallurgical extraction of zinc from wastes: optimization, feasibility and practical sustainable approach,» Scientific Reports, cilt 15, no. 1, p. 36907, October 2025.

[85] A. Benzaid, R. Whba, N. Bounar, A. Saoudel ve S. Altin, «Exploration of structural and electrochemical characterization of niobium substituted alpha Na1.1MnO2 as sodium-ion battery cathodes,» Scientific Reports, cilt 16, no. 1, p. 17106, April 2026.

[86] A. Begar, R. Chebbi, M. E. A. Djeghlal ve A. Fadel, «Sustainable recovery of zinc and silver from Algerian leaching residues for ecological valorization,» Discover Environment, cilt 4, no. 1, p. 146, March 2026.



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI

SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI

SSB

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI
SAVUNMA SANAYİİ
BAŞKANLIĞI

SSB

BATARYA TEKNOLOJİLERİ

OTAĞ SONUÇ RAPORU

Eylül 2026

TASNİF DIŞI