SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

SU|NUM SABANCI ÜNİVERSİTESİ NANOTEKNOLOJİ ARAŞTIRMA VE UYGULAMA MERKEZİ

Photo by David Cristian on Unsplash

Enerji ve Ulaştırma Sektörleri Dönüşümünde Batarya Teknolojilerinin Rolü: Eğilimler, Fırsatlar ve Yenilikçi Uygulamalar

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Hakkında
Avrupa İklim Vakfı (ECF), Agora Energiewende ve Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi (IPC) tarafından kurulan SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, yenilikçi bir enerji dönüşümü platformu aracılığıyla; enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunmaktadır. Merkez, Türkiye enerji sektöründe teknolojik, iktisadi ve politik boyutlara ilişkin tartışmalar yürütmek üzere, sürdürülebilir ve yaygın kabul gören bir platform sunma ihtiyacını karşılamayı hedeflemektedir. SHURA olgulara yaslanan analizlere ve en güncel verilere dayanarak, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji vasıtasıyla düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişe yönelik tartışmalara destek sunmaktadır. Merkez, birçok paydaşın konuyla ilgili bakış açılarını da dikkate alarak, böyle bir dönüşümün iktisadi potansiyelinin, teknik açıdan uygulanabilirliğinin ve ilgili politika araçlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM)
Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM), 2010 yılında Sabancı Vakfı ve Devlet Planlama Teşkilatı'nın (DPT) desteği ile kurulmuş olup, 2017 yılında 6550 sayılı kanun kapsamında Kalkınma Bakanlığı'na bağlı "Ulusal Araştırma Alt Yapısı" olarak yeterlilik kazanmıştır. Araştırma stratejisi, yerel, bölgesel ve ulusal kalkınma hedefleri kapsamında kurgulanmış olan SUNUM, ülkenin ve yerel sanayinin ihtiyaçlarına ve önceliklerine yönelik, uluslararası yetkinlikte ve öncü nitelikte çalışmalara ev sahipliği yapmaktadır. İleri malzeme, çevre, sağlık, enerji, savunma ve gıda öncelikli araştırma alanları arasındadır.

Yazarlar
Hasan Aksoy (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi) ve Dr. Serap Hayat Soytaş (Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM))

Teşekkürler
SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi direktörü Dr. Değer Saygın çalışma süreci boyunca ve raporun hazırlanması esnasında görüş, yönlendirme ve geri bildirimleriyle katkıda bulunmuştur. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Yönlendirme Komitesi üyesi Selahattin Hakman, Prof. Dr. Yusuf Menceloğlu (Sabancı Üniversitesi), Doç. Dr. Muhsin Mazman (T Dinamik), Prof. Dr. Şaban Patat (Erciyes Üniversitesi) ve Doç. Dr. Rezan Demir Çakan (Gebze Teknik Üniversitesi) raporu inceleyerek geri bildirimde bulunmuştur. Sağlanmış olan tüm değerli inceleme, geri bildirim ve görüşler için teşekkür ederiz.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, bu rapor için AGCI-Crux Enerji Programı tarafından sağlanan cömert finansmana müteşekkirdir.

Bu rapor, www.shura.org.tr sitesinden indirilebilir.
Daha ayrıntılı bilgi almak veya geri bildirimde bulunmak için info@shura.org.tr adresinden SHURA ekibiyle temasa geçiniz.

Tasarım
Tasarımhane Tanıtım Ltd. Şti.

Telif Hakkı © 2019 Sabancı Üniversitesi

ISBN 978-605-2095-73-7

Sorumluluk Reddi
Bu rapordaki yorumlar ve çıkarılan sonuçlar yalnızca yazarlara aittir ve SHURA'nın resmi görüşünü yansıtmamaktadır.

Enerji ve Ulaştırma Sektörleri Dönüşümünde Batarya Teknolojilerinin Rolü: Eğilimler, Fırsatlar ve Yenilikçi Uygulamalar

İÇİNDEKİLER

Şekiller Listesi 4

Tablolar Listesi 6

Kısaltmalar Listesi 7

1. Giriş 9

2. Kurşun-asit Batarya 17
   2.1 Mevcut Teknoloji 17
   2.2 Piyasa Durumu 20
   2.3 Maliyet ve Yatırımlar 24
   2.4 Bariyerler 27
   2.4 Yenilikçilik için Fırsatlar 28

3. Lityum-iyon Batarya 31
   3.1 Mevcut Teknoloji 31
   3.2 Piyasa Durumu 35
   3.3 Maliyet ve Yatırımlar 40
   3.4 Bariyerler 44
   3.4 Yenilikçilik için Fırsatlar 46

4. Akışkan Batarya 49
   4.1 Mevcut Teknoloji 49
   4.2 Piyasa Durumu 51
   4.3 Maliyet ve Yatırımlar 54
   4.4 Bariyerler 57
   4.4 Yenilikçilik için Fırsatlar 60

5. Yüksek Sıcaklıklı Batarya 63
   5.1 Mevcut Teknoloji 63
   5.2 Piyasa Durumu 65
   5.3 Maliyet ve Yatırımlar 67
   5.4 Bariyerler 69
   5.4 Yenilikçilik için Fırsatlar 71

Kaynaklar 72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Farklı iletim şebekesi esneklik seçeneklerinin birim fayda ve maliyeti ($Euro_{2016}$ /MWh) 9
Şekil 2: Batarya enerji depolama sistemleri uygulamaları 10
Şekil 3: Elektrik sistemi batarya enerji depolama yatırımlarının yıllar bazında büyüklüğü ve ülkelere dağılımı 11
Şekil 4: Elektrik sistemi batarya enerji depolama kapasite gelişimlerinin yıllar bazında ülkelere dağılımı 12
Şekil 5: Çalışmada odaklanılan batarya teknolojileri (kesikli kırmızı çizgi ile işaretlidir) 13
Şekil 6: Enerji depolama teknolojilerinin farklı uygulama alanları için kullanılabilirliği 13
Şekil 7: Batarya enerji depolama sistemlerinde yatırım maliyetlerinin düşme öngörüsü, 2016-2030 15
Şekil 8: Kurşun-asit bataryanın çalışma şekli 18
Şekil 9: Otomobil marş aküsü olarak kurşun-asit ve lityum-iyon bataryalar 20
Şekil 10: 2015 yılı küresel kurşun-asit bataryaların tahmini satış dağılımı (Milyon adet) 21
Şekil 11: Batarya teknolojilerinin pazar içindeki üretim payları (MWh) 22
Şekil 12: Tahmini proje maliyet dağılımı 23
Şekil 13: Kurşun-asit batarya enerji sistemi özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması 26
Şekil 14: ArcActive teknolojisinin DCA ve şarj ömrü performansı 28
Şekil 15: Gelişmiş kurşun-asit batarya tasarımı “UltraBattery” 29
Şekil 16: Lityum batarya sistemlerinin sınıflandırılması 32
Şekil 17: Lityum-iyon bataryanın çalışma prensibi 32
Şekil 18: Ticari lityum-iyon bataryaların temel özellikleri 34
Şekil 19: Batarya enerji depolama sistemleri uygulamaları 36
Şekil 20: 2000-2016 yılları arası dünya genelindeki lityum-iyon batarya satış trendi 37
Şekil 21: Sayaç arkası NCA batarya sistemi kurulumu için tahmini maliyet dağılımı 39
Şekil 22: Lityum-iyon bataryaların özellikleri, avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması dağılımı 40
Şekil 23: Farklı lityum-iyon batarya teknolojilerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması 41
Şekil 24: Lityum-iyon hücrelerinin 2016 yılındaki ortalama maliyet yapıları 42
Şekil 25: Seçilmiş bazı lityum-iyon batarya elektrik depolama sistemlerinin maliyet analizi 43
Şekil 26: LFP batarya enerji depolama sistemlerinin maliyet bileşenlerinde oluşabilecek iyileştirmeler, 2016-2030 44
Şekil 27: Batarya enerji depolama üretim ve yaşam sonu döngüsü 46
Şekil 28: Akışkan batarya elektrik üretimi 50
Şekil 29: Akışkan batarya sistem kategorileri ve teknolojilerine odaklanma 51
Şekil 30: Teknoloji ve bölge bazında enerji depolama kapasite gelişimi (Pompaj hidroelektrik depolama hariç), 2018 (MW) 52

Şekil 31: Küresel tahmini VRFB piyasası gelişimi, 2015-2025 (MW, Milyon ABD Doları) (temsili gösterim) 52
Şekil 32: Şebeke dışı hibrit sistem entegrasyonu 54
Şekil 33: Akışkan batarya enerji sistemi maliyetleri ve teknik özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması 55
Şekil 34: Vanadyum Redoks Akışkan Batarya sistemlerinin maliyet analizi 56
Şekil 35: V_2O_5, Pb ve Li fiyatlarının 2001-2015 yılları arasındaki değişimi 58
Şekil 36: Akışkan bataryalarda redoks çifti/elektrolit/membran arasındaki denge 60
Şekil 37: Sodyum-sülfür bataryanın çalışma şekli 64
Şekil 38: Na-$NiCl_2$ batarya hücresi, seramik elektrolit BASE'dir 65
Şekil 39: Enerji depolama teknolojilerinin yüzdesel dağılımı (Pompaj hidroelektrik hariç) 66
Şekil 40: Yüksek sıcaklıklı batarya elektrik depolama sistemlerinin özellikleri 67
Şekil 41: Yüksek sıcaklıklı batarya elektrik depolama sistemleri özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırılması 69
Şekil 42: Sodyum-esaslı teknolojilerin mevcut durumu ve çözülmesi gereken sorunlar 71

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1: Ecoult "UltraBattery" Enerji Kaynağı (UBER) 320/500 kW sisteminin teknik özellikleri bataryalar 24
Tablo 2: Rüzgar enerjisi ve batarya depolama projesi özellikleri 24
Tablo 3: Kurşun-asit bataryalar için maliyet araştırma ve geliştirme çalışmaları 25
Tablo 4: Kurşun-asit batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri 26
Tablo 5: Su takviyeli kurşun-asit batarya (FLA) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları 27
Tablo 6: Supap ayarlı kurşun-asit batarya (VRLA) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları 27
Tablo 7: BYD 500 kW/500 kWh lityum demir fosfat batarya teknik özellikleri 38
Tablo 8: Sayaç arkası NCA kurulumu performans ve maliyet istatistikleri 39
Tablo 9: Lityum-iyon batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri 41
Tablo 10: Lityum-iyon batarya teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları 45
Tablo 11: Prudent Enerji vanadyum redoks akışkan batarya teknik özellikleri 53
Tablo 12: Akışkan bataryalar için maliyet araştırma ve geliştirme çalışmaları 56
Tablo 13: Akışkan batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri 57
Tablo 14: Akışkan batarya enerji depolama sistemlerinin genel avantaj ve dezavantajları 57
Tablo 15: Vanadyum redoks akışkan batarya (VRFB) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları 59
Tablo 16: Farklı redoks kimyaları ile VRFB karşılaştırması 61
Tablo 17: "NGK Insulators" sodyum sülfür batarya teknik özellikleri 66
Tablo 18: Yüksek sıcaklıklı batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri 68
Tablo 19: Sodyum sülfür batarya (NaS) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları 70
Tablo 20: Enerji depolama uygulamaları için diğer teknolojilere kıyasla $NaNiCl_2$ bataryaların genel avantajları ve dezavantajları 70

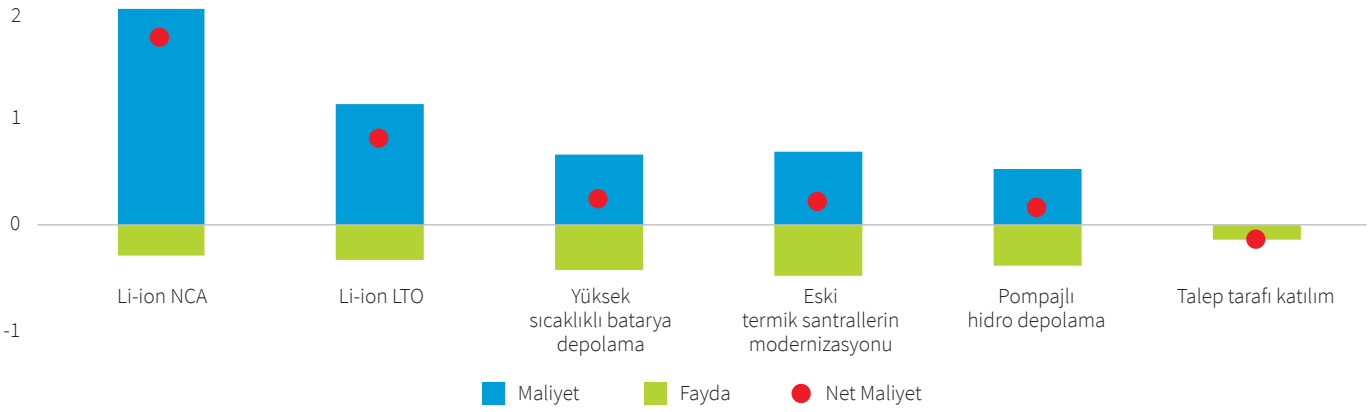
KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ah	Amper saat
BASE	Beta alüminyum katı elektrolit
CAES	Sıkıştırılmış hava
DCA	Dinamik Şarj Kabülü
FLA	Su takviyeli kurşun-asit batarya
GW	gigavat
ICB	Demir Krom
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IoT	Nesnelerin İnterneti
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
KEB	Kodiak Elektrik Birliği
kg	kilogram
kV	kilovolt
kW	kilovat
kWh	kilovat saat
L	litre
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LCOE	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat
m	metre
MW	megavat
MWh	megavat saat
NaS	Sodyum sülfür
NCA	Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NCA	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
PSB	Polisülfür Bromür
SLI	Otomobil Marş Aküleri
USD	ABD doları
V	volt
VRFB	Vanadyum Redoks Akışkan Bataryalar
VRLA	Supap ayarlı kurşun-asit batarya
W	vat
Wh	vat saat
ZBFB	Çinko Bromür Akışkan Batarya
ZEBRA	Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Projesi (Zeolite Battery Research Africa project)

1. Giriş

SHURA'nın Mayıs 2018'de yayımlamış olduğu şebeke entegrasyon çalışmasına göre, yüksek gerilim iletim şebekelerinin (154 kilovolt (kV) ve üzeri) 2026'ya kadar, planlanan yatırımların ötesine geçen yatırımlara gerek duyulmaksızın ve işletimle ilgili güçlükler yaşanmaksızın, toplam 40 GW'lık rüzgâr ve güneş enerjisini entegre edebileceğini göstermiştir. Aynı raporda, planlanan rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitesinin 2026'ya kadar üç katına, yani 60 GW'a çıkarılmasının da mümkün olduğu, ancak bu büyüklükteki bir kapasitenin entegre edilmesinin, örneğin daha esnek kömür santralleri, talep tarafı katılımı ya da enerji depolama gibi seçeneklerin devreye sokulmasıyla daha esnek bir enerji sistemi gerektireceği belirtilmektedir. Belirtilen esneklik seçenekleri farklı seviyelerde faydaları beraberinde getirecektir. Aynı çalışmada, sistemin esnekliğinin artırılmasının fayda ve maliyetlerine ilişkin değerlendirilmeler, dağıtık batarya depolama, pompaj depolamalı hidroelektrik sistemler, talep tarafı katılımı ve eski kömür santrallerinin iyileştirilmesi kapsamında ele alınmıştır. Şekil 1'de çalışmanın çıktılarından biri olan, esneklik seçeneklerinin maliyet ve faydalarının karşılaştırması gösterilmektedir.

Şekil 1: *Farklı iletim şebekesi esneklik seçeneklerinin birim fayda ve maliyeti (Euro$_{2016}$/MWh)*



NCA: Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
LTO: Lityum Titanat

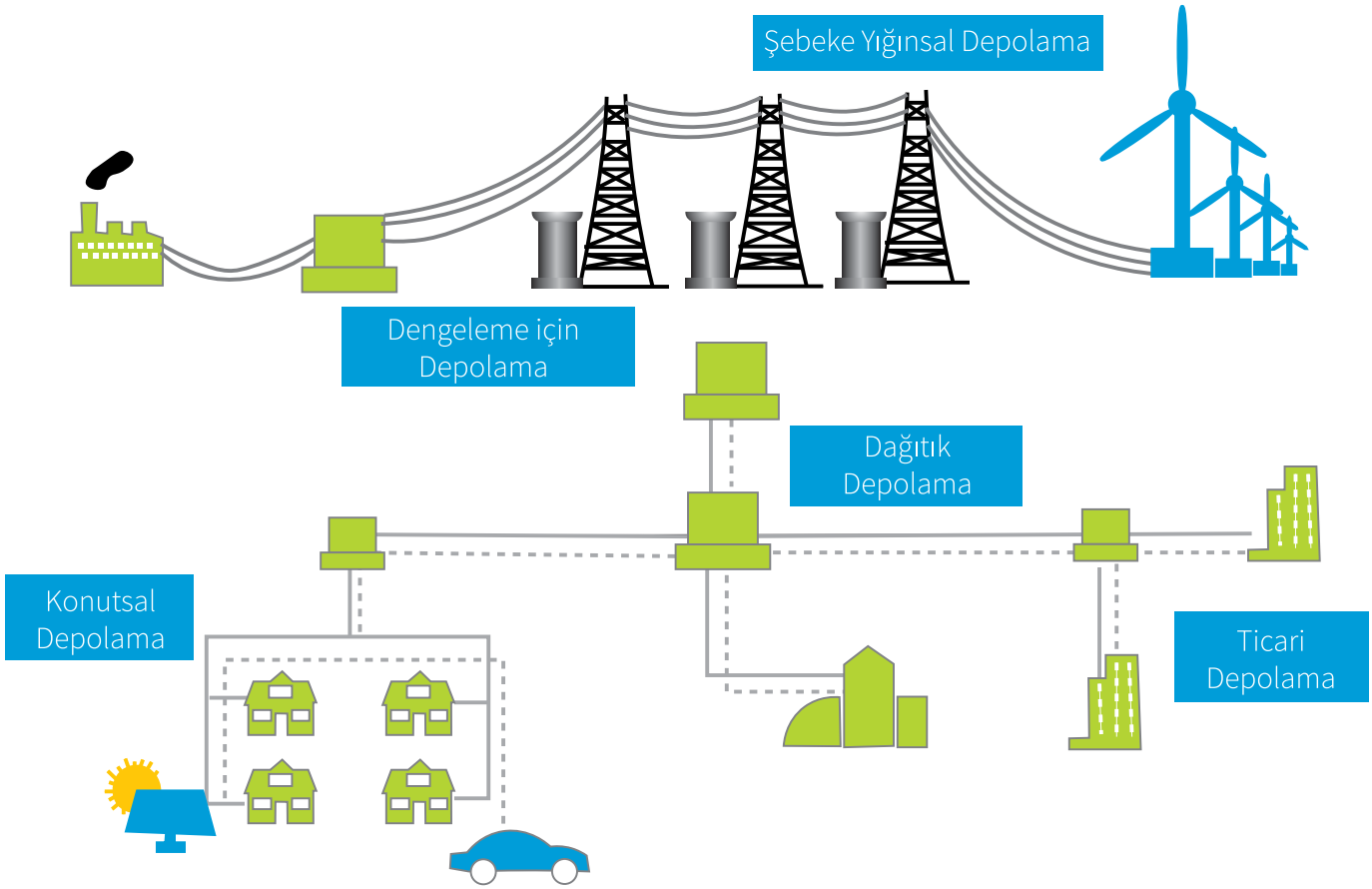
Kaynak: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

Esneklik seçeneklerinden biri olan batarya enerji depolama teknolojilerinin, farklı uygulama alanlarında kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Batarya enerji depolama sistemlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler dikkate alındığında, maliyet ve fayda karşılaştırmalarının tam olarak anlaşılması için konunun farklı perspektiflerden ve daha detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi içindeki payının artması, düşük karbonlu enerji sistemine geçişte kilit rol oynarken; elektrik şebekesinin sağlıklı çalışabilmesine katkı sağlayan enerji depolama teknolojilerinin gelişmesinde öncü olmuştur. Batarya enerji depolama, son tüketiciler de dahil olmak üzere tüm enerji sistemine sağladığı faydalar dikkate alındığında, önümüzdeki yıllarda enerji dönüşümünün merkezinde olacaktır. Küresel ölçekte elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması, batarya teknolojilerindeki değişim ve gelişime yön verecek bir başka önemli etken olacaktır.

Enerji depolama batarya sistemlerinin gelişimini yönlendiren ana akımlardan biri, çevreye duyarlı daha temiz araçlara duyulan ihtiyacın etkisiyle, elektrik mobilite alanında yaşanan gelişmelerdir. Batarya uygulamalarının çekiciliğini artıran bir diğer faktör ise, malzeme teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle batarya maliyetinin düşmesidir. Bunun yanında toplumun çevresel konulara olan hassasiyetinin artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artmasına ve bu artan yenilenebilir enerji katkısının bir sonucu olarak da batarya depolama uygulamalarındaki artışa katkıda bulunmaktadır. Elektrikli araç ve enerji sistemlerinde olan uygulamaların yanı sıra, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve cihaz elektrifikasyonunda (örneğin e-kitaplar, akıllı saatler, akıllı telefonlar, akıllı anahtarlar vb.) yaşanan gelişmeler daha yüksek yoğunluklu bataryalara olan ihtiyacı hızla artırmaktadır.

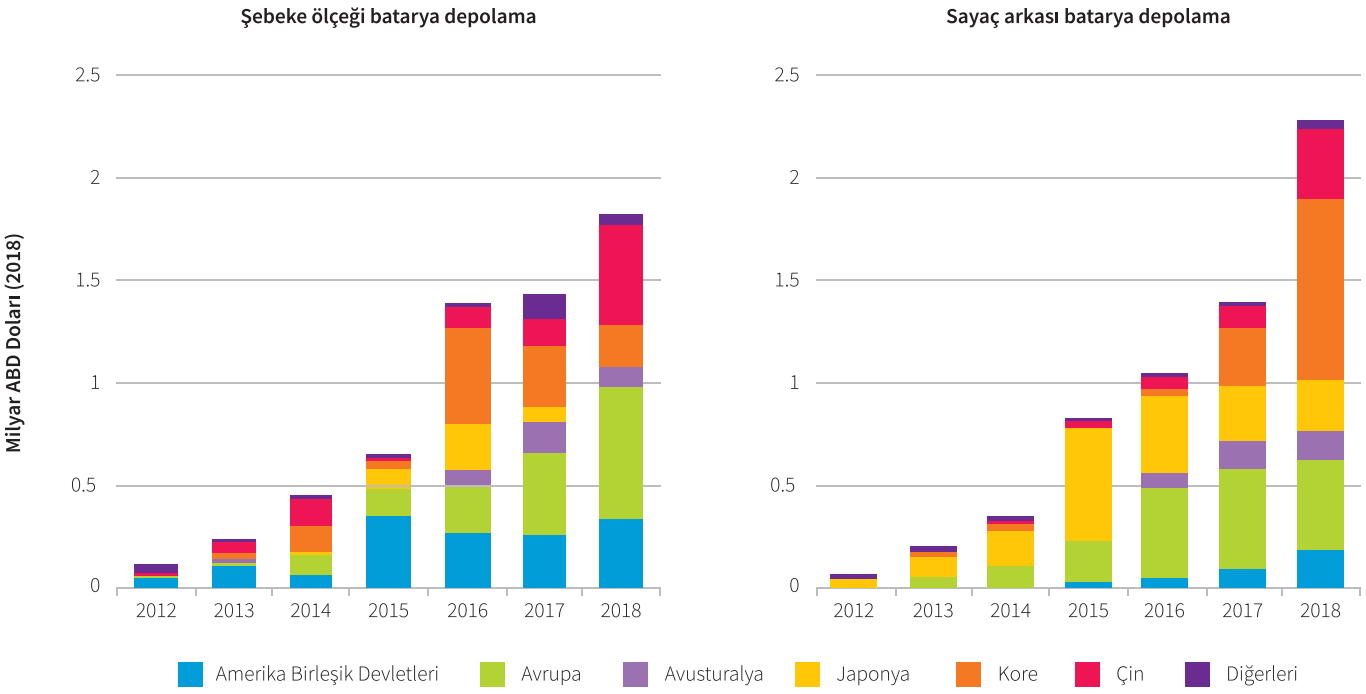
Şekil 2: *Batarya enerji depolama sistemleri uygulamaları*



Kaynak: Kore Batarya Endüstrisi Birliği (2017)

Batarya enerji depolama alanında yapılanan yatırımlar 2018 yılında %45 artarak 4 milyar ABD dolarının üzerine çıkmıştır. Hem şebeke ölçeğinde hem de sayaç arkası batarya kurulumları, bu hızlı artışta öncü olmuştur. 2018 yılında şebeke ölçeğinde batarya depolama uygulamalarına yapılan yatırım harcaması 2017 yılına göre %30 artarak, toplamda 1,2 GW kurulu güç kapasitesine ulaşılmıştır. Kapasite mekanizmaları ve sözleşmelerle desteklenen bu gelişimin yarısı Avrupa (özellikle Birleşik Krallık) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde olmuştur. Çin, 2017 yılına göre dört kat artış göstererek, en büyük büyümeye sahip ülke olmuştur.

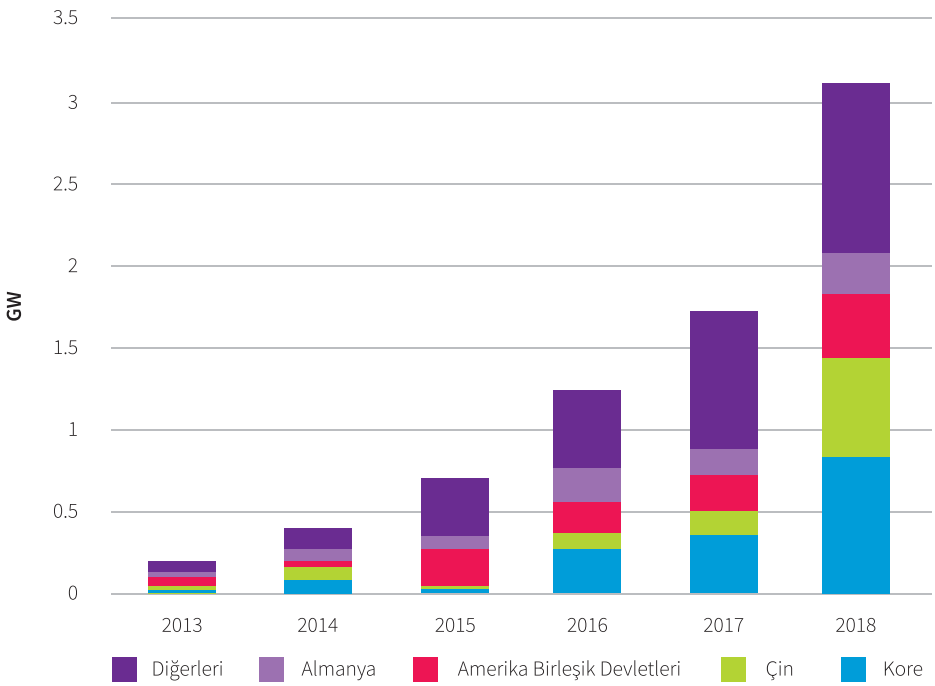
Şekil 3: *Elektrik sistemi batarya enerji depolama yatırımlarının yıllar bazında büyüklüğü ve ülkelere dağılımı*



Kaynak: Clean Horizon (2019), CNESA (2019) ve BNEF (2019) temelli hesaplamalarla IEA analizi

2018 yılında sayaç arkası batarya depolama yatırımları bir önceki yıla kıyasla %60 oranında artarak, toplamda yaklaşık 1,9 GW'lık kapasiteye ulaşılmıştır. Güney Kore, puant talebi düşürmeyi amaçlayan sanayi ve ticarethane tarife düzenlemeleriyle, düşük talep zamanlarında batarya şarjını ve puant yük zamanlarında da deşarjını destekleyen politikalarla bu büyümede öncü olmuştur. 2018 yılında şebeke ölçeğinde batarya projeleri için ortalama maliyetler kilovatsaat başına 400 ABD dolarının altına düşmüştür. Sayaç arkası uygulamalarda daha hızlı maliyet düşüşleri yaşanmış, kilovatsaat başına 800 ABD dolarına yaklaşmıştır. Küresel bazda şebeke ölçeğinde ve sayaç arkası uygulamalarda kullanılan batarya depolama kapasiteleri, 2018 yılında bir önceki yıla oranla iki kat artarak 3 GW'ın biraz üstünde gerçekleşmiştir. Avustralya, Çin, Güney Kore, Birleşik Krallık, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri, 2018'de devreye alınan yeni batarya depolama sistemlerinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Diğer taraftan enerji depolama sistemlerinde en büyük paya sahip olan pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, 2018 sonu itibariyle toplam 170 GW kurulu güç seviyelerine ulaşmıştır.

Şekil 4: *Elektrik sistemi batarya enerji depolama kapasite gelişimlerinin yıllar bazında ülkelere dağılımı*



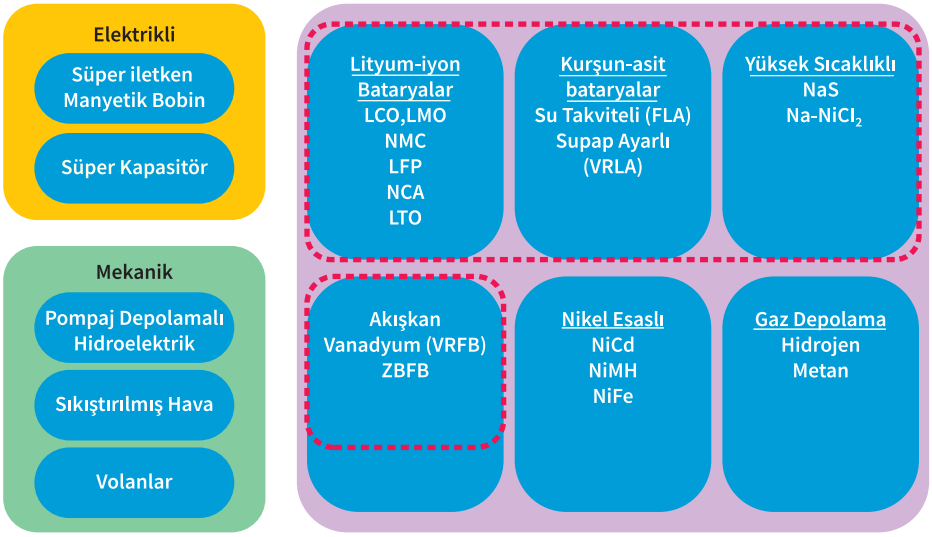
Kaynak: IEA Energy storage (2019)

Farklı elektrokimyasal batarya teknolojilerinin, uygulamalar bazında farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu sebeple batarya enerji depolama sistemlerinin nerede ve hangi hizmet için kullanılacağı batarya seçiminde en önemli kriterdir. Bu çalışma, lityum-iyon, kurşun-asit, akışkan ve yüksek sıcaklı olmak üzere dört farklı elektrokimyasal batarya teknolojisine odaklanmaktadır. Bu batarya teknolojileri beş bölümde değerlendirilmiş olup bunlar sırasıyla aşağıda belirtilmiştir;

- Mevcut teknoloji
- Piyasa durumu
- Maliyet ve Yatırımlar
- Bariyerler
- Yenilikçilik için fırsatlar

Diğer taraftan, enerji sistemi özelinde her batarya teknolojisinin farklı uygulama alanları, küresel ölçekte en iyi vaka analizi çalışmalarıyla örneklenmiştir.

Şekil 5: *Çalışmada odaklanılan batarya teknolojileri (kesikli kırmızı çizgi ile işaretlidir)*



Kaynak: IRENA (2017)

Çalışmada, başta lityum-iyon olmak üzere farklı kimyasalların ve malzemelerin kullanıldığı Şekil 5'te kesikli kırmızı çizgi ile işaretli batarya teknolojilerinin farklı özellikleri ve uygulama alanları detaylı şekilde ele alınmıştır. Bu uygulama alanlarının bazıları Şekil 6'da özetlenmiştir.

Şekil 6: *Enerji depolama teknolojilerinin farklı uygulama alanları için kullanılabilirliği*

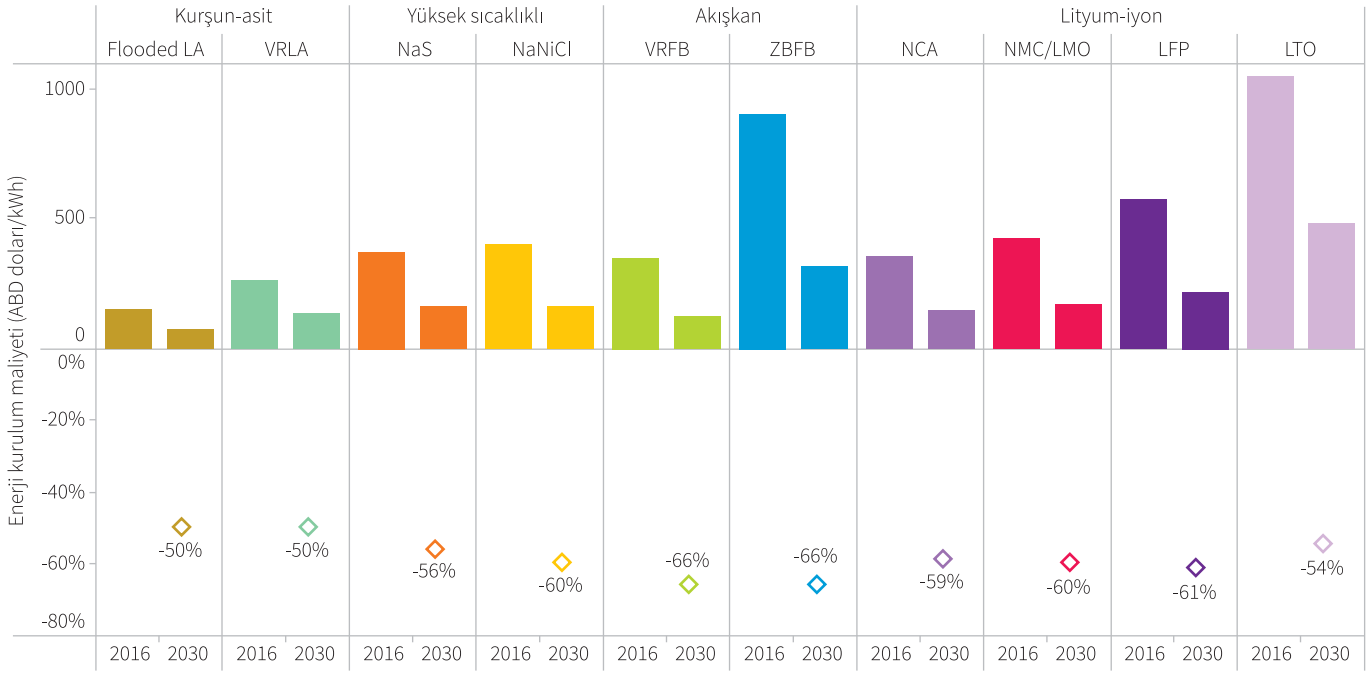
	Şebeke hizmetleri				Sayaç arkası					Şebeke dışı		
	Gelişmiş frekans tepkisi	Frekans tutma rezervi	Frekans yenileme rezervi	Enerji zaman kaydırma / Yük dengeleme	Öz tüketim (mesken)	Toplu kullanım için depolama	Enerji kalitesinin artırılması	Yük kaydırma	Zamana bağlı kullanım	Nano şebeke dışı uygulamaları	Köy elektrifikasyonu	Ada şebeke
Pompajlı hidroelektrik	▁	▁	▃	▃	▁	▁	▁	▁	▁	▁	▁	▃
Sıkıştırılmış hava (CAES)	▁	▁	▃	▃	▁	▁	▁	▁	▁	▁	▁	▃
Volan	▃	▃	▁	▁	▁	▁	▃	▃	▁	▁	▁	▃
Su takviyeli kurşun-asit (FLA)	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
VRLA	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
Lityum-iyon (NMC)	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
Lityum-iyon (NCA)	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
Lityum-iyon (LFP)	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
Lityum-iyon (LTO)	▃	▃	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃	▃
NaNiCl	▃	▃	▂	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▂	▃	▃
NaS	▃	▃	▂	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▂	▃	▃
VRFB	▂	▂	▃	▃	▃	▃	▂	▂	▃	▂	▃	▃
ZBFB	▂	▂	▂	▂	▃	▃	▂	▂	▃	▂	▃	▃

Kaynak: IRENA (2017)

Lityum-iyon batarya teknolojileri elektrikli araçlar başta olmak üzere, elektrikli bisikletler, cep telefonları, dizüstü bilgisayarları, dijital kameralar, elektrikli aletler, endüstriyel uygulamalar, elektrikli güç aktarıcıları ve enerji sistemi uygulamalarında büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir. Kurşun-asit bataryalar, otomobillerde marş aküleri de dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır. Kesintisiz güç kaynağı sistemlerinde, elektrikli bisikletlerde, forkliftlerde, golf arabalarında, kırsal alanlardaki iletişim kuleleri gibi şebeke dışı uygulamalarda ve elektrik şebekesinde kullanılması bunlara örnek olarak verilebilir. Akışkan batarya sistemleri, genellikle büyük sabit endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle Vanadyum Redoks Akışkan Bataryaların (VRFB) günümüzde esnek tasarım, yüksek verimlilik, daha iyi güvenlik standartları ve uzun yaşam döngüsü nedeniyle özellikle büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. VRFB, diğer redoks akışkan sistemlere kıyasla hücre kısmında yüksek voltaja sahiptir. Bu sebeple, rüzgar ve güneş enerji santrallerinin şebeke entegrasyonunu kolaylaştırmak için lityum-iyon ve kurşun-asit batarya depolama teknolojilerine kıyasla daha ideal bir seçenek olabilirler. Yüksek sıcaklı bataryalar ise, genellikle yenilenebilir enerji üretimini dengelemek ve yan hizmetler sağlamak için kullanılırlar. ZEBRA batarya olarak da bilinen Na-$NiCl_2$, NaS'den daha güvenlidir ve şebeke depolama uygulamalarının yanı sıra, elektrikli ve hibrit araçlar için uygun olabilirler.

Günümüzde pompaj depolamalı hidroelektrik enerji santralleri, enerji depolama sistemleri içinde en büyük kurulu güç kapasitesine sahip olsalar da kurulum maliyetleri açısından olgunluk seviyesine ulaşmış bir teknolojidir. Başka bir değişle, toplam yatırım maliyetinde iyileştirme ve düşürme fırsatları çok fazla değildir. Diğer taraftan, batarya enerji depolama sistemleri için durum tam tersidir. Lityum-iyon bataryaların maliyeti, 2010 ve 2016 yılları arasında elektrikli araç uygulamalarında %73 oranında düşmüştür. Sabit uygulamalar için kullanılan lityum-iyon bataryalar, daha pahalı batarya yönetim sistemleri gerektiren zorlu şarj/deşarj döngüleri nedeniyle elektrikli araçlarda kullanılanlardan daha yüksek bir montaj maliyetine sahiptir. Bununla birlikte, Almanya'da küçük ölçekli lityum-iyon batarya sistemlerinin toplam kurulum maliyetlerinin 2014 ile 2017 arasında %60 oranında azaldığını gözlemlenmiştir. Elektrikli araçlar için kullanılan lityum-iyon batarya sistemlerinin üretim ölçeğindeki büyümesinden faydalanılarak, sabit uygulamalar için kullanılan batarya sistem maliyetlerinin 2030 yılına kadar %54-61 oranında düşebileceği öngörülmektedir. Toplam kurulum maliyetinin, batarya teknolojisine bağlı olarak kilovatsaat başına 145 ile 480 ABD doları arasında bir değere geleceği tahmin edilmektedir (Şekil 7).

Şekil 7: *Batarya enerji depolama sistemlerinde yatırım maliyetlerinin düşme öngörüsü, 2016-2030*



Kaynak: IRENA (2017)

Gelecek nesil batarya sistemleri maliyet, performans ve kalite üçgeninde değerlendirilecektir. Geliştirilecek yeni nesil malzemelerin yanı sıra hem elektrot hem de hücrelerin modüllerin ve paketlerin üretim ve montaj teknikleri, üretim hattı başına verim dikkate alınarak güncellenmelidir. Performans ve kaliteden ödün vermeden, üretim tekniklerinden kaynaklı maliyetler göz önüne alındığında daha büyük boyutlarda elektrotların kaplanabilmesi; kaplanan elektrotların kuruma sürelerinin daha etkin yöntemler kullanılarak kısaltılması, elektrot-separatör sarma işleminin daha hızlı ve tekrar düzeltme gerektirmeyecek hassasiyette yapılması gibi yenilikçi üretim teknikleri önerilmektedir.

Bataryaların geliştirilmesi ve üretilmesinde eko-tasarım uygulamalarının gelişmesi; geri dönüşümü kolaylaştırarak, hammaddelerin geri kazanımını ve değer zincirine yeniden dahil edilmesini sağlayacaktır. Bataryalar için (özellikle otomotiv sektöründe) ikinci-hayat uygulamalarını mümkün kılacak teknolojik çözümler geliştirilmelidir. Batarya güvenliğini, dayanıklılığını ve ömrünü artırmayı amaçlayan batarya yönetim sistemleri ve elektrik mimarisinin geliştirilmesi, pazar için önemlidir. Ek olarak, bataryaların daha iyi anlaşılması, bireysel malzemelerden, bileşenlere ve sistemlere giden yolda çok ölçekli ve fiziksel modelleme yoluyla sağlanmalıdır. Batarya performansı ve güvenliği için standartların geliştirilmesi ve uygulanması, daha geniş kapsamlı kabul görmesini büyük ölçüde hızlandırır.

2. Kurşun-Asit Batarya

- Mevcut durumda kurşun-asit bataryalar, otomobillerde marş aküleri de dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır. Kesintisiz güç kaynağı sistemlerinde, forkliftlerde, golf arabalarında ve kırsal alanlardaki iletişim kuleleri gibi şebeke dışı uygulamalarda kullanılması bunlara örnek olarak verilebilir.

- Kurşun-asit batarya teknolojileri küresel bazda en önemli ve en büyük piyasaya sahip olma özelliğini günümüze kadar korumuşlardır. Fakat diğer batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler (özellikle lityum-iyon) nedeniyle, kurşun-asit batarya piyasası büyüme hızının önümüzdeki yıllarda yavaşlama sürecine girebileceği söylenebilir.

- Kurşun-asit batarya teknolojilerinin üretim süreçlerinde beklenen gelişmeler, teknolojinin sabit uygulamalarda hâlâ rekabetçi olabilecek maliyetlere ulaşmasını sağlayabilir. Kurşun-asit batarya sistemlerinin enerji kurulum maliyetleri, 2016 yılı verilerine göre, 105 ila 475 ABD doları/kWh arasında değişmektedir. Bu maliyetlerin 2030 yılına doğru, yarı yarıya düşmesi beklenmektedir.

- Basit yassı plaka tasarımları (otomotiv sektörü) düşük fiyatlara sahiptir ancak kısa ömürlüdür ve sabit uygulamalarda nispeten düşük performans gösterir. Buna karşılık derin deşarjlı boru şeklindeki plaka tasarımlarının kullanım ömrü daha uzun olmakla birlikte, düşük üretim hacimleri, standardizasyon eksikliği ve daha çok malzeme kullanımı nedeniyle pahalıdır.

- Gelişmiş kurşun-asit batarya, bir süper kapasitör ile konvansiyonel kurşun-asit bataryanın özelliklerini, batarya hücresindeki malzemeler düzeyinde ekstra elektronik kontrol sistemlerine ve kablolamaya ihtiyaç duymadan birleştiren bir hibrit enerji depolama sistemidir. Gelişmiş bir kurşun-asit batarya, geleneksel kurşun-asit bataryaların güvenlik, geri dönüşüm ve ekonomik yönlerine sahipken, yüksek şarj/deşarj oranlarında kısmi şarj seviyelerinde çalışabilir.

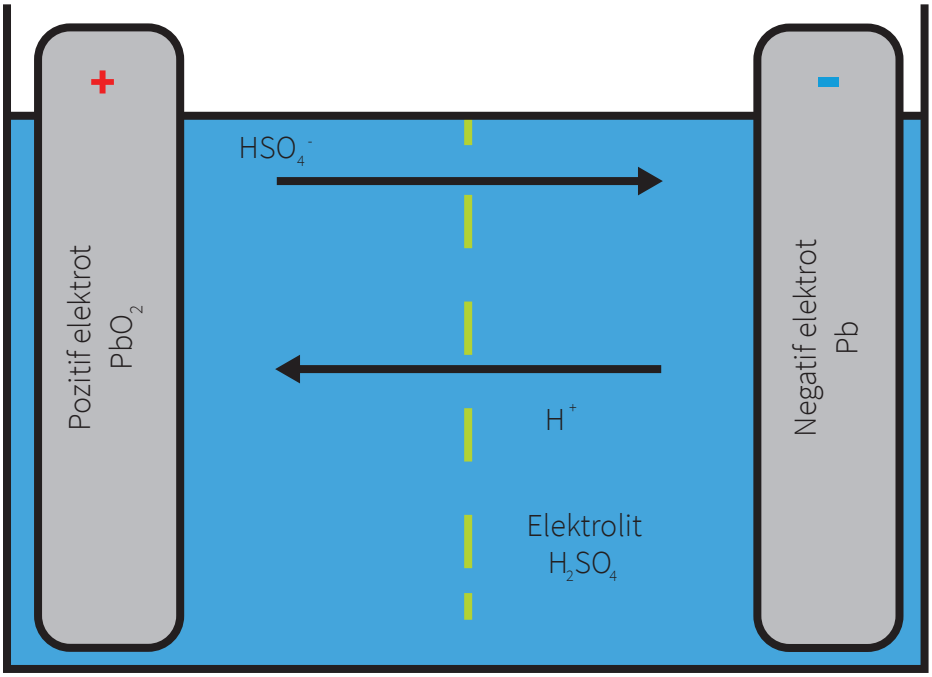
2.1 Mevcut Teknoloji

Kurşun-asit bataryaların kullanımı 150 yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Kurulum sayısına ve toplam kurulu kapasiteye bağlı olarak teknolojik açıdan en eski ve en yaygın kullanılan şarj edilebilir batarya teknolojisidir. Genellikle geniş bir uygulama yelpazesine ve iyi bir maliyet-performans dengesine sahiptir. Bununla birlikte nispeten çok düşük enerji/ağırlık ve düşük enerji/hacim oranlarına sahip olmalarına rağmen, yüksek akım sağlama kabiliyetleri nedeniyle hücrelerinin nispeten yüksek bir güç/ağırlık oranına sahip olduğu söylenebilir. Genel olarak derin deşarj durumlarına iyi cevap veremezler. Kurşun maddesi, bazı uygulamalar veya kullanım alanları için toksisitesinden dolayı uygun olmayabilir. Yine de kurşun-asit bataryalar nispeten kolay geri dönüştürülür ve geniş bir pazara sahiptir. Batı ülkelerinde geri dönüşümü %100'e yaklaşırken, bu oran tüm dünya genelinde de oldukça yüksektir. Bu bataryalar, tüm dünyada üretilen kurşunun %85'ini kullanırken, bunun içinde geri dönüştürülmüş kurşunun oranı %60'ı bulmaktadır.

Nominal hücre voltaj 2,05 V olan kurşun-asit bataryaların iki ana tasarım şekli mevcuttur, bunlar "Su takviyeli" (genellikle "havalandırmalı" olarak da adlandırılır) ve "Supap ayarlı" (genellikle "supaplı" olarak da adlandırılır) olarak ayrılır. Mevcut

durumda kurşun-asit bataryalar, otomobillerde marş aküleri de dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır. Kesintisiz güç kaynağı sistemlerinde, forkliftlerde, golf arabalarında ve kırsal alanlardaki iletişim kuleleri gibi şebeke dışı uygulamalarda kullanılması bunlara örnek olarak verilebilir. Bu bataryalar, yenilenebilir enerji kapasite gelişimiyle birlikte; özellikle şebeke dışı, ev tipi güneş fotovoltaik sistemlerinde (örneğin, çeşitli programlar altında Bangladeş ve Fas'ta) yaygın olarak uygulanmıştır.

Şekil 8: *Kurşun-asit bataryanın çalışma şekli*



Kaynak: IRENA (2017); based on ISEA (2012)

Su takviyeli kurşun-asit bataryalar (FLA), elektrolit olarak sıvı sülfürik-asit çözeltisi kullanır (Şekil 8). Bir elektrolit olarak sulu sülfürik-asit ($H2S0_4$) çözeltisine (genellikle ağırlıkça %37 asit) batırılmış ve istiflenmiş hücrelerden oluşur. Her bir hücre, tam şarjlı haldeyken kurşun dioksit (PbO_2)'den yapılmış pozitif bir elektrot ve yüksek yüzey alanlı gözenekli bir yapıda (sünger kurşun) metalik kurşundan (Pb) oluşan negatif bir elektrota sahiptir. Elektrotları birbirlerinden izole etmek için polietilen bir ayırıcı kullanılır, bu ayırıcıların asidin taşınmasını sağlaması için yeterince gözenekli olması gerekir. Gözenekli polietilen ayırıcılar, elektrotlar arasında iyon geçişine izin verirken kütle geçişlerine izin vermez. Deşarj durumunda hem pozitif hem negatif elektrot $PbS0_4$'a dönüşür.

Su takviyeli kurşun-asit bataryanın en önemli özelliği düşük maliyetli oluşu ve teknolojisinin gelmiş olduğu olgunluk seviyesidir. Bununla birlikte şebeke hizmetleri sağlamada ve bunları yönetmede nispeten daha az uygulanabilirliği vardır. Düşük çevrim ömrü ve nispeten düşük şarj/deşarj verimliliği gibi zayıflıklarına rağmen, kullanım ömrü çevrim maliyetleri (hücre değişimi ve enerji kaybı dahil olmak üzere) piyasadaki en ekonomik çözümlerden olduğu için büyük bir pazara sahiptir.

Şarj sırasında meydana gelen gazlanma sebebiyle, su takviyeli kurşun-asit batarya sürekli olarak su kaybeder ve tasarım buna uygunsa (tam kapalı değilse) kullanım ömrü içinde su ilavesi (bakım) gerektirir. Bataryanın yetersiz elektrolit seviyelerinde kullanılması kalıcı hasara neden olabilir. Sülfürik-asit, kurşun-asit bataryalarda

reaksiyonun ana bileşenlerindedir ve aktif madde olarak kullanılır. Deşarj sürecinde elektrotlar, sülfürik asitteki sülfat anyonlarını kullanarak kurşun-sülfata dönüşür. Bu süreçte sülfürik asit reaksiyon bileşeni olarak harcanır ve bu nedenle elektrolit yoğunluğu azalır. Şarj sürecinde ise elektrotlarda birikmiş kurşun sülfat çözünür. Kurşunlar pozitif elektrotta PbO_2'ye, negatif elektrotta Pb'ye dönüşürken; serbest kalan sülfatlar tekrar elektrolite katılır ve sülfürik asit yoğunluğu tekrar yükselir. Kullanım sürecinde negatif ve pozitif üzerinde reaksiyon gereği biriken kurşun-sülfat çok büyük kristaller oluşturabilir ve tabakalaşmaya başlar. Şarj sürecinde kurşun sülfat kristallerinin kırılmasını zorlaştırarak bataryayı çalışmaz hale getirebilen bu duruma sülfatlaşma denir. Sülfatlaşma, iç direnç artışı ve düşük performansa yol açar. Ayrıca şarj/deşarj sürecinde sülfürik asit harcanıp tekrar oluşurken zamanla farklı yoğunlukta tabakalara ayrışabilir. Bu durumda yoğun asit batarya diplerinde, daha az yoğunluktaki asit ise bataryanın üst bölümlerinde toplanır. Buna asit tabakalaşması denir ve bataryanın erken ölümüne neden olur. Tabakalaşmanın önüne geçmek için batarya içinde asit sirkülasyonu yapmak gerekir. Bu amaçla firmalar birçok farklı yöntem kullanmaktadır.

Supap ayarlı kurşun-asit bataryalar (VRLA), geleneksel su takviyeli bataryaların geliştirilmesindeki ilerlemeyi güzel bir şekilde yansıtır. Elektrolit kaybını önlemek için tasarlanan supap, hücrenin maksimum basıncını düzenleyerek basınç 100 milibara (uygulamaya ve tasarıma bağlı olarak supap açma basınçları değişebilir) ulaştığında havalandırma sağlar. Çalışma sürecinde suyun oksijen ve hidrojene ayrışmasıyla oluşan gazlar, belli bir basınca kadar içeride tutulmaya zorlanarak tekrar bir araya gelmeye ve su oluşturmaya yönlendirilir. Buna oksijen rekombinasyonu denir ve kullanım ömrü içinde bataryanın su kaybını azaltarak ömrünü uzatır. Supap ayarlı kurşun-asit batarya, genellikle su takviyeli kurşun asit bataryaya göre daha pahalıdır. Ancak performansı ve kullanım ömrü daha uzundur.

Kurşun-asit bataryalar kullanım alanlarına göre de üç kategoriye ayrılabilirler: starter ya da SLI (starting-lighting-ignition) (otomobil marş aküleri), stasyoner (sabit tesis) ve traksiyoner (elektrikli iş makineleri gibi) bataryalar. Starter bataryalar ile diğerleri arasındaki en temel fark, ilkinin anlık yüksek güç verebilecek şekilde tasarlanmış olup derin-deşarjın mümkün olmamasıdır. İç direnci çok düşük olan bu bataryalar çok sayıda ince plakadan oluşmaktadır. Forklift, tekerlekli sandalye ve golf arabaları gibi araçlara kesintisiz güç sağlayan ve derin-deşarj bataryaları olarak da bilinen traksiyoner tür ise kalın plakalar kullanılarak yüksek sayıda şarj/deşarj döngüsüne ve derin deşarja dayanıklı hale getirilmişlerdir.

Otomobillerde marş aküsü (starter) olarak uzun yıllardır egemenliğini koruyan kurşun-asit bataryalar ile lityum-iyon teknolojisinde yaşanan son yıllardaki gelişmeler göz önüne alındığında, bu teknolojiler arasında önemli bir rekabetin oluşacağı söylenebilir. Ancak kurşun-asit bataryalar, uzun çevrim ömrü ve yüksek enerji yoğunluğu ile öne çıkan lityum-iyon bataryalara karşı, güvenlik ve fiyat avantajını halen korumaktadır. Her ne kadar kurşun, sahip olduğu toksisite nedeniyle vazgeçilebilir bir batarya teknolojisi olsa da; diğer batarya sistemlerinin henüz erişemediği çok yüksek geri dönüştürülme oranı ile otomobil akülerinde tercih edilen teknoloji olmayı sürdürmektedir.

Şekil 9: *Otomobil marş aküsü olarak kurşun-asit ve lityum-iyon bataryaların karşılaştırılması*

Kaynak: Johnson Controls (2018)

2.2 Piyasa Durumu

Batarya piyasası, bataryaların kullanıldığı ikincil ürünlerin pazardaki durumlarına doğrudan bağlıdır. Ürün fonksiyonu seviyesindeki değişiklikler, yani ürünlerin kullanımındaki yeni gelişmeler nedeniyle piyasa değişiklikleri batarya piyasasındaki ve dolayısıyla batarya teknolojisindeki değişikliklerin temel nedenlerini oluşturmaktadır. Ayrıca yeni batarya teknolojilerinin kullanımı, yeni ürünlerin oluşmasını ve piyasada bu ürünlerin ön plana çıkmasını sağlayabilir. Elektrikli araçlar için bataryaların kullanımı çok hızlı artış gösterirken, taşınabilir elektronik cihazlar için batarya piyasaları olgunluk seviyesine ulaşmıştır. Genel olarak batarya teknolojilerindeki değişikliklerin belirleyici faktörü, belirli bir elektrokimyasal sisteme sahip bataryaların bileşimindeki değişikliklerden ziyade, piyasanın bir elektrokimyasal sistemden diğerine geçmeyi tercih etmesidir.

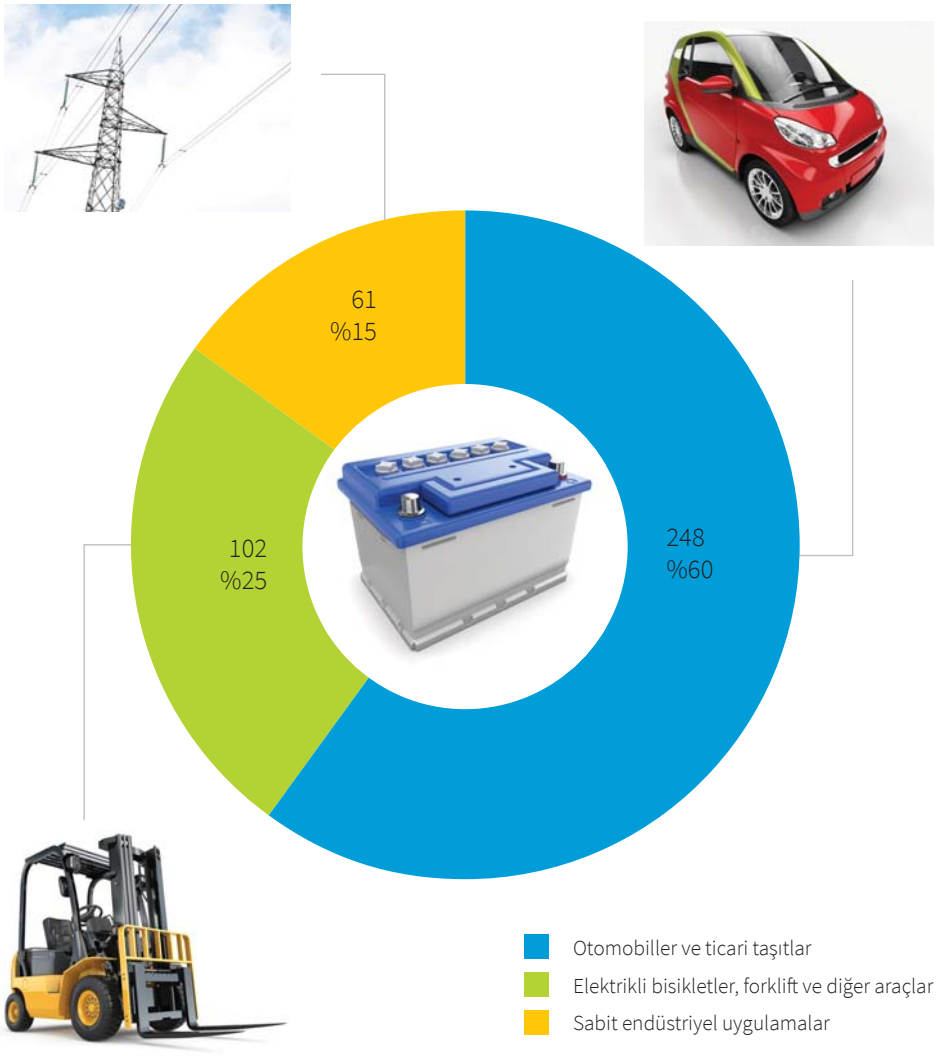
25 yıl kadar geriye gittiğimizde lityum-iyon bataryaların yükselişinden önce kurşun-asit bataryalar, şarj edilebilir batarya teknolojilerinin baskın şeklini oluşturmuştur. Kurşun-asitli bataryalar çoğunlukla otomobil pazarının büyük bir bölümünü (örneğin ABD'de %99'u) oluşturan elektrikli olmayan geleneksel otomobillerin aküleri için kullanılmaktadırlar ve yaklaşık 25 milyar ABD doları gibi bir ciroya sahiptirler. Ayrıca sabit endüstriyel kullanım alanlarının yanında, hastane ekipmanları için de farklı kullanım seçenekleri sunarlar. 2015 yılı itibariyle, sabit endüstriyel uygulamalar yaklaşık 10 milyar ABD doları ciro ile kurşun-asit bataryalar için bir diğer büyük pazarı

oluşturmaktadır. “Global Market Insights” tarafından yapılan son araştırmada, küresel kurşun-asit batarya pazar hacminin 2024 yılı itibariyle 75 milyar ABD dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Kurşun-asit bataryalar için başlıca pazarlar üç kısımda sınıflandırılabilir (Şekil 10).

- Otomobiller ve ticari taşıtlar (% 60)
- Elektrikli bisikletler, forklift ve diğer araçlar (% 25)
- UPS, telekom sektörü uygulamaları da dahil olmak üzere, sabit endüstriyel kullanım alanları ve elektrik şebekesi alternatif enerji depolanması (%15)

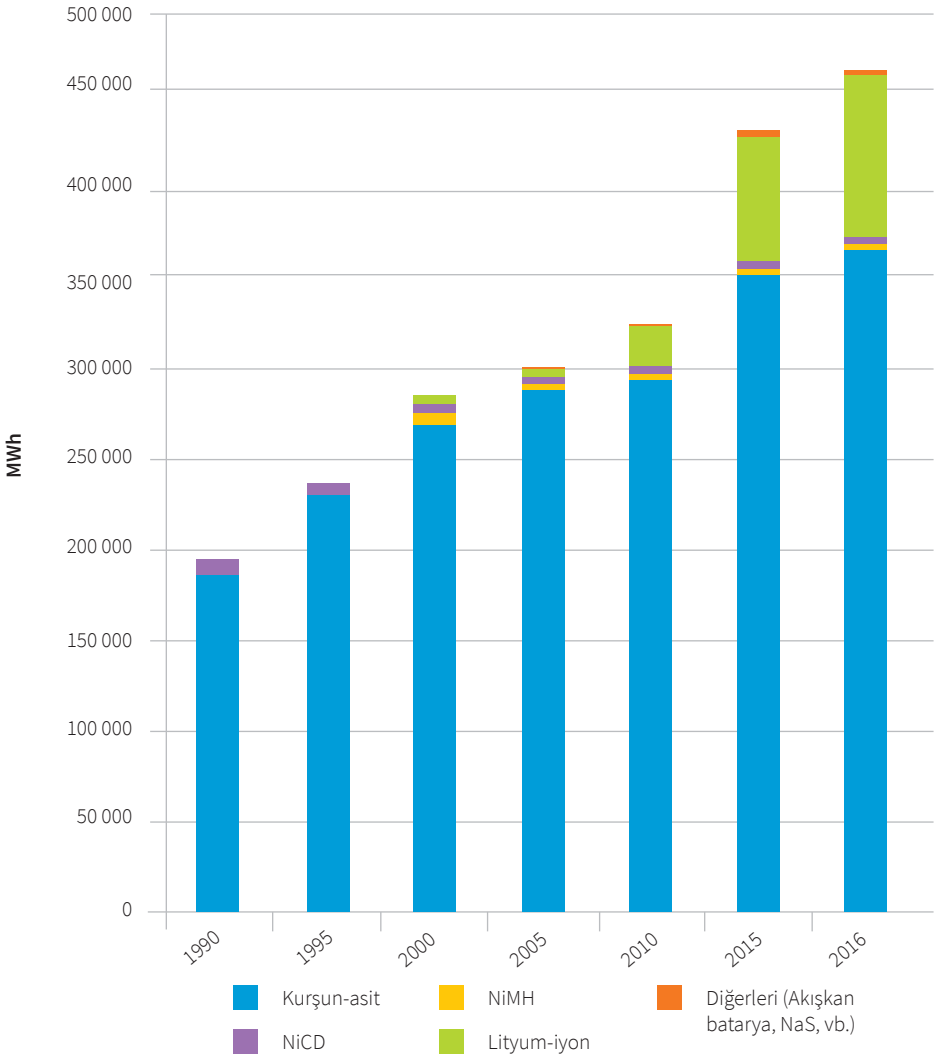
Şekil 10: *2015 yılı küresel kurşun-asit bataryaların tahmini satış dağılımı (Milyon adet)*



Kaynak: ITRI (2017)

Kurşun-asit batarya teknolojileri küresel ölçekte en önemli ve en büyük piyasaya sahip olma özelliğini günümüze kadar korumuşlardır. Fakat diğer batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler (özellikle lityum-iyon) nedeniyle, kurşun-asit batarya piyasası büyüme hızının önümüzdeki yıllarda yavaşlama sürecine girebileceği söylenebilir (Şekil 11).

Şekil 11: *Batarya teknolojilerinin pazar içindeki üretim payları (MWh)*



Kaynak: AVICENNE ENERGY (2017)

Vaka Analizi: Alaska, Amerika Birleşik Devletleri, ada/şebekeden bağımsız frekans tepkisi

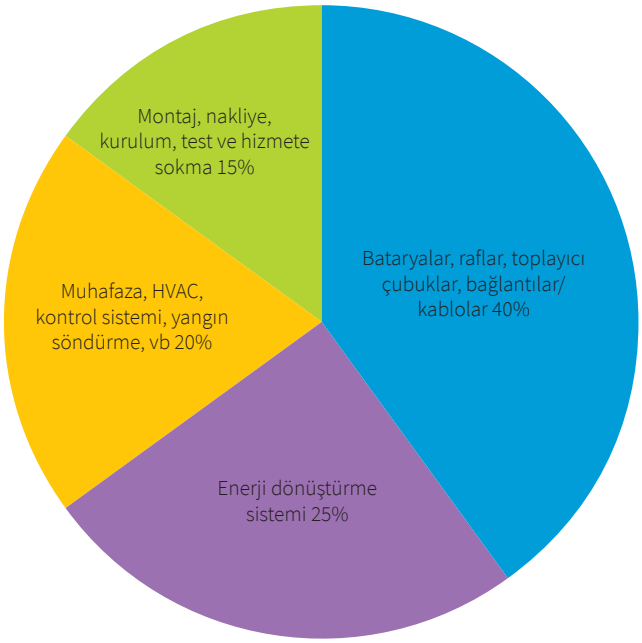
Alaska'da, Kodiak Elektrik Birliği (KEB) adlı yerel bir tesis, mevcut 4,5 MW'lık rüzgar kapasitesine ilave olarak 4,5 MW kapasite daha eklemek istemiştir. KEB sistemi yaklaşık 27 MW'lık bir puant yüke sahiptir. Sistemin güvende çalışması için geleneksel seçeneklerden biri olan dizel yakıtlı elektrik üretim tesisinin rezerv olarak çevrimiçi hale getirilmesi düşünülebilir. Bu durum, rüzgar enerji üretiminin kesilmesi ve ek dizel yakıt tüketilmesi anlamına gelecektir. Dolayısıyla tedarik edilen elektrik için maliyetlerin artmasına ek olarak, rüzgar enerji kaynağı entegrasyonuna ve hava kalitesine olumsuz etkileri olacaktır.

Bunun yerine, Xtreme Power tarafından sağlanan 3 MW/750kWh kapasiteli gelişmiş kurşun-asit batarya çözümü seçilmiştir. Ortalama deşarj derinliğinin %5 civarında olması beklenen sistem sık kullanılmaktadır (günde yaklaşık 285 kez). Konteynerin

içi 20-30°C derece sıcaklıkta tutulmalıdır. Operasyonun ilk altı ayında KEB, 560 bin ABD dolarına eşdeğer dizel üretim maliyetine katlanmak yerine, 8 milyon kWh üretim kapasiteli ilave rüzgar entegrasyonundan faydalanma şansı yakalamıştır.

Kurulum ve bakım gereksinimleri, kurulacak tesisin uzakta olmasından dolayı önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Sistem genelde sık aralıklarla deşarj olmasa da bazı dönemlerde önemli enerji gereksinimlerine ihtiyaç duymuştur. Kurşun-asit bataryanın performansı ve kullanım ömrü için en önemli çalışma koşulu olan sıcaklık, bir diğer belirleyici husus olmuştur.

Şekil 12: *Tahmini proje maliyet dağılımı*



Kaynak: IRENA (2015); based on Younicos, St. John. (2012)

Vaka Analizi: New Mexico, Amerika Birleşik Devletleri, güneş enerjisi düzleştirme ve enerji kaydırma

Ecoult şirketi tarafından sağlanan kurşun-asit batarya, PNM'nin sahip olduğu 500 kW kapasiteli güneş fotovoltaik için 500 kW düzleştirme kabiliyeti ve 250 kW/1MWh enerji kaydırma potansiyeli sunmaktadır. Sekiz adet batarya konteyneri kamyonlarla kurulum için sahaya gönderilmiştir.

Batarya sayesinde güneş fotovoltaik elektrik üretimi ve sistemde oluşan puant yüklerin düzleştirilmesi daha iyi kontrol altına alınırken, değişken üretim seviyelerinin düzleştirilmesi sağlanır. Böylece sisteme, kontrol edilebilir yenilenebilir enerji kaynağı sağlanmış olur. Daha iyi sistem performansı için kontrol algoritmalarının optimize edilmesi gerekebilir. Sistemin şebeke kararlılığına getirebileceği faydaları ölçmek için iyi bir fırsat sağlayabilir. Kurulum için en önemli gereklilik ise hem kısa hem de uzun şarj/deşarj ile güç ve kontrol bileşenlerini birleştirmektir.

Ecoult "UltraBattery" Enerji Kaynağının (UBER) 320/500 kW teknik özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tüm bloklar; batarya hücreleri, yönetim ve izleme, entegre sıcaklık yönetimi ve sisteme entegre olan diğer bileşenlerden oluşur. Farklı güç ve enerji çıkış seviyeleri için ölçeklendirilebilen sistem, nakliye konteynerleri içinde teslim edilmektedir. Örneğin, bir blok 3,5 saat boyunca 100 kW veya 1 saat boyunca 250 kW güç sağlayabilir.

Tablo 1: *Ecoult "UltraBattery" Enerji Kaynağı (UBER) 320/500 kW sisteminin teknik özellikleri bataryalar*

Yer	Değişimden önce mevcut olan toplam enerji	Kargo ağırlığı	Çalışma ortamı sıcaklığı	Boyutlar
160 hücre/konteyner	2 GWh[1]	1 konteyner = 50.000 lb (22.680 kg)	-25°C to 45°C	6,06 m L x 2,44 m W x 2,59 m H

Önerilen çalıştırma koşullarında. Her iki konteyneri da dikkate alır.
Kaynak: IRENA (2015); based on Ecoult (2013)

Vaka Analizi: Texas, Amerika Birleşik Devletleri, rüzgar enerjisi zaman kaydırma, düzleştirme ve frekans tepkisi

Duke Enerji, Xtreme Power tarafından temin edilen 36 MW/24 MWh kapasiteli gelişmiş kurşun-asit bataryayı, Batı Teksas'taki Notrees 153 MW rüzgar santrali ile birleştirmiştir. Toplam proje bütçesi 44 milyon ABD doları olmuştur. Projenin amacı, enerji ihtiyacının çok olmadığı durumlarda birçok amaç için kullanılmak üzere enerjinin depolanmasıdır. Bu depolanan enerji daha sonraki zamanlarda elektrik talebini karşılamak, rüzgar enerjisinden üretilen elektriğin depolanmasının değerini ölçebilmek ve Texas ERCOT piyasasında ticari uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bir başka fonksiyonu ise hızlı frekans tepkisi sağlamaktır.

Projenin ana hedefi, kısıtların azaltılmasıyla dağıtımın optimize edilmesi, enerji maliyetlerinin azaltılması, şebeke güvenilirliğinin artırılması, karbon emisyonlarının azaltılması, rüzgar kaynakları ve batarya depolama ile ilgili sinerjinin değerlendirilmesi gibi uygulamaların gözlemlenmesi ve analiz edilmesidir.

Proje ile ilgili teknik bilgi sınırlı olmakla birlikte, ilgili bilgilerin bazıları Tablo 2'de aşağıda sunulmuştur.

Tablo 2: *Rüzgar enerjisi ve batarya depolama projesi özellikleri*

Hücre sayısı	Isı yönetimi	Gerekli alan/kapasite	Maksimum deşarj süresi
Trafo merkezinde ve dağıtım tarafına bağlı	Soğutma pompası kızakları, hava / su ısı eşanjörleri	Batarya modülleri yaklaşık 6000 m^2 alana inşa edilmiş	15 dakika

Kaynak: IRENA (2015); based on Gates. J. (2011)

2.3 Maliyet ve Yatırımlar

Kurşun-asit batarya olgun bir teknoloji olmasına rağmen diğer batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler rekabeti artırmakta ve kurşun-asit batarya üreticilerinin rekabetçi olarak ayakta kalabilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple üreticiler performans iyileştirmeleri uygulayarak maliyetleri daha da azaltmak için çaba göstermektedirler.

Otomotiv ve elektrikli bisiklet uygulamalarının aksine, sabit endüstriyel uygulamalarda kullanılan kurşun-asit batarya piyasasının çok büyük olmaması, bu bataryaların üretiminde önemli maliyet düşüşleri sağlayabilecek tam otomatik üretim tesislerin kurulmasına fırsat vermemiştir. Üretim hacminin artırılması, batarya hücresi ve modül fiyatlarını düşürme potansiyeline sahiptir. Fakat üreticilerin büyük ölçekli üretim yatırımı ve bu konuda araştırma yapma isteklilikleri piyasa şartları düşünüldüğünde netlik kazanmış bir konu değildir. Özellikle de gelişmekte olan lityum-iyon, akışkan ve yüksek sıcaklıklı batarya teknolojilerine yönelik çalışmaların arttığı bir ortamda, üretim ve yatırımların odak noktası değişebilmektedir.

Kurşun-asit bataryalar, volanlar veya lityum-iyon bataryalar gibi yüksek enerji depolama çözümleri sağlayabilen teknolojiler ile birleşerek, hibrit sistemlerde giderek daha fazla kullanılmaktadırlar. Bu sayede, yüksek enerji depolama çözümlerinin düşük maliyetli olarak gerçekleşmesini sağlarlar. Fakat daha düşük performans alınması kaçınılmaz olur. Bu tür hibrit depolama sistemleri, farklı hizmetleri sağlamak için düşük maliyetli çözümler sağlama potansiyeline sahiptir ve tek bir sistemden ya da tek bir teknolojiden elde edilemeyecek başarılara ulaşmak için kurşun-asit batarya ve tamamlayıcı teknolojilerin optimizasyonuna olanak sağlarlar. Sonuç olarak bu hibrit sistemler, daha düşük bir depolama maliyeti elde ederek birçok amacı yerine getirebilirler.

Bazı çalışmalarda yüksek yüzeyli karbon tabakaları bir kurşun-asit batarya elektrotlarının birine ya da ikisine katılmaktadır. Karbon yapısının, özellikle kısmi şarj durumundaki çalışma sırasında, sülfatlaşmasının önlenmesi, performansını ve ömrünü artıracaktır. Batarya, sülfatlaşma tehlikesi olmadan pozitif plakanın korozyonunu azaltan ve elektroliz nedeniyle su kaybını önleyen daha düşük ortalama şarj durumunda çalıştırılabilecektir.

Geleneksel kurşun-asit bataryanın performansı, bir bakır gerdirme ağının negatif elektrota entegre edilmesiyle artırılabilir. Bakırın yüksek iletkenliği daha düşük bir iç direnç sağlar ve batarya şarj/deşarj sırasında performansını önemli ölçüde geliştirir. Orijinal olarak denizaltı batarya sistemleri için üretilmiş ve uygulanmış bu teknoloji, sabit uygulamalar için de uyarlanmıştır. Bu gelişmeler ve sonuçlarının özeti Tablo 3'de sunulmaktadır.

Tablo 3: *Kurşun-asit bataryalar için maliyet araştırma ve geliştirme çalışmaları*

AR-GE	Alt teknoloji için geçerliliği	Teknoloji değişimi	Üretim maliyetinde azalma	Performans artırma
Üretim otomasyonu	Hepsi	Hayır	Evet. Yüksek otomasyon derecesi düşük üretim maliyetlerine yol açar	Hayır
Hibrit sistemler	Hepsi	Hayır	Hayır	Evet. Mevcut teknolojiyi daha verimli kullanmak
Karbon elektrotlar	Hepsi	Hayır	Hayır	Evet
Streç bakır metal	Hepsi	Hayır	Hayır	Evet

Kaynak: IRENA (2017)

Kurşun-asit batarya teknolojilerinin üretim süreçlerinde beklenen gelişmeler, teknolojinin sabit uygulamalarda hâlâ rekabetçi olabilecek maliyetlere ulaşmasını sağlayabilir. Kurşun-asit batarya sistemlerinin enerji kurulum maliyetleri, 2016 yılı verilerine göre, 105 ila 475 ABD doları/kWh arasında değişmektedir. Bu maliyetlerin 2030 yılına doğru, yarı yarıya düşmesi beklenmektedir (Şekil 13). SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin "Sistem esnekliğini artırmak için gereken seçeneklerin maliyet ve faydaları" çalışmasında, bazı kurşun-asit teknolojilerinin kWh başına maliyetlerine ilaveten, 2020 yılında Türkiye iletim şebekesi seviyesinde 600 MW'lık enerji depolama tesisi kurulması durumunda toplam yatırım maliyetlerinin tahmini olarak ne olacağı

gösterilmiştir (Tablo 4). Bu tahmini yatırım maliyeti değerleri hesaplanırken, 300 MW'lık kısmının sekonder frekans kontrolü, diğer 300 MW'lık kısmının ise enerji kaydırma işlemi için kullanılacağı öngörülmüştür.

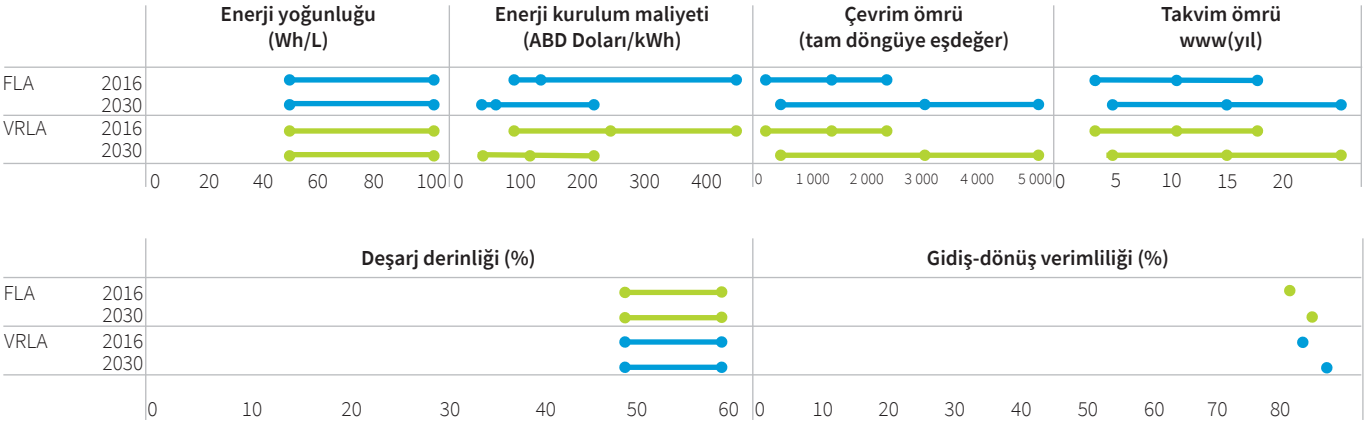
Tablo 4: *Kurşun-asit batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri*

Depolama Teknolojisi	Enerji kurulum maliyeti (ABD doları/kWh)	600 MW'lık batarya depolama tesis toplam yatırım maliyeti (Milyon ABD doları)
FLA	120	431,28
VRLA	215	716,28

Kaynak: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

Batarya enerji depolama sistem maliyetleri son yıllarda geniş çapta bir düşüş eğilimi göstermektedir. Buna rağmen batarya malzemelerinin ayrıntılı maliyet analizleri, gizlilik kısıtlamaları nedeniyle elde edilmesi zor olan verilerdir. Daha ayrıntılı bilgi edinilmesinin önündeki başka bir engel ise, çeşitli uygulamalara bağlı olarak kullanılan sistem tasarımı veya teknolojilerdeki farklılıkların ya da sistem boyutlandırma ve maliyet sınırlamalarının değişkenlik göstermesidir.

Şekil 13: *Kurşun-asit batarya enerji sistemi özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması*



Kaynak: IRENA (2017)

Batarya kurulumu genel olarak, batarya hücreleri (hücre tabanlı batarya sistemleri için), güç dönüşüm sistemi, modül içindeki malzemeler, batarya yönetim sistemi gibi çeşitli bileşenlerden oluşur. Bunlara ilaveten, işçilik, bakım ve diğer değişken maliyetler dikkate alınmalıdır. Bireysel hücre maliyetleri (hücre bazlı bataryalar için) karşılaştırmak için iyi bir ekonomik gösterge olsalar da, ilgili tüm maliyetlerin yalnızca %20'sini temsil etmektedir. Toplam sistem ve değişken maliyetler, lokasyona, uygulamaya, gereken ek ekipmana, satıcılara, ticari kullanılabilirliğe, sistemin boyutuna ve diğer değişkenlere bağlıdır. Dahası, komple bir sistemin maliyeti seviyelendirilmiş enerji maliyeti olan LCOE (Levelized Cost Of Energy)'nin hesaplanması ile temsil edilebilir. LCOE, kurulum ile ilgili tüm yatırım, değişken ve kullanım ömrü maliyetlerinin, sistemin ömrü boyunca üreteceği elektrik miktarına bölünmesiyle hesaplanır. Hesaplama, sistemin ömrü boyunca uygun bir iskonto oranıyla, paranın zaman değerini dikkate alır. LCOE sonuçları, sunulan hizmetin değerini hesaba katmadığı için dikkatli değerlendirilmelidir. Örneğin, çok kullanılmayan bir depolama tesisi çok yüksek LCOE'ye sahip olmasına rağmen, enerji sistemine sağladığı depolama hizmeti sayesinde ekonomik olabilir.

2.4 Bariyerler

Kurşun-asit batarya teknolojileri, taşıtlarda ve yüksek yük akım değerleri gerektiren diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Başlıca faydaları düşük sermaye maliyetleri, teknolojik olgunluk ve verimli geri dönüşümdür.

Tablo 5: *Su takviyeli kurşun-asit batarya (FLA) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Diğer şarj edilebilir batarya teknolojilerine kıyasla düşük maliyet	Düşük çevrim süreleri (2.500'e kadar)
Yüksek dayanıklılık ve gidiş dönüş verimliliği (%70-90)	Düşük enerji yoğunluğu (50 - 100 Wh/L)
Geniş üretim ve operasyonel deneyim	Düşük veya yüksek ortam sıcaklıklarında zayıf performans (termal yönetim sistemine ihtiyaç)
Büyük ölçekli depolama sistemlerinde uygulanabilir olma	Periyodik su değişim gerekliliği
İyi sıcaklık performansı	Deşarj durumunda uzun süre tutulursa sülfatlaşma
Kolay şarj durumu göstergesi	Asimetrik şarj ve deşarj yetenekleri
Geri dönüşüm ve yüksek geri kazanım oranı	

Basit yassı plaka tasarımları (otomotiv sektörü) düşük fiyatlara sahiptir ancak kısa ömürlüdür ve sabit uygulamalarda nispeten düşük performans gösterir. Buna karşılık derin deşarjlı boru şeklindeki plaka tasarımlarının kullanım ömrü daha uzun olmakla birlikte; düşük üretim hacimleri, standardizasyon eksikliği ve daha çok malzeme kullanımı nedeniyle pahalıdır. Araçlarda kullanılan kurşun-asit akülerin, ilerleyen zamanlarda kullanılmayacağı, hatta bu doğrultuda regülasyonların oluşturulacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 6: *Supap ayarlı kurşun-asit batarya (VRLA) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Çok az bakım gerektirmesi ve su ilavesi gerekmemesi	Su takviyeli kurşun-asit sistemlere göre yüksek sıcaklık ortamlarına daha duyarlı olması
Su takviyeli olmayan elektrolit tasarımı, özel havalandırmaya ihtiyaç duyulmayan alanlarda çalışmaya izin vermesi	Deşarj durumunda saklanmama gerekliliği, deşarj durumda bırakılırsa sülfatlaşma (büyük sülfatlardan ötürü plak sertleşmesi) olur.
Yerleşik geri dönüşüm ve yüksek malzeme geri kazanım oranları	Düşük veya yüksek ortam sıcaklıklarında zayıf performans (termal yönetim sistemine ihtiyaç)
	Aşırı ve düşük şarj durumlarına karşı daha hassas olması

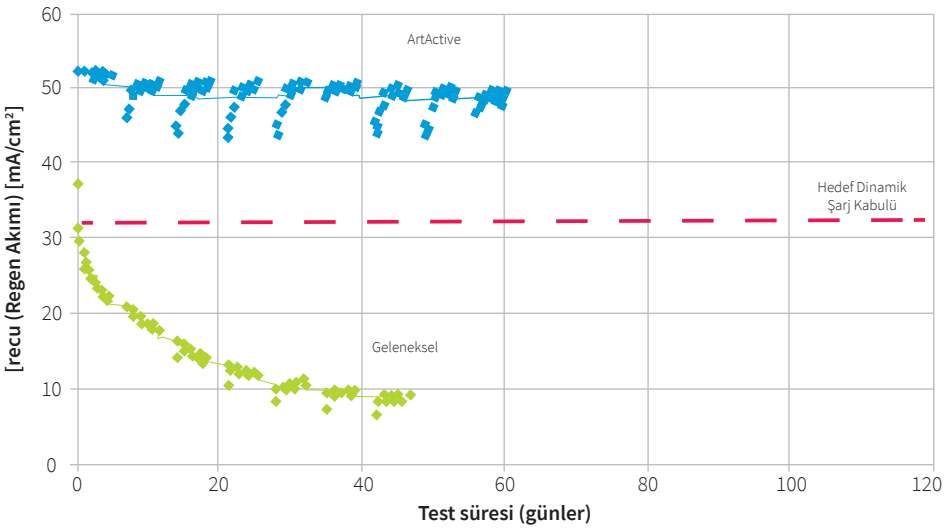
2.5 Yenilikçilik için fırsatlar

Kurşun-asit bataryalar, diğer batarya teknolojilerine kıyasla maliyet avantajları göz önüne alındığında, geniş ölçüde benimsenen olgun bir teknolojidir. Çoğunlukla geleneksel otomotiv sektöründe kullanılmasının yanında, enerji sektöründe de yaygın olarak tercih edilmektedir. Uzun yıllardır kullanılmakta olan bu geleneksel batarya teknolojileri gelişmekte olan ülke ve pazarlarda hâlâ yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kısa çevrim ömrü, yavaş şarj ve bakım gereksinimleri gibi teknik dezavantajları mevcuttur.

Yenilikçi gelişmiş kurşun-asit seçenekleri, bir veya iki elektrotta ya da akım toplayıcı olarak, karbon kullanımını içerir. Bunlar ArcActive (Yeni Zellanda), Ecoult/East Penn (Avusturalya), Axion Power International (ABD) ve Xtreme Power (ABD) (EPRI ve DOE, 2013) gibi kuruluşlar tarafından geliştirilmektedir. Yüksek oranda karbon katkılı ve batarya ızgaralarında kurşun yerine karbon türevleri kullanılan teknolojiler, deneysel olarak yüksek değerler verseler de; zorlanmış koşul testlerinde başarılı olamamaktadır. Özellikle 60˚C ve 75˚C KLT (Key Life Test) testlerinde beklenen çevrim ömrünü karşılayamamakta ve kabul sınırının çok üstünde su kaybetmektedir. Ayrıca önerilen yeni sistem, seri üretimde kolaylıkla üretilememektedir. Bu nedenle mevcut bataryaların negatif aktif maddesine karbon eklenerek şarj kabulünü artırmak, üreticilerce genel geçer yöntem olarak benimsenmiştir.

ArcActive'in umut vadeden konseptinde iletken karbon fiber keçe, negatif elektrottaki aktif malzeme için yapısal ve elektriksel bir iskele olarak kullanılmaktadır. Birim kütlede yüksek miktarda karbon kullanımını sağlayan ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip karbon fiber yapısı sülfatlaşmayı engellemesinin yanı sıra, her döngüde kurşun ve kurşun sülfat yapıların rejenerasyonunu da sağlar. Böylece "Dinamik Şarj Kabulü" (Dynamic Charge Acceptance, DCA) performansı artırılmış bataryalar sunar. Ancak burada kritik olan tek başına şarj kabulü değil, bu şarj kabulüne ulaşıldığında kaybedilecek su miktarıdır. Dinamik Şarj Kabulü test sonuçlarının, bu testlerde kaybedilen su miktarı (g/Ah) ile birlikte verilmesi gerekir. Karbon fiber keçe, ızgara olarak kullanıldığında; elektronların dış devreye akması için ayrıca bir metal ile kaynak yapılması gereksinimi vardır. Bu kaynak, seri koşullarda kolaylıkla yapılabilecek bir kaynak değildir.

Şekil 14: *ArcActive teknolojisinin DCA ve şarj ömrü performansı*



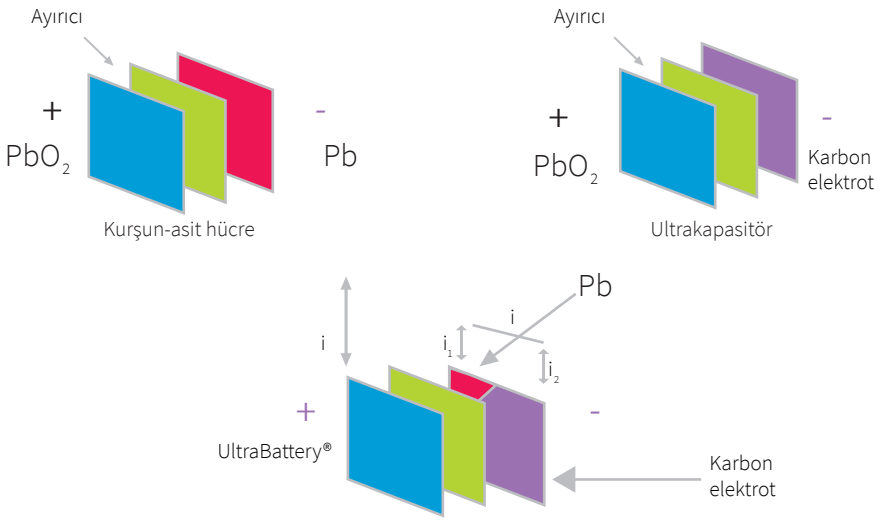
Kaynak: Arcactive

Gelişmiş kurşun-asit batarya, bir süper kapasitör ile konvansiyonel kurşun-asit bataryanın özelliklerini, batarya hücresindeki malzemeler düzeyinde ekstra elektronik kontrol sistemlerine ve kablolamaya ihtiyaç duymadan birleştiren bir hibrit enerji depolama sistemidir. Gelişmiş bir kurşun-asit batarya, geleneksel kurşun-asit bataryaların güvenlik, geri dönüşüm ve ekonomik yönlerine sahipken, yüksek şarj/deşarj oranlarında kısmi şarj seviyelerinde çalışabilir.

Ecoult/East Penn'in "UltraBattery teknolojisi" benzer şekilde hibrit bir kurşun-asit ve ultrakapasitör tasarımına dayanmaktadır, fakat negatif elektrotu sadece karbon-esaslı bir malzeme olması yerine Şekil 15'de gösterildiği gibi karbon-esaslı süper kapasitör ile konvansiyonel negatif elektrotun bileşimi olan kompozit bir yapıdır. UltraBattery, Avustralya Federal Bilim ve Endüstriyel Araştırma Örgütü tarafından geliştirilmiştir. Bu kurşun-asit bileşimi, bataryanın kısmi şarj durumunda geleneksel kurşun-asit bataryalara göre daha uzun ve daha etkili çalışmasını sağlayan bir ultrakapasitör kullanır. Bu yenilikçi hibrit yapı diğer tasarımlara göre pek çok avantajı beraberinde getirir: İlki, karbon bazlı ultrakapasitör genellikle geleneksel kurşun-asit bataryalarda ortaya çıkan sülfatlaşmayı engeller. İkinci olarak, batarya geleneksel kurşun-asit bataryalardan daha düşük şarj durumunda çalışabilir. Bunun anlamı elektrolizin (suyun hidrojen ve oksijene bölünmesi) daha az sıklıkla meydana gelecek olmasıdır. Ayrıca standart kurşun-asit bataryalara göre enerji yoğunluğundan ve deşarj voltaj profillerinden ödün vermeden yüksek hızda şarj/deşarj edilebilen bataryalardır.

Şekil 15: *Gelişmiş kurşun-asit batarya tasarımı "UltraBattery"*

UltraBattery® Teknolojisi



Kaynak: IRENA (2015); based on Ecoult (2014)

Sonuç olarak, pozitif elektrot daha az korozyona maruz kalır ve geleneksel VRLA bataryalardan daha yavaş kurur. Amaç, geleneksel kurşun-asit batarya tasarımının performansını ve dayanıklılığını çarpıcı bir şekilde iyileştirmektir. Bu batarya teknolojisi hibrit araçlar için test edilmiş, diğer taraftan frekans tepkisi ve düzleştirme dahil, enerji sektörü uygulamaları için de önerilmiş ve tanıtılmıştır.

ELECTRIC BICYCLE
Li-Ion
Battery

3. Lityum-İyon Batarya

- Lityum-iyon bataryalar, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojileri arasındadır ve elektronik donanım desteğiyle kontrol altında tutulduğunda güvenli olarak kabul edilirler. Günümüzde lityum-iyon bataryalar, dizüstü bilgisayarlar, kameralar, hesap makineleri ve akıllı telefonlar gibi elektronik cihazlarda kullanılmalarının yanında, giderek daha fazla yaygınlaşan elektrikli mobilite kullanım alanları nedeniyle en gelişmiş şarj edilebilir batarya sistemleri olarak kabul edilebilirler.

- Küresel bazda şebeke ölçeğinde ve sayaç arkası uygulamalarda kullanılan batarya depolama kapasiteleri, 2018 yılında bir önceki yıla oranla iki kat artarak 3 GW'ın biraz üstünde gerçekleşmiştir. Avustralya, Çin, Güney Kore, Birleşik Krallık, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri, 2018'de devreye alınan yeni batarya depolama sistemlerinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Küresel ölçekte lityum-iyon batarya piyasası hacmi 2018 yılında 36,2 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. 2026 yılına kadar 109,72 milyar ABD dolarına çıkacağı tahmin edilmektedir.

- Batarya elektrik depolama sistem maliyetleri son yıllarda geniş çapta bir düşüş eğilimi göstermektedir. Buna rağmen batarya malzemelerinin ayrıntılı maliyet analizleri, gizlilik kısıtlamaları nedeniyle, elde edilmesi zor olan verilerdir. Lityum-iyon batarya teknolojilerin enerji kurulum maliyetleri, Lityum Titanat (LTO) tabanlı sistemler için 473 ile 1.260 ABD doları/kWh arasında iken, diğer lityum-iyon kimyasalları için 200 ile 840 ABD doları/kWh arasında değişmektedir.

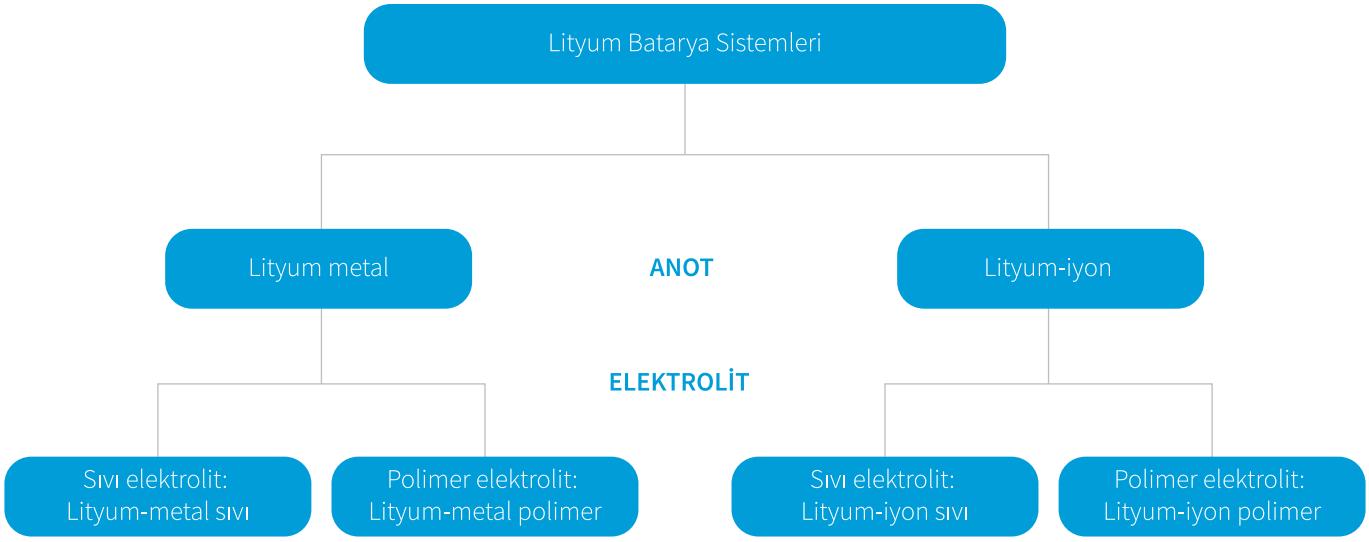
- Lityum-iyon bataryalar özellikle mobil uygulamalar için en umut verici teknoloji olmasına rağmen, hâlâ aşılması gereken bazı zorluklar vardır. Geleneksel lityum-iyon hâlâ enerji yoğunluğunda, hızlı şarj kabiliyetinde ve maliyetlerde iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Diğer taraftan, lityum-iyonun performansı dış koşullara karşı hassastır. Yüksek veya düşük sıcaklıklara maruz kalması durumunda, uzun vadede batarya ömrü önemli ölçüde azalabilir. Ayrıca lityum-iyon bataryalarda güvenlik problemi (patlamalı yanma) tam olarak hâlâ çözülmüş değildir.

- Lityum-iyon ve ilişkili uygulamaların ana kilometre taşlarından biri, 2030'a kadar yüksek enerji yoğunluğuna (> 400 Wh/kg ve 800 Wh/L) sahip büyük formatlı (> 150 Ah) hücreler geliştirilmesidir (mevcut lityum enerji yoğunlukları ~ 265 Wh/kg). Bu hedef doğrultusunda, performansı artırmak ve maliyetleri düşürmek için ileri malzemelerin (anot, katot, elektrolit, bağlayıcı, ayırıcı, akım toplayıcı ve ambalaj malzemeleri) geliştirilmesi kilit öneme sahiptir.

3.1 Mevcut Teknoloji

İlk olarak 1990'lı yılların başında Sony Corporation tarafından tanıtılan şarj edilebilir lityum-iyon bataryalar, özellikle mobil tüketici elektroniği için faydalanılan en önemli teknolojilerden biri haline gelmiştir. Çok çeşitli lityum esaslı batarya teknolojileri bulunmaktadır. Bunları sınıflandırmanın en iyi yolu, negatif elektrot (yani anot) tipi ve elektrolit tipini birleştirerek gruplandırmaktır (Şekil 16).

Şekil 16: *Lityum batarya sistemlerinin sınıflandırılması*

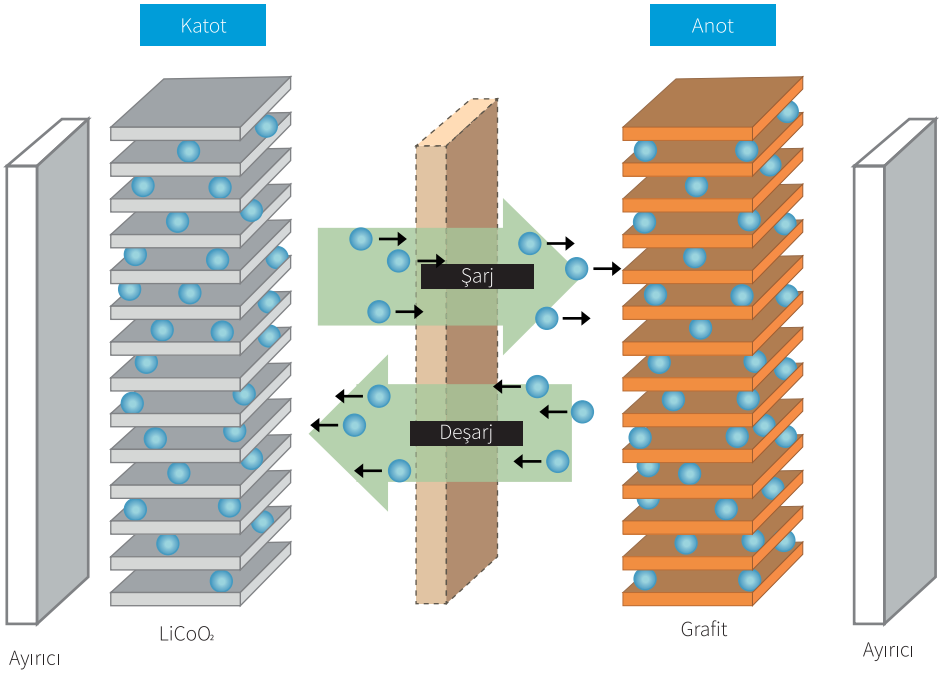


Kaynak: IRENA, based on Stan et al. (2014)

Polimer elektrolitler 1970'lerde tasarlanmış olsa da, günümüzde hâlâ geliştirilmelerine devam edilmektedir. Buna rağmen kullanılan en yaygın elektrolit, genellikle çözünmüş lityum tuzları içeren bir sıvı organik çözücü karışımıdır.

Lityum-iyon bataryalar, metal oksitlerden olan bir katot (pozitif elektrot), gözenekli karbon anot (negatif elektrot) ve organik sıvı elektrolit yapıdan oluşur. Deşarj sırasında lityum iyonlar elektrolit ve elektronlar dış devre yoluyla anottan katoda akar ve bu işlem sayesinde elektrik akımı sağlanır. Şarj işlemi, lityum iyonları ve elektronların akış yönünü tersine çevirir (Şekil 17).

Şekil 17: *Lityum-iyon bataryanın çalışma prensibi*



Kaynak: ICEF (2017)

Lityum-iyon bataryalar, katot için lityum nikel, lityum kobalit ve lityum manganit gibi lityum kompozit oksitler ve anot için ise grafit gibi karbon malzemelerden oluşur. Elektrotlar arasında lityum iyonların geçişini desteklemek için bataryanın içi etilen karbonat gibi organik çözücülerden yapılmış elektrolitle doldurulur ve $LiPF_6$ gibi lityum tuzları elektrolitlerinde çözülür.

Lityum-iyon bataryalar, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojileri arasındadır ve elektronik donanım desteğiyle kontrol altında tutulduğunda güvenli olarak kabul edilirler. Günümüzde lityum-iyon bataryalar, dizüstü bilgisayarlar, kameralar, hesap makineleri ve akıllı telefonlar gibi elektronik cihazlarda kullanılmalarının yanında, giderek daha fazla yaygınlaşan elektrikli mobilite kullanım alanları nedeniyle en gelişmiş şarj edilebilir batarya sistemleri olarak kabul edilebilirler. Farklı kimyasalların ve malzemelerin kullanıldığı birçok tip lityum-iyon batarya teknolojisi mevcuttur.

Lityum Kobalt Oksit (LCO, $LiCoO_2$) batarya, bir kobalt oksit katodu ve bir grafit karbon anot kullanır. Yüksek özgül enerji özelliği sayesinde, telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve dijital kameralar gibi mobil uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum kobalt hücrelerinin temel dezavantajları, nispeten kısa ömürlü olmaları, sınırlı güç kapasiteleri ve düşük ısıl kararlılıklarıdır.

Lityum Manganez Oksit (LMO, $LiMn_2O_4$) bataryalar, katot materyali olarak lityum manganez oksitten faydalanır. Bataryaların tasarımı, elektrot üzerinde iyonların daha iyi akışını sağlayan üç boyutlu bir spinel yapıdan oluşur. Bu tasarım, yüksek termal kararlılık ve daha iyi güvenlik unsurları getirirken, elektrikli araç ve el aletleri gibi yüksek yüke sahip uygulamalarda kullanılmalarına olanak sağlar. Ana dezavantajları, göreceli kısa takvim ve döngü ömürlü olmalarıdır.

Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC, $LiNiMnCoO_2$) bataryalarında nikel, manganez ve kobalt elementlerinin bir arada bulunmasının oluşturduğu sinerjik etki, bu maddelerin yüksek enerji-düşük akım ve yüksek güç-düşük kapasite gerektiren durumlara uyum sağlayarak esneklik oluşturması nedeniyle en başarılı sistemlerden biri olarak kabul görmesine yol açmaktadır. Bu esneklik, katot maddesinin elektrikli araçlardan tıbbi cihazlara kadar birçok endüstriyel uygulamada kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, kobaltın bir kısmının nikel ile değiştirilebilmesi, diğer Lityum-iyon teknolojilerine kıyasla maliyeti düşürmektedir.

Lityum Demir Fosfat (LFP, $LiFePO_4$) bataryası ucuz, çevre dostu, şarj/deşarj sırasında hacim değişiminin küçük, döngü ömrünün uzun, termal ve elektrolitte yükseltgenmiş halde kararlı olması, darbeli akım ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Araçlarda marş aküsü olarak kurşun asit akülerin yerine kullanılabilir. Ancak LiFePO4 maddesinin katot olarak kullanılabilmesi için düşük olan lityum iyonik ve elektronik iletkenliğinin artırılması gerekmektedir.

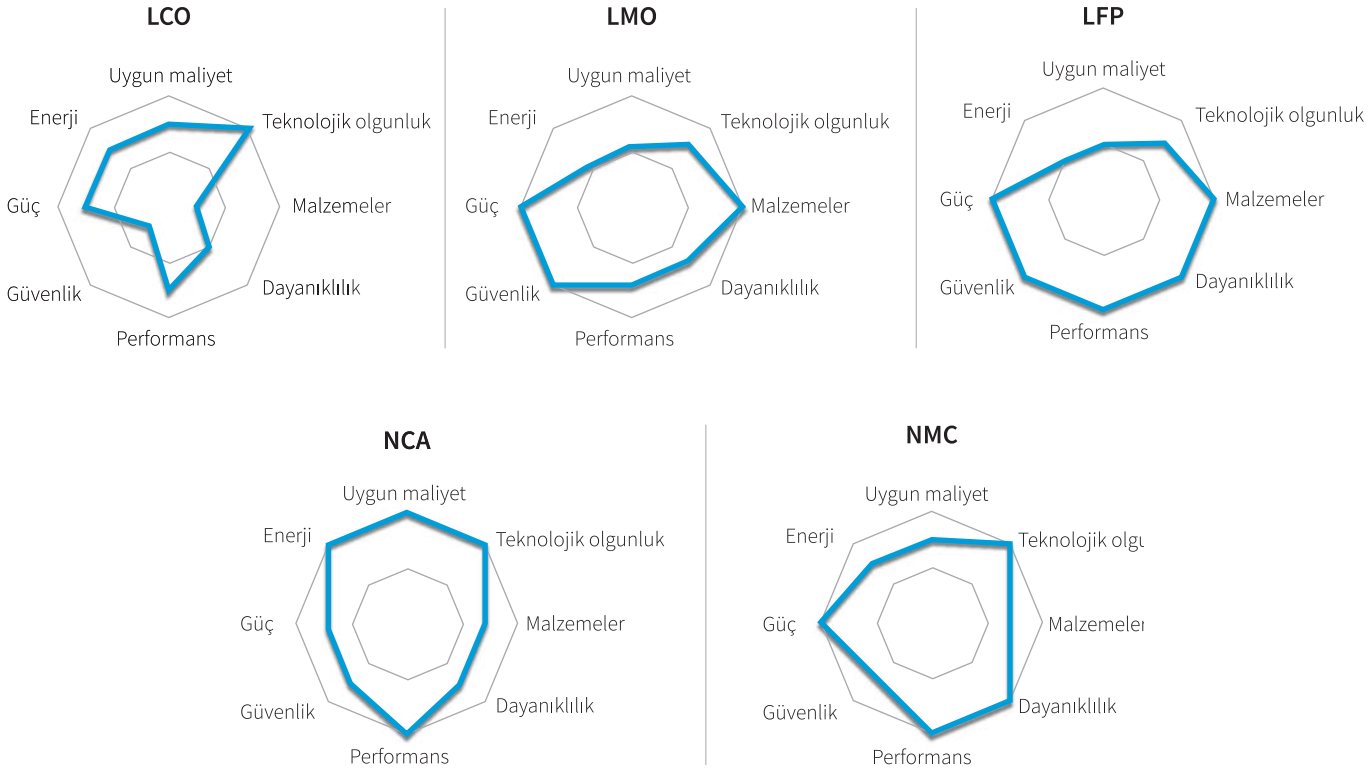
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA, $LiNiCoAlO_2$) bataryası NMC teknolojisine benzer ancak termal olarak daha karasız ve diğer katot maddelerine göre daha pahalıdır. Genel olarak endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli güç aktarma organlarında kullanılırlar.

Lityum Titanat (LTO, $Li_4Ti_5O_{12}$) bataryalar, lityum-iyon bataryalardaki geleneksel olarak kullanılan grafit yerine, anottaki titanatı kullanır. Katotlar lityum-manganez oksit

veya NMC olabilir. Lityum-titanat, termal olarak kararlıdır ve şarj sırasında elektrolit-elektrot ara yüz filmi oluşturmaz. Sahip olduğu spinel yapı nedeniyle şarj/deşarj sırasında ihmal edilebilir hacim değişimine bağlı olarak uzun döngü ömrüne sahiptir. Ancak yüksek potansiyel nedeniyle düşük olan enerji yoğunluğu, maliyetin yüksek olmasına neden olmaktadır. Elektrikli güç aktarıcılar ve kesintisiz güç kaynaklarında kullanılmaktadır (UPS).

Ticari lityum-iyon bataryalarda kullanılan katot aktif maddelerin temel özellikleri Şekil 18'de özetlenmiştir. LCO batarya 1991'de ticari hale gelen ilk Lityum-iyon kimyasıydı ve $LiCoO_2$ katot ile grafit (C_6) anodundan oluştu. Yüksek özgül enerji (150-190 Wh/kg) ve teknolojik olgunluğu LCO bataryaların cep telefonları, tabletler ve dizüstü bilgisayarları gibi taşınabilir elektronik cihazlar için popüler bir seçenek haline gelmesini sağladı. Bu batarya teknolojisi havacılıkta, özellikle 2011'de Boeing 787 Dreamliner uçuşlarında yardımcı yedek güç sağlamak için kullanıldı. Ancak termal kaçaklardan kaynaklanan güvenlik probleminin oluşturduğu endişeler, LCO teknolojisinin elektrikli araç sektöründe kullanılmasına engel olmuştur. Güvenlik kaygılarına ek olarak, çevrim ömrü nispeten mütevazıdır ve uzun vadeli pazar büyümesi, kobalt rezervinin kısıtlı olması nedeniyle sınırlıdır.

Şekil 18: *Ticari lityum-iyon bataryaların temel özellikleri*



Kaynak: Ghassan et al. (2018)

LMO batarya teknolojisi ilk olarak 1996 yılında piyasaya sürüldü. $LiMn_2O_4$ katodu, elektrot üzerindeki iyon akışını destekleyen ve düşük iç dirençle sonuçlanan üç boyutlu bir spinel yapı oluşturur. Bu nispeten yüksek bir özgül güç verir. LMO katotları, grafit veya LTO anotları ile birleştirilir. Manganez oksidin daha yüksek termal kararlılığı nedeniyle LMO bataryaları doğal olarak daha güvenlidir ve termal kaçak yaklaşık 250°C sıcaklıkta gerçekleşir. Ayrıca batarya, kobalt içermez ve çevre dostu malzemelerden oluşur. LMO bataryaları daha çok elektrikli bisikletlerde, elektrikli aletlerde ve tıbbi cihazlarda kullanılır.

LFP bataryasında katot olarak $LiFePO_4$ ve anot olarak grafit kullanılmaktadır. Bu batarya ilk olarak 1999 yılında piyasaya sürüldü ve kısa süre içerisinde dayanıklılığı, güvenliği ve çevre dostu malzemelerden oluşması nedeniyle umut verici bir teknoloji olarak kabul edildi. LFP bataryasının elektrikli araçlar için kullanımı henüz çok kısıtlı olsa da, elektrikli bisikletlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji ayrıca şebeke dışı ve şebekeye bağlı sistemlerde enerji kaynağı olarak büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir.

NCA bataryaları ticari olarak 1999'da kullanılmaya başlandı. $LiNiCoAlO_2$ katot ve grafit anottan oluştu. Genel olarak NCA katotları, %80 nikel, %15 kobalt ve %5 alüminyum karışımını kullanır ve bu nedenle kobalt üzerindeki güven LCO bataryalara kıyasla orta düzeydedir. NCA bataryaları günümüzde elektrikli araçlarda kullanılır ve bununla birlikte şebeke uygulamaları için çeşitli projeksiyonlar vardır (örneğin, yük kaydırma). Bu batarya teknolojisi Tesla tarafından, elektrikli araçlarında kullanılmaktadır. Tesla, lityum-iyon bataryalar için iddialı üretim projeksiyonlarını hayata geçirmeye çalışıyor. Bu kapsamda Nevada'da yeni tamamlanan Gigafactory'yi 2020'de tam kapasite çalıştırarak, yıllık 500 bin elektrikli aracın üretilebilmesinin mümkün olacağı, 35.000 GWh üretim kapasitesine ulaşmayı hedefliyor. Bu ölçek, NCA batarya hücreleri için maliyet avantajı sağlayacaktır.

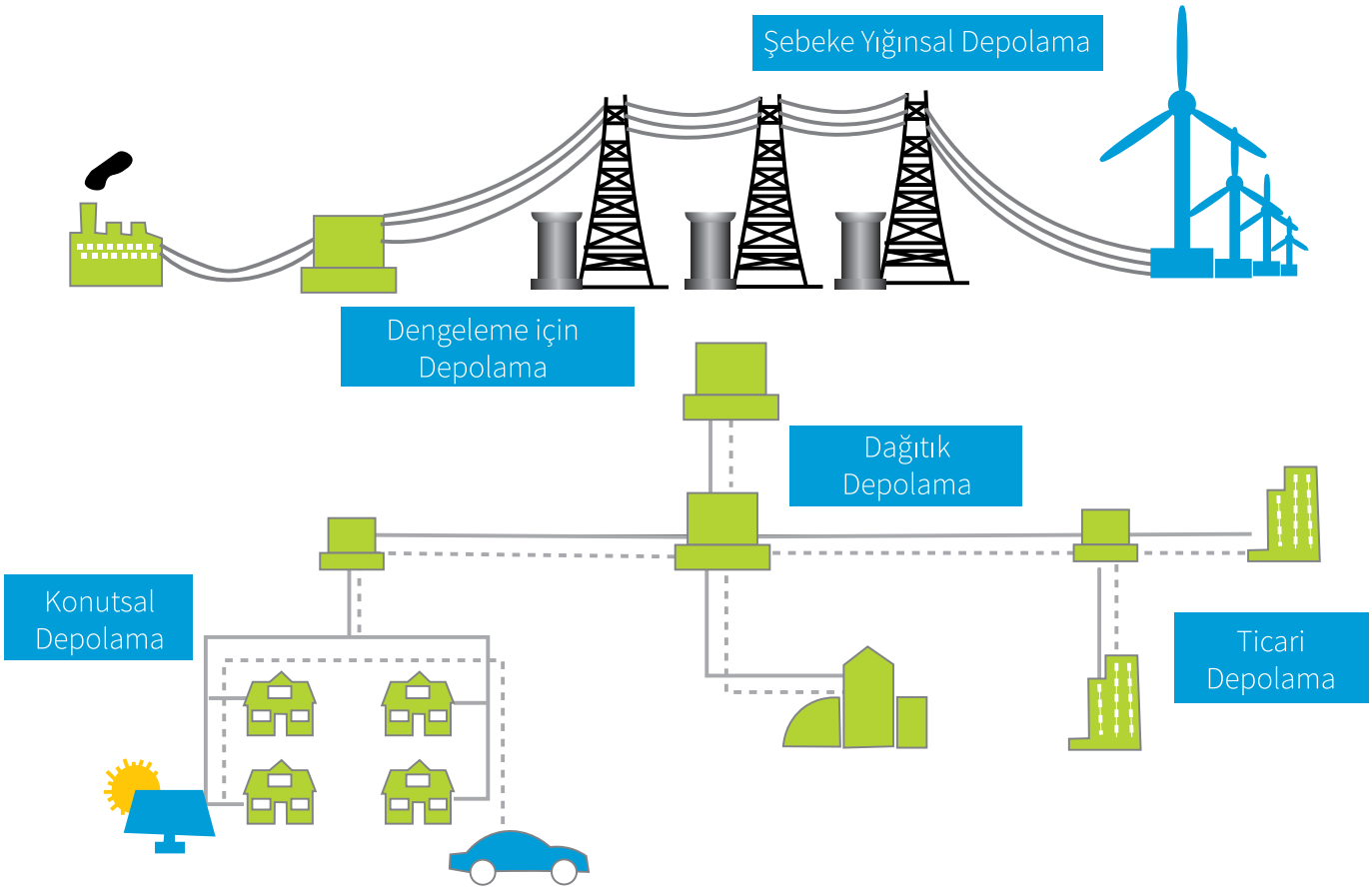
NMC batarya teknolojisinde, katot olarak $LiNiMnCoO_2$ ve anot olarak grafit kullanılmaktadır. Nikel, manganez ve kobalt oranları, batarya özelliklerini farklılaştırmak ve belirli uygulamalar için özel çözümler sağlamak üzere değiştirilebilmektedir. İlk olarak 2004 yılında ticarileştirilmiş olmasına karşın, elektrikli araç uygulamalarında baskın konumunu sürdürmektedir. Bununla birlikte taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli aletlerde ve tıbbi cihazlarda da kullanılmaktadır.

3.2 Piyasa Durumu

Enerji depolama amaçlı batarya sistemlerinin gelişimini yönlendiren ana akımlardan birisi, çevreye duyarlı daha temiz araçlara duyulan ihtiyacın etkisiyle, elektrik mobilite alanında yaşanan gelişmelerdir. Bu kısmen Lityum-iyon teknolojilerindeki gelişmelerin, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha düşük maliyetlere doğru yönlenmesini sağlamıştır. Batarya uygulamalarının çekiciliğini artıran bir diğer faktör ise, malzeme teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle batarya maliyetlerinin düşmesidir. Bunun yanında toplumun çevresel konulara olan hassasiyetinin artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artmasına ve bu artan yenilenebilir enerji katkısının bir sonucu olarak da batarya depolama uygulamalarındaki artışa katkıda bulunmaktadır.

Batarya enerji depolama sistemlerinin sağladığı en önemli avantaj, tüm aktif ve reaktif güç ihtiyaçlarını karşılama esnekliğidir. Bu yetenek sayesinde elektrik sisteminde üretim, iletim ve dağıtım seviyelerinde farklı şebeke uygulama hizmetleri sağlayabilir (Şekil 19).

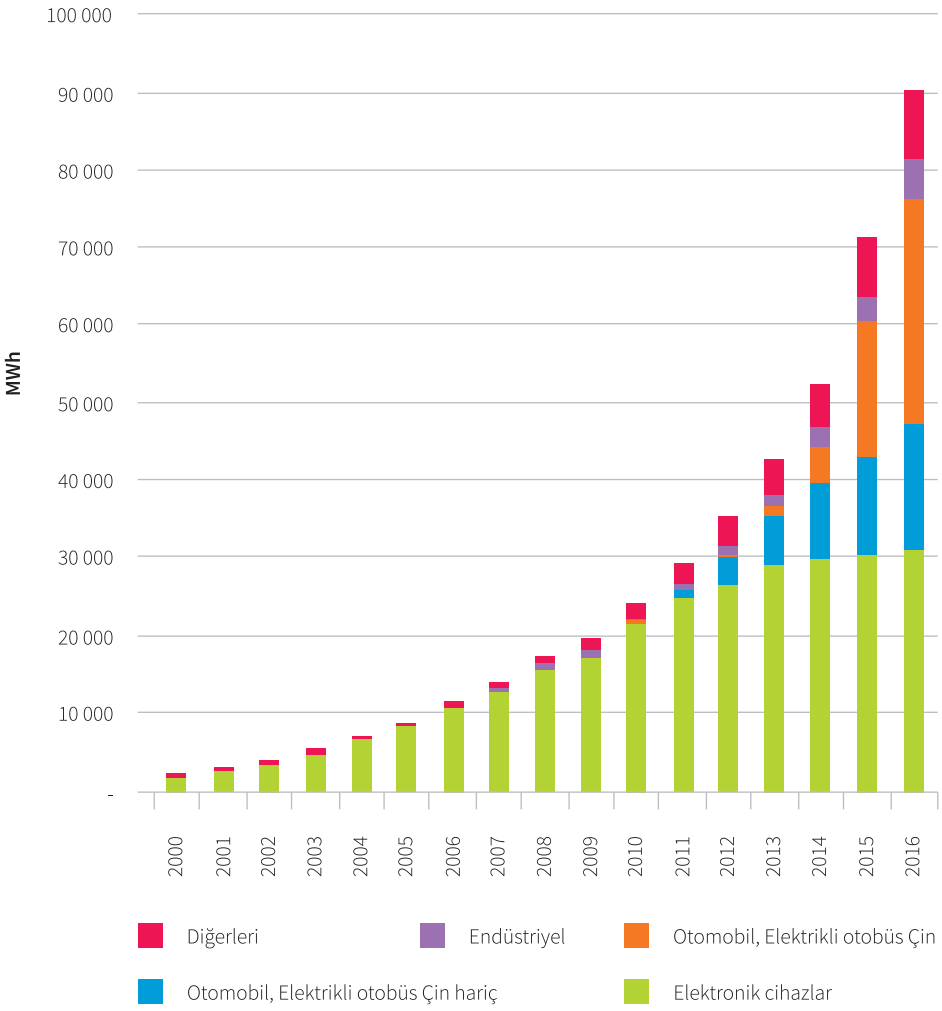
Şekil 19: *Batarya enerji depolama sistemleri uygulamaları*



Kaynak: Kore Batarya Endüstrisi Birliği (2017)

Enerjinin nerede üretildiği konusu gün geçtikçe önemini artırırken, hâlihazırda Avrupa'nın birçok yerinde pilot projelerde uygulanmakta olan merkezi olmayan enerji üretimi ve depolamanın yaygınlaşması, daha küçük ölçekli batarya kurulum ihtiyacını artıracaktır. Dahası artan yenilenebilir elektrik enerjisi üretimi, mevcut şebekelerdeki esneklik ihtiyacının karşılanması ve sistemin dengelenmesine katkı sağlayacak batarya enerji depolama sistemlerinin daha fazla kullanılmasına neden olacaktır. Elektrikli araç ve enerji sistemlerinde olan uygulamaların yanı sıra, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve cihaz elektrifikasyonunda (örneğin e-kitaplar, akıllı saatler, akıllı telefonlar, akıllı anahtarlar vb.) yaşanan gelişmeler daha yüksek yoğunluklu bataryalara olan ihtiyacı hızla artırmaktadır (Şekil 20).

Şekil 20: *2000-2016 yılları arası dünya genelindeki lityum-iyon batarya satış eğilimi*



Kaynak: AVICENNE ENERGY (2017)

Küresel bazda şebeke ölçeğinde ve sayaç arkası uygulamalarda kullanılan batarya depolama kapasiteleri, 2018 yılında bir önceki yıla oranla iki kat artarak 3 GW'ın biraz üstünde gerçekleşmiştir. Avustralya, Çin, Güney Kore, Birleşik Krallık, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri, 2018'de devreye alınan yeni batarya depolama sistemlerinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Avrupa enerji depolama pazarı 2018'de %74 artarak, yılsonuna kadar 890 MW (1.140 MWh) kurulu güce ulaşmıştır. Avrupa'da sayaç önü batarya enerji depolama pazarı iki katına ulaşarak, 2018 yılında kurulan yeni kapasitenin neredeyse %50'sini oluşturmuştur.

Sektör bazında ulaştırma hâlâ öncülüğünü korurken, en hızlı büyüyen batarya teknoloji ise lityum-iyon teknolojisi olmuştur. Şebeke ölçeğinde yapılan uygulamaların çoğunluğu Avustralya, Çin, Japonya, Güney Kore ve Amerika Birleşik Devletleri (2018'de Kaliforniya'da 300 MW + 182 MW kapasiteli iki büyük sistem kurulmuştur) gibi ülkelerden oluşmaktadır. Sayaç arkası sistemlerde ise çoğunlukla Almanya, İtalya, Japonya ve Hollanda başı çekmektedir. Şebeke düzeyinde 600'den fazla lityum-iyon projesi vardır ve bu projelerin içinde en çok lityum demir fosfat (LFP) teknolojisi kullanılmıştır. Küresel ölçekte lityum-iyon batarya piyasası hacmi 2018 yılında 36,2 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. 2026 yılına kadar 109,72 milyar ABD dolarına çıkacağı tahmin edilmektedir.

Vaka Analizi: Katar Doha'da frekans düzenleme ve diğer yan hizmet uygulamaları

2012 yılı sonlarında iklim değişikliği konferansında lityum-demir fosfatlı batarya çözümü projesi, Katar Bilim ve Teknoloji Parkı'nda BYD Enerji tarafından tanıtılmıştır. 500 kWh'lik enerji potansiyeli olan batarya sistemi, güneş enerjisi ile birlikte bir dizel jeneratör ile şarj edilmektedir. Proje, hem şebeke içi hem de şebeke dışı uygulamalar için farklı faydaları bir arada sunan ilginç bir hibrit sistem olarak tasarlanmıştır. Bu hizmetler örnek olarak, voltaj/reaktif güç desteği, frekans düzenleme ve "Black-Start" yetenekleri verilebilir. "Black-Start", iletim sisteminin tamamen veya kısmen kapanması nedeniyle bir elektrik santralinin harici elektrik şebekesi olmadan yeniden çalışabilmesidir. Elektriğin depolanması, frekans tepkisi hizmetinin sağlamasının yanında, bahsedilen hizmetlerden en az birini yapabilmesine olanak sağlar. Projenin en önemli kısmı ise, çöl ortam koşullarına uyum sağlayacak sıcaklık yönetim sisteminin kurulması ve tüm bu hizmetlerin bir arada kullanılabilmesidir. Performans gereklilikleri arasında hızlı şekilde enerji sağlayabilme özelliği ve "Black-Start" yapabilmek için yüksek oranlarda şarjlı kalabilme yetenekleri sayılabilir.

BYD Enerji tarafından tanıtılan 500 kW/500 kWh kapasiteli lityum-demir fosfat uygulamasının teknolojik özellikleri Tablo 7'de özetlenmiştir.

Tablo 7: *BYD 500 kW/500 kWh lityum demir fosfat batarya teknik özellikleri*

Konteyner boyutu	Batarya ve güç kontrol sistemi için standart garanti[1]	Sistem verimliliği	Uygun nem aralığı	Uygun yükseklik	Tepki süresi
40 ft.	2 yıl	<90%	5%-95%	≤2000 m	<100 ms

[1] *Müşterinin talep etmesi durumunda uzatılabilir*
Kaynak: IRENA (2015); based on BYD Enerji (2014)

Vaka Analizi: Hollanda Amsterdam Johan Cruijff Arena'da 3 MW'lık enerji depolama sistemi

Çatısında 4.200 güneş paneli bulunan Amsterdam'daki Johan Cruijff Arena'da, 3 MW'lık enerji depolama sistemi kurulmuştur. Stadyum ve çevresinde oturanlar da dahil olmak üzere, Hollanda enerji şebekesi için daha güvenilir ve verimli enerji kaynağı sağlamaktadır. Enerji depolama sistemi, stadyum içindeki arz ve talebi dengelemenin yanı sıra binlerce eve yetebilecek kapasiteye sahiptir. Bu kapasite aynı zamanda 4.200 güneş paneli tarafından üretilen elektrik enerjisini depolayarak, ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılmasını sağlamaktadır. Enerji depolama sayesinde futbol maçları ve konserler esnasında ortaya çıkan puant yüklerin normal seviyeye çekilmesi ile şebekenin rahatlamasına olanak sağlamaktadır.

Nissan LEAF (lityum-iyon) batarya depolama sisteminin kullanıldığı stadyum, 500 bin akıllı telefonu tamamen şarj etmeye ya da 7 bin hanenin elektrik tedarikini bir saat boyunca sağlayabilecek enerji depolama kapasitesine sahiptir. Büyük çaplı etkinlikler sırasında elektrik şebekesinin maruz kaldığı puant yükü azaltan sistem, etkinliklerin kesintiye uğraması veya stadyumun aydınlatılamaması durumlarında elektrik akışı sağlayarak şebeke enerji çekişlerini azaltmaktadır. Bunun dışında, bölgede herhangi bir elektrik kesintisi olduğunda, stadyum civarında oturan hane halkına elektrik sağlanabilmektedir. Johan Cruijff Arena'da hâlihazırda 18 elektrikli araç şarj istasyonu bulunmakta ve bunların sayısının 200'e çıkarılması planlanmaktadır.

Vaka Analizi: Angola'da sayaç arkası okul aydınlatma

Angola'da bir okulun aydınlatma işlemi için güneş fotovoltaik enerji sistemi ile 200 Watt/1.300 Watt saat kapasiteli bir lityum nikel kobalt alüminyum (NCA) bataryası birleştirilmiştir. Okulda daha önce aydınlatma sistemi olmayıp elektrik enerjisi kullanılmamıştır. Aydınlatma sistemi sayesinde okul, geceleri de eğitim sağlamaya başlamıştır. Günde sekiz saat süren dört derslik aydınlatmanın tahmini maliyeti günlük 2 ABD dolarıdır. Bu batarya tipinin seçilmesinin başlıca nedeni yüksek sıcaklıklara, kurşun asit bataryalara kıyasla, daha dayanıklı olmasıdır. Angola gibi sıcak bir ülkede bunun önemi çok fazladır. Lityumun aşırı ısınmasına karşı ise önlemler alınmıştır.

Batarya performansının hava koşullarına doğrudan bağlı olması sebebiyle, batarya sistemleri gölgeye yerleştirilerek, çalışma sıcaklığı 40°C'nin altında tutulmaya gayret edilmiştir. Diğer taraftan, bakım maliyetleri ve mesafe dikkate alındığında, bataryanın değiştirilmesi bakım yapmaktan daha uygun olacaktır.

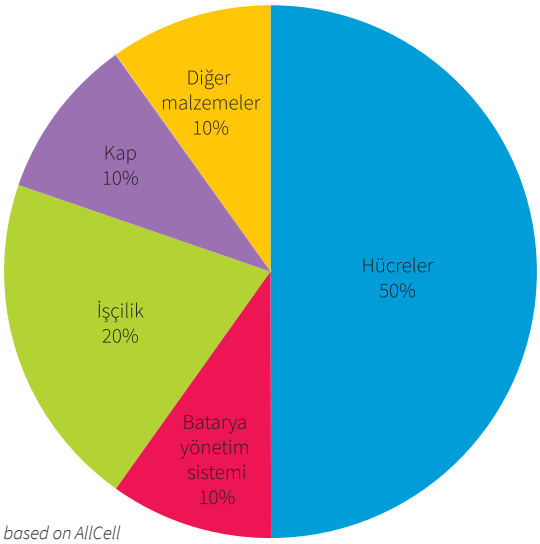
AllCell şirketi tarafından sağlanan batarya sisteminin performans ve maliyet istatistikleri, Tablo 8 ve Şekil 21'de gösterilmektedir. Tesisin nispeten küçük olması ve farklı çalışma ortamı göz önüne alındığında, burada sunulan istatistikler tüm lityum-iyon batarya sistemlerini temsil etmemektedir. Örneğin, daha büyük tesisler daha karmaşık ve pahalı kontrol yönetim sistemlerine sahip olacaktır, dolayısıyla bu sistemlerin maliyeti daha fazla olacaktır.

Tablo 8: *Sayaç arkası NCA kurulumu performans ve maliyet istatistikleri*

Beklenen ortalama deşarj derinliği	Gidiş-dönüş verimliliği (DC-DC)	Çevrim ömrü	Takvim ömrü	Yıllık kapasite kaybı (takvim etkisi)	ABD doları/Wh	ABD doları/ Wh (Daha yüksek yük için)	ABD doları/W
50%	>95% dönüştürücü dahil değil	>3000 çevrim[1]	6 yıl[2]	Yaklaşık 4%	0,80	0,40	Yaklaşık 5

[1] *Hücrelerin takvim ömründen kaynaklanan bozulmalarını içermez*
[2] *Batarya kullanımına bağlı olarak değişebilir*
Kaynak: IRENA (2015); based on AllCell

Şekil 21: *Sayaç arkası NCA batarya sistemi kurulumu için tahmini maliyet dağılımı*



Kaynak: IRENA (2015); based on AllCell

3.3 Maliyet ve Yatırımlar

Lityum-iyon bataryalar genellikle homojen olarak düşünülseler de; bu önyargı, gerçeklikten oldukça uzaktır. Lityum-iyon bataryaların farklı malzeme kombinasyonları; benzersiz performans, maliyet ve güvenlik özellikleri sağlar. Farklı kimyasalların seçimi, genellikle batarya depolama sisteminin çeşitli performans beklentileri ya da operasyonel hedeflere uyacak şekilde optimize edilmesiyle ilgilidir. Bu gibi hususlar farklı bir elektrot (veya elektrolit) malzeme seçimine yol açabilir. Örneğin, bazı lityum-iyon enerji depolama sistemleri, yüksek güç veya yüksek enerji yoğunluğunun gerekli olduğu uygulamalar için tasarlanabilirken, diğer uygulamalar için uzun süreli takvim ömrü veya mümkün olan en düşük sermaye maliyeti hedef olabilir (Şekil 22).

Şekil 22: *Lityum-iyon bataryaların özellikleri, avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması dağılımı*

Ana aktif malzeme	lityum nikel manganez kobalt oksit	lityum manganez oksit	lityum nikel kobalt alüminyum	lityum demir fosfat	lityum titanat
Teknoloji kısa adı	NMC	LMO	NCA	LFP	LTO
Katot	$LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$	$LiMn_2O_4$ (spinel)	$LiNiCoAlO_2$	$LiFePO_4$	değişken
Anot	C (grafit)	C (grafit)	C (grafit)	C (grafit)	$Li_4Ti_5O_{12}$
Güvenlik					
Güç yoğunluğu					
Enerji yoğunluğu					
Hücre maliyet avantajı					
Ömür					
Sistem performansı					
Avantajlar	-iyi özelliklerin kombinasyonu -yüksek güç veya yüksek enerji için ayarlanabilir -sabit termal profil -yüksek voltajlarda çalışabilir	-manganez bolluğu nedeniyle düşük maliyetli -çok iyi ısıl kararlılık -çok iyi güç kapasitesi	-çok iyi enerji ve güç kapasitesi -yeni sistemlerde daha iyi çevrim ömrü -uzun depolama takvim ömrü	-çok iyi ısıl kararlılık -çok iyi çevrim ömrü -çok iyi güç kapasitesi -düşük maliyetler	-çok iyi ısıl kararlılık -çok iyi çevrim ömrü -yüksek deşarj kabiliyeti -katı elektrolit interfaz sorunu yok
Dezavantajlar	-bazı ülkelerde patent sorunları	-orta dereceli çevrim ömrü bazı uygulamalar için yetersiz -düşük enerji performansı	-güvenliği azaltabilen orta yüklü şarj termal kararlılığı -kapasite 40-70°C sıcaklıkta zayıflayabilir	-Düşük hücre depolaması nedeniyle daha düşük enerji yoğunluğu	-titanyumun yüksek maliyeti -azaltılmış hücre voltajı -Düşük enerji yoğunluğu

Kaynak: IRENA (2017)

Lityum-iyon batarya teknolojilerin enerji kurulum maliyetleri, LTO tabanlı sistemler için 473 ile 1.260 ABD doları/kWh arasında iken, diğer lityum-iyon kimyasalları için 200 ile 840 ABD doları/kWh arasında değişmektedir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin "Sistem esnekliğini artırmak için gereken seçeneklerin maliyet ve faydaları" çalışmasında, bazı lityum-iyon teknolojilerinin kWh başına maliyetlerine ilaveten, 2020 yılında Türkiye iletim şebekesi seviyesinde 600 MW'lık enerji depolama tesisi kurulması durumunda toplam yatırım maliyetlerinin tahmini olarak ne olacağı gösterilmiştir (Tablo 9). Bu tahmini yatırım maliyeti değerleri hesaplanırken, 300 MW'lık kısmının sekonder frekans kontrolü, diğer 300 MW'lık kısmının ise enerji kaydırma işlemi için kullanılacağı öngörülmüştür.

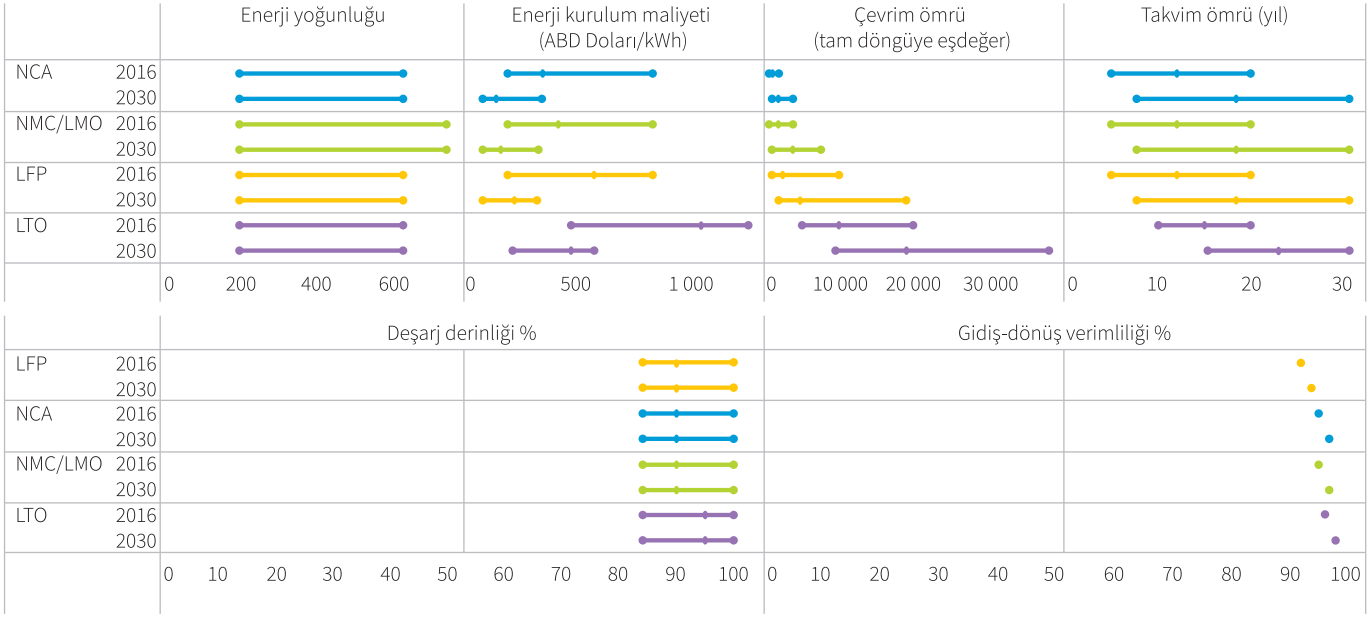
Tablo 9: *Lityum-iyon batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri*

Depolama Teknolojisi	Enerji kurulum maliyeti (ABD doları/kWh)	600 MW'lık batarya depolama tesis toplam yatırım maliyeti (Milyon ABD doları)
LFP	440	1.391,28
NCA	275	896,28
NMC	320	1031,28
LTO	840	2.591,28

Kaynak: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

Batarya enerji depolama sistem maliyetleri son yıllarda geniş çapta bir düşüş eğilimi göstermektedir. Üretimde ölçek ekonomisi ve malzeme alanında yaşanacak iyileştirmeler, lityum-iyon batarya teknolojilerinin maliyetlerini düşürecek başlıca etkenler olacaktır. Şekil 23'de farklı lityum-iyon batarya depolama teknolojilerinin 2016 ve 2030 yılları tahmini karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 23: *Farklı lityum-iyon batarya teknolojilerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması*

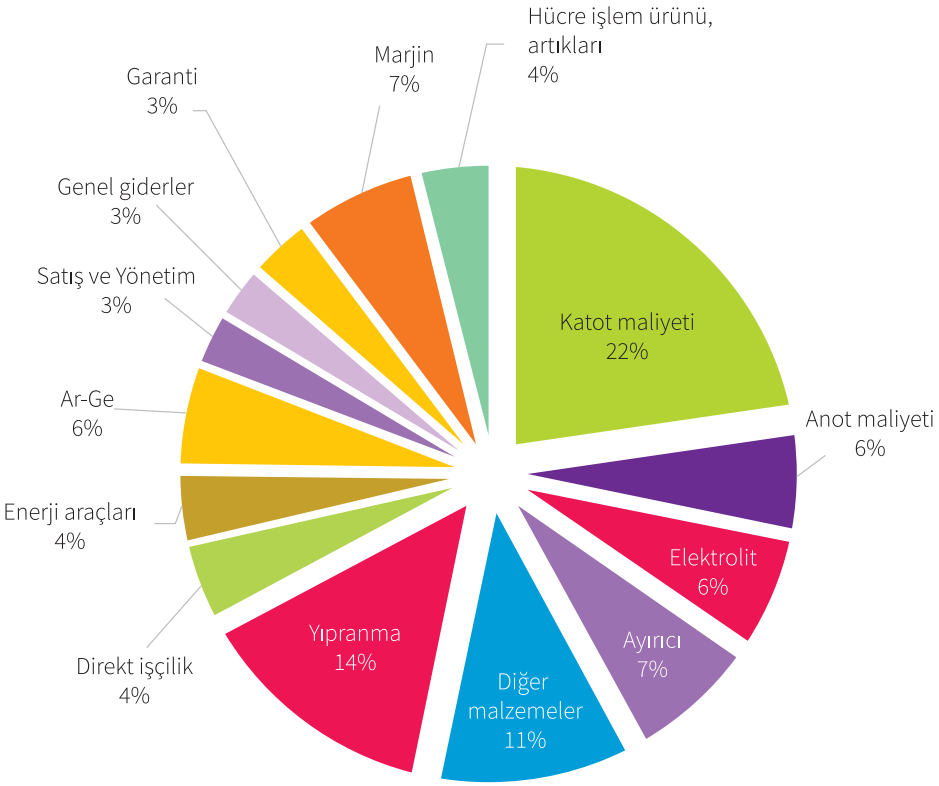


Kaynak: IRENA (2017)

Buna rağmen batarya malzemelerinin ayrıntılı maliyet bileşenleri, gizlilik kısıtlamaları nedeniyle elde edilmesi zor olan verilerdir. Daha ayrıntılı bilgi edinilmesinin önündeki başka bir engel ise, çeşitli uygulamalara bağlı olarak kullanılan sistem tasarımı veya teknolojilerdeki farklılıkların ya da sistem boyutlandırma ve maliyet sınırlamalarının değişkenlik göstermesidir.

Lityum-iyon bataryaların maliyeti, malzeme seçimi, enerji içeriği ve üretim ölçeği de dahil olmak üzere birçok değişkene bağlıdır. Şekil 24'te, lityum-iyon hücrelerinin 2016 yılındaki ortalama maliyet yapıları gösterilmiştir.

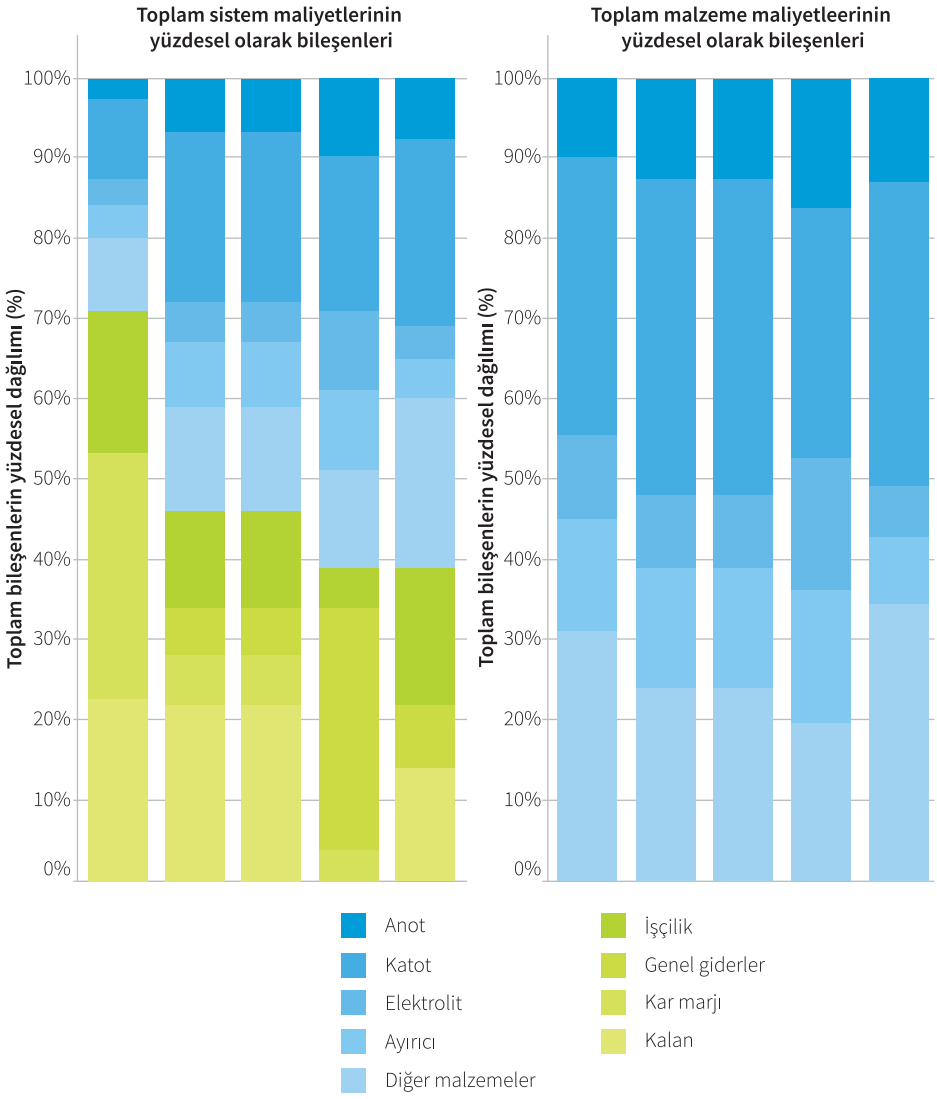
Şekil 24: *Lityum-iyon hücrelerinin 2016 yılındaki ortalama maliyet yapıları*



Kaynak: AVICENNE ENERGY (2017)

Çeşitli çalışmalardan elde edilen veriler literatürde mevcuttur, bu verilerden bazıları Şekil 25'te sunulmaktadır. Maliyet bileşenlerinin toplam maliyetin içindeki payları ve oranları önemli bir göstergedir. Şekil 25'te özetlenen çalışmalardan ilkinde; malzeme maliyet kaleminin, toplam sistem maliyetinin üçte birinden az olması ve diğer dört çalışmada ise malzeme maliyet kaleminin toplam sistem maliyetlerinin içinde %55 ile %63 arasındaki oranlarda değişiyor olması, bu durumu açıklayan güzel bir örnektir. Bununla birlikte, sadece malzeme ile ilgili maliyet bileşenlerine bakıldığında, toplam malzeme maliyetinin kaynaklar arasında daha dengeli dağılmış olduğu görülmektedir. Beş çalışmanın tamamında, elektrot malzemeleri (anot, katot ve elektrolit) maliyetin yaklaşık yarısına karşılık gelmektedir. Toplam malzeme maliyetinin ana kalemi, malzeme maliyetinin %31 ila %39'u arasında değişen oranda (batarya depolama toplam sistem maliyetinin %10 ila %23'ü arasında) katottur.

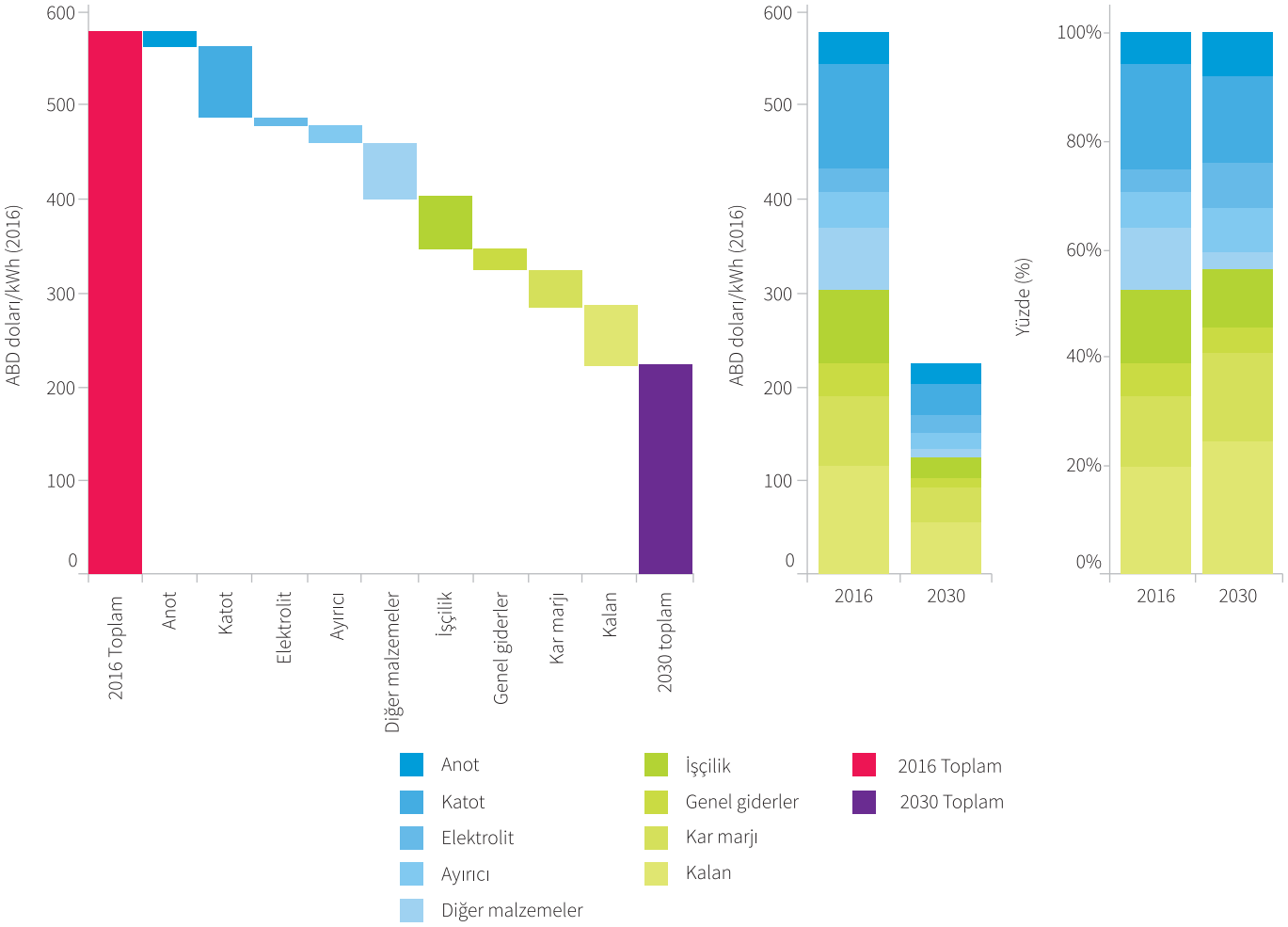
Şekil 25: *Seçilmiş bazı lityum-iyon batarya elektrik depolama sistemlerinin maliyet analizi*



Kaynak: IRENA (2017)

Önümüzdeki yıllarda maliyetlerde yaşanacak düşüş eğiliminin nasıl gerçekleşeceği konusu belirsizliğini hâlâ korusa da; üretim iyileştirmeleri, tedarik zinciri rekabetleri, üretim ölçeği gibi etkenlerin yanında, Ar-Ge çalışmaları sonucunda ticarileşebilen teknolojilerin öncü olması beklenmektedir. LFP batarya teknolojisi için maliyet bileşenlerinde oluşabilecek iyileştirmeler Şekil 26'da gösterilmiştir. İşçilik maliyetleri lokasyona bağlı olmakla birlikte, batarya depolama sistemleri pazarının büyümesi ve rekabetin artması ile otomasyona yönelik genel bir artış eğilimi olması beklenmektedir.

Şekil 26: *LFP batarya enerji depolama sistemlerinin maliyet bileşenlerinde oluşabilecek iyileştirmeler, 2016-2030*



Kaynak: IRENA (2017)

3.4 Bariyerler

Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj-deşarj verimi, kendi kendine düşük deşarj oranları ve nispeten yüksek dayanıklılık gibi özellikleri, lityum-iyon bataryaların çeşitli avantajları olarak belirtilebilir. Bunlara ek olarak, şarj durumu batarya voltajından kolayca izlenebilir. Bu nedenle lityum-iyon batarya birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lityum-iyon bataryalar özellikle mobil uygulamalar için en umut verici teknoloji olmasına rağmen, enerji sistemi uygulamaları da dahil farklı uygulama alanları için hâlâ aşılması gereken bazı zorluklar vardır. Geleneksel lityum-iyon bataryalar hâlâ enerji yoğunluğunda, hızlı şarj kabiliyetinde ve maliyetlerde iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Dahası, katotta pahalı ve kararsız olan kobalt oksitlerin kullanılıyor olmasıdır. LFP bazlı bileşimler göreceli olarak daha güvenlidir ancak enerji yoğunluğu diğer oksit bazlı katot malzemelere göre düşüktür ve daha düşük gerilime sahiptir. Uygulamalarda yüksek yoğunluk ve voltajın faydalarından istifade edilmeye çalışılırken, katotta kobaltın azaltılması eğilimi vardır.

Lityum-iyon bataryaların performansı dış koşullara karşı hassastır. Yüksek veya düşük sıcaklıklara maruz kalması durumunda uzun vadede batarya ömrü önemli ölçüde azalabilir. Hücre çalışma voltajı, alternatiflerinin araştırılıyor olmasına rağmen

katotlarda kullanılan geleneksel malzemelerden dolayı kısmen sınırlı kalmaktadır. Anot söz konusu olduğunda ise, enerji yoğunluğunda önemli bir artış potansiyeli sergileyen (örneğin, silikon ve kalay bazlı) umut verici malzemeler araştırılmaktadır.

Bununla birlikte, büyük miktarlarda ve yüksek oranda aktif lityum tuzu içeren organik çözücü, lityum-iyon bataryada kullanılır. Bu organik çözücüler aşırı ısınırsa (hidrojen gazı vb.) buharlaşabilir ve oldukça kolay tutuşabilir. Güvenlik açısından lityum batarya teknolojileri dikkatli kullanılmalıdır. Bu sebeple aşırı şarj ve deşarjı önlemek için her bir hücrenin voltajının dikkatlice izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekir.

Farklı kimyasallardan ve malzemelerden oluşan lityum-iyon teknolojilerinin, kendilerine özgü farklı kısıtları olabilmektedir. Bu raporun "Mevcut Teknoloji" bölümünde, farklı lityum-iyon batarya teknolojilerinin kendine özgü kısıtlarından örnekler verilmiştir.

Tablo 10: *Lityum-iyon batarya teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek enerji yoğunluğuna (hacme bağlı enerji) ve yüksek güç yoğunluğuna (enerji değişim hızı) sahiptirler	Gereken durumlarda ısıl kaçak oluşumunu engellemek için koruma devresi ihtiyacı
Yüksek güç ve enerji sağlanırken, asgari fiziksel kullanım alanı	Yüksek sıcaklıkta ve yüksek voltajda depolandığında bozulma
Yüksek şarj/deşarj verimi, kendi kendine küçük deşarj oranları	Donma sıcaklıklarında şarj hızının düşük olması (<0°C, <32°F)
Nispeten yüksek dayanıklılık, bakım gerektirmeyen uzun çevrim ve uzatılmış raf ömrü	Bir yerden bir yere daha büyük miktarlarda taşıma için, nakliye yönetmeliklerine ihtiyaç duyulması
Yüksek kapasite, düşük iç direnç, iyi verimlilik, basit şarj algoritması ve oldukça kısa şarj süreleri	Lityum-iyon kombinasyonlarının çokluğu ve farklı uygulama alanlarında gereken hizmet farklılıkları göz önünde bulundurarak planlama yapılmasının gerekliliği
	Olası lityum tedarik problemleri

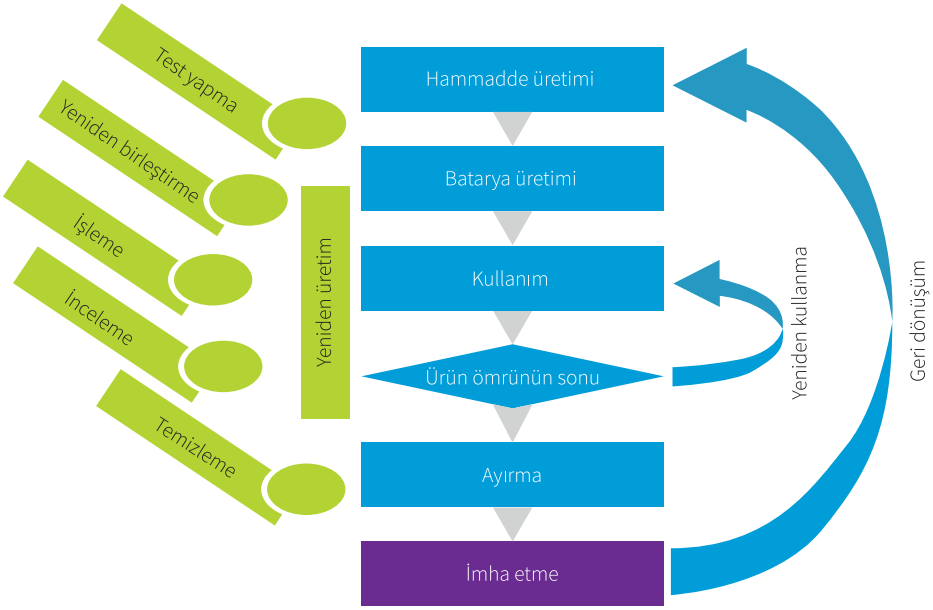
Lityum doğada metal olarak serbest halde pek görülmez, fakat neredeyse tüm magmatik kayalarda ve birçok maden kaynağının sularında küçük miktarlarda bileşik formunda bulunur. Avusturalya, Arjantin, Çin, Zimbabve ve Şili başlıca üretimin yapıldığı ülkelerdir. Günümüzde lityum-iyon teknolojilerindeki gelişmeler ve özellikle elektrikli araçlar, elektrikli cihazlar ve enerji sistemi uygulamalarının yaygınlaşması, lityuma olan talebi hızlı bir şekilde artırmaktadır.

Mevcut durumda küresel lityum rezervlerinin yeterli olduğu düşünülse de, farklı teknolojiler için önemli hale gelen lityumda oluşabilecek hızlı talep artışları, madencilik sektöründe aynı hızda yaşanacak tedarik problemlerini beraberinde getirecektir. Hızlı talep artışından kaynaklanabilecek bir diğer problem ise, lityum fiyatı üzerinde yukarı yönlü baskıların oluşmasıdır. Kobalt üretimi için de benzer bir durum düşünülebilir, çünkü genellikle nikel ve bakır madenciliğinin bir yan ürünü olarak elde edilir ve tedarik büyümesi, planlama gerektirecektir. Arz tarafında kritik öneme sahip olan

kobalt madenciliğinin Kongo'da yoğun bir şekilde yapılıyor oluşu, bölgenin hassasiyeti göz önüne alındığında, lityum-iyon batarya endüstrisi için oluşabilecek arz problemleri açısından ciddi bir endişe kaynağıdır.

Her ne kadar batarya enerji depolama sistemlerinde kullanılan lityum ve kobaltın tedarik riski, teknolojilerin gelecekteki tahmini gelişimine tehdit olarak görülmese de, batarya sistemleri için etkili geri dönüşüm içeren sürdürülebilir yaşam sonu yönetimi stratejileri önemli hale gelmektedir. Küresel enerji dönüşümüne kalıcı olarak olumlu bir etki sağlamak, batarya kimyasallarının geri dönüşümünü sağlayacak yeniden kullanım ya da yeniden üretim yöntemlerini araştıran yaşam sonu programları geliştirmekten geçmektedir (Şekil 27).

Şekil 27: *Batarya enerji depolama üretim ve yaşam sonu döngüsü*



Kaynak: IRENA (2017) based on Ramoni and Zhang (2013)

3.5 Yenilikçilik için fırsatlar

Gelecek nesil batarya sistemleri maliyet, performans ve kalite üçgeninde değerlendirilecektir. Geliştirilecek yeni nesil malzemelerin yanı sıra hem elektrot hem de hücrelerin modüllerin ve paketlerin üretim ve montaj teknikleri üretim hattı başına verim dikkate alınarak güncellenmelidir. Performans ve kaliteden ödün vermeden üretim tekniklerinden kaynaklı maliyetler göz önüne alındığında daha büyük boyutlarda elektrotların kaplanabilmesi, kaplanan elektrotların kuruma sürelerinin daha etkin yöntemler kullanılarak kısaltılması, elektrot-separatör sarma işleminin daha hızlı ve tekrar düzeltme gerektirmeyecek hassasiyette yapılması gibi yenilikçi üretim teknikleri önerilmektedir.

Bataryaların geliştirilmesi ve üretilmesinde eko-tasarım uygulamalarının gelişmesi geri dönüşümü kolaylaştırarak, hammaddelerin geri kazanımını ve değer zincirine yeniden dahil edilmesini sağlayacaktır. Bataryalar için (özellikle otomotiv sektöründe) ikinci-hayat uygulamalarını mümkün kılacak teknolojik çözümler geliştirilmelidir.

Batarya güvenliğini, dayanıklılığını ve ömrünü artırmayı amaçlayan batarya yönetim sistemleri ve elektrik mimarisinin geliştirilmesi, pazar için önemlidir. Ek olarak,

bataryaların daha iyi anlaşılması, bireysel malzemelerden, bileşenlere ve sistemlere giden yolda çok ölçekli ve fiziksel modelleme yoluyla sağlanmalıdır. Batarya performansı ve güvenliği için standartların geliştirilmesi ve uygulanması, daha geniş kapsamlı kabul görmesini büyük ölçüde hızlandırır.

Lityum-iyon ve ilişkili uygulamaların ana kilometre taşlarından biri, 2030'a kadar yüksek enerji yoğunluğuna (> 400 Wh/kg ve 800 Wh/L) sahip büyük formatlı (> 150 Ah) hücreler geliştirilmesidir (mevcut lityum enerji yoğunlukları ~ 265 Wh/kg). Bu hedef doğrultusunda, performansı artırmak ve maliyetleri düşürmek için ileri malzemelerin (anot, katot, elektrolit, bağlayıcı, ayırıcı, akım toplayıcı ve ambalaj malzemeleri) geliştirilmesi kilit öneme sahiptir. Bu işlem için karbon ve silikon / kalay gibi sırasıyla stres emilimi ve kapasite artırımı için, kompozit veya silikon bazlı anot malzemelerinin kullanımını kapsayabilir. Daha iyi enerji yoğunluğu için yüksek voltaj katotları ve daha yüksek voltajlara dayanacak, bozulmayı en aza indirebilecek katı elektrolitler kullanılabilir. Ek olarak, bu bileşenlerde kullanılabilecek daha uygun aktif malzemeler tanımlanmalı ve test edilmelidir.

Silikon esaslı malzemeler yeni nesil bataryalar için en çok umut vadeden anot malzemesi olmalarıyla birlikte ticarileşmeye en yakın olan anotlardır. Standford Üniversitesi'nin spin-off şirketi olan Amprius'un ticari olarak satışta olan yüksek kapasiteli anotlarının %10'a kadar silikon içeren silikon-grafit karışımı olduğu bilinmektedir. 2018 yılında Amprius'un %100 silikon anotları Airbus tarafından Zephyr S pseudo-satellitlerinde denenmiştir. Güneş enerjisi ile lityum-iyon bataryaları birlikte kullanan Zephyr S stratosferde 25 günlük uçuşunu başarıyla tamamlamıştır. 48'inci Power Sources Konferansı'nda %100 silikon anotlarla 1000 Wh/L ve 400 Wh/kg'a kadar yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılabildiği ve katot miktarı ve maksimum voltaja bağlı olmakla birlikte 200 ile 500 çevrim boyunca kapasitenin korunduğu gösterilmiştir. Sila ve Nexeon gibi start-up şirketler ise yakın gelecek silikon esaslı anotları piyasaya sürebilmek için yoğun teşvikler almaktadırlar. Sila Nanotechnologies bu yılın sonuna kadar piyasa sürmeyi planladığı anot malzemeleri için toplam 295 milyon dolar yatırım almıştır. Bu yıl Daimler ile ortaklık yapan şirketin, BMW ile de ortaklığı bulunmaktadır.

Nikel, lityum ve manganez bakımından zengin tabakalı katot malzemeleri ise $LiCoO_2$ ve NMC'nin yeni nesil versiyonları olarak öne çıkmaktadırlar.

Zorlu koşullar altında (örneğin > 4.5V'da şarj etme) çalışan yüksek enerji yoğunluğuna sahip aktif maddelerin (katot ve anot) akıllı kombinasyonu, elektrikli araçlar için sürüş aralığında önemli kazançlar sağlayacaktır. Bu, tüm malzeme bileşenlerini optimize etmek için tam bir lityum-iyon batarya hücre sistemi yaklaşımı gerektirecektir.

Son olarak, batarya elektro-kimyasının ve malzeme ara yüzlerinin fiziksel-kimyasal özelliklerinin daha iyi anlaşılması gerekir. Bu, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryaların yaratılmasına katkıda bulunacaktır.

4. Akışkan Batarya

- Akışkan bataryalar çevrim ömrünü etkilemeden derin deşarj seviyelerine ulaşabilir ve sınırsız şarj çevrim döngülerine yaklaşabilirler. Her bir bileşenin mekaniği oldukça basit olsa bile, akışkan batarya sistemlerinin ana dezavantajı, kullanımlarının büyük sabit endüstriyel uygulamalar ile sınırlı kalmasıdır. Buna ek olarak, pompaların, sensörlerin, kapların ve akış yönetiminin gerekli olduğu karmaşık sistemlerdir.

- Akışkan batarya teknolojileri, batarya piyasasının küçük bir kısmını oluştursalar da, uzun süreli depolama hizmeti sunmaları (tipik olarak 2 ila 10 saat arasında) ümit vaat eden sistemler arasında olmalarını sağlar. Bu durum, akışkan batarya teknolojisinin yüksek enerji kapasitesi kullanma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Sistemin performansı, elektroliti depolayan harici tankların eklenmesiyle kolayca artırılabilir. Vanadyum redoks akışkan bataryalar, puant yük tüketimini veya olası kesintileri karşılamak için en iyi uygulamalardan biri olabilir. VRFB, son yıllarda çeşitli avantajları nedeniyle güneş fotovoltaik kaynaklardan sağlanan enerjinin depolaması için umut verici bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir.

- Çinko bromür akışkan bataryalar (ZBFB), hibrit akışkan batarya tiplerinin en iyi bilinenidir. Her ne kadar ZBFB sistemleri günümüzde diğer teknolojilere kıyasla daha yüksek ilk yatırım maliyetleri gerektirseler de, akışkan bataryaların genel olarak 10.000 devir üzerine çıkmaları, önemli ölçüde daha yüksek ömürlü enerji verimliliğine ulaşmalarını ve yüksek ilk yatırım maliyetini telafi etmelerini sağlamaktadır. 2016 yılında akışkan bataryalar için enerji kurulum maliyeti kilovatsaat başına 315 ile 1.680 ABD doları arasında değişmektedir. 2030 yılına kadar maliyetlerin yaklaşık üçte iki oranında azalarak 108 ile 576 ABD doları/kWh arasında bir değere düşmesi beklenmektedir.

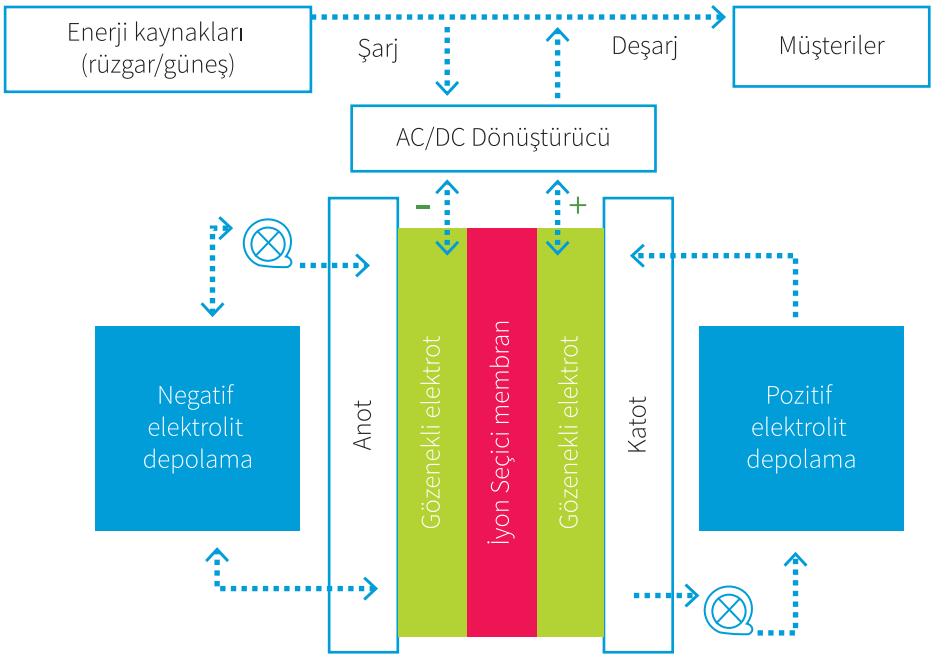
- Akışkan bataryaların başlıca dezavantajı, nispeten düşük verimliliğe (örneğin, lityum-iyon bataryaya kıyasla) ve karmaşık sistem (pompaların, sensörlerin, kapların, akış yönetiminin gerekli olduğu) yapılarına sahip olmalarıdır. Bu sebeple bozulma gibi olası problemler ortaya çıktığı durumlarda, bakım ve onarım için yüksek maliyete yol açabilirler.

- Vanadyum redoks akışkan batarya teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, farklı batarya bileşenlerinin maliyetini düşürmeye yönelik AR-GE çalışmalarında önemli bir potansiyel göstermektedir. Bu duruma bir örnek olarak, sulu olmayan elektrolitlerin kullanımına ilişkin araştırmalar verilebilir. Bununla birlikte maliyet düşüşleri vanadyumun maliyeti ile sınırlı olacaktır. Küresel vanadyum redoks akışkan bataryalar piyasası 2017 yılında 142,1 milyon ABD doları değerine ulaşmıştır.

4.1 Mevcut Teknoloji

Akışkan batarya, geleneksel bir batarya ile bir yakıt hücresi karışımından oluşan bir tür elektrokimyasal hücre çeşididir. Enerji, iki sıvı elektrolitin (sıvılarda çözünmüş metalik tuzlar) negatif ve pozitif bir elektrottan oluşan ve bir membranla ayrılmış ortak bir çekirdek boyunca (bir pompanın yardımıyla) dolaştırılmasıyla elde edilir. Bu dolaşım katolit ve anolit arasında bir iyon akımı oluşturur ve dolayısıyla elektrik üretilir. Benzer şekilde, ters işlem bataryayı şarj etmek için kullanılır (Şekil 28).

Şekil 28: *Akışkan batarya elektrik üretimi*



Kaynak: SusChem (2018)

Geleneksel ve akışkan bataryalar arasındaki en büyük fark, akışkan bataryalarda enerjinin elektrolitte (Geleneksel bataryalarda elektrotlarda depolanır) depolanmasıdır. Bu nedenle bataryanın hacmi, bataryanın kapasitesini belirler. Birden fazla akışkan batarya teknolojisi kullanılmaktadır.

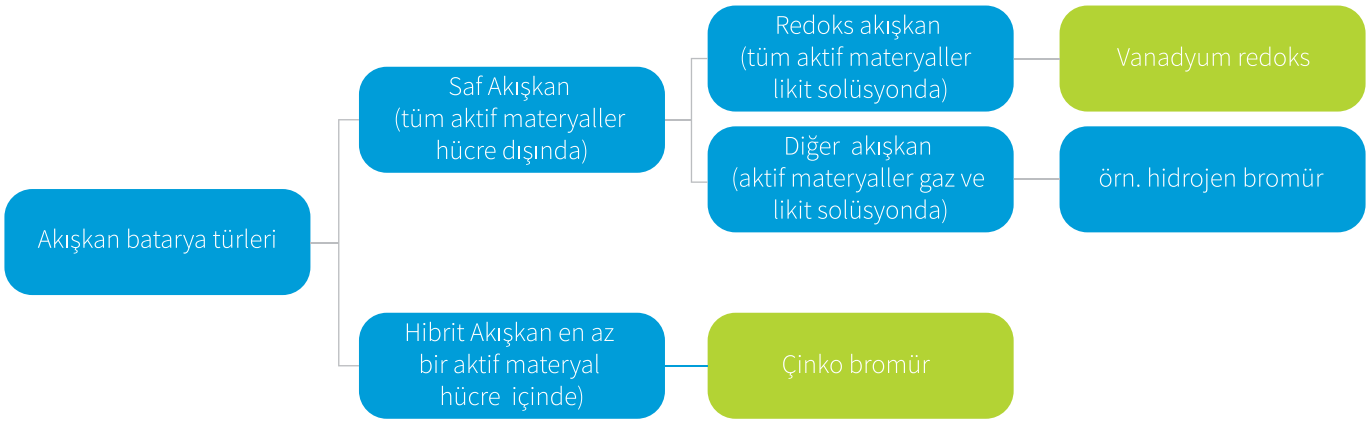
Redoks akışkan bataryalar (Redüksiyon-oksidasyon), iki tankın potansiyelindeki fark sayesinde elektriğin üretildiği, en yaygın kullanılan akışkan bataryalardır. Deşarj durumunda her iki tankta pozitif ve negatif yüklü iyonların karışımı olan aynı elektrolit çözeltisi tutulur. Redoks akışkan bataryalarda yaygın olarak kullanılan malzemeler, Vanadyum-Polihalid, Vanadyum-Vanadyum, Bromür-Polisülfit, Demir-Krom ve Hidrojen-Bromür'dür.

Hibrit akışkan bataryalarda, bir veya birden fazla elektroaktif bileşen katı bir tabaka olarak depolanır. Elektrokimyasal hücre bir batarya elektrotu ve bir yakıt hücresi elektrotu içerir. Kullanılan tipik malzemeler Çinko-Bromür, Çinko-Seryum ve Kurşun-asittir.

Membransız akışkan bataryalar, iki elektrolitin ortak çekirdekte ayrılmasını sağlamak için bir laminer akışkan kullanır ve bu da bir membran ihtiyacını ortadan kaldırır. Akışkan bataryaların, diğer birçok elektrokimyasal enerji depolama teknolojisinde görülmeyen en önemli avantajı, güç ve enerji yoğunluğunun birbirinden bağımsız olmasıdır. Elektrotlar, elektrokimyasal yakıtın bir parçası olmadığından, enerji depolama yoğunluğunu artırmaya gerek kalmaksızın optimum güç elde edebilmesi için tasarlanabiliyor olmalarıdır. Enerji kapasitesi basitçe elektrolit tanklarının boyutlarını ya da çözelti konsantrasyonun artırılması gibi basit teknikler sayesinde büyütülebiliyorken, yığındaki hücre sayısı ya da yığınların bağlanma konfigürasyonları değiştirilerek ya da bipolar elektrot kullanılarak sistemin gücü kontrol edilebilir. Buna ek olarak, elektrotların aktif madde içermemesi sayesinde, daha istikrarlı bir performans ve daha uzun ömür elde edilebilir. Aktif maddelerin ayrılması bütün sistemin güvenliğinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Akışkan bataryalar çevrim

ömrünü etkilemeden derin deşarj seviyelerine ulaşabilir ve sınırsız şarj çevrim döngülerine yaklaşabilirler. Her bir bileşenin mekaniği oldukça basit olsa bile, akışkan batarya sistemlerinin ana dezavantajı, kullanımlarının büyük sabit endüstriyel uygulamalar ile sınırlı kalmasıdır. Buna ek olarak, pompaların, sensörlerin, kapların ve akış yönetiminin gerekli olduğu karmaşık sistemlerdir.

Şekil 29: *Akışkan batarya sistem kategorileri ve teknolojilerine odaklanma*



Kaynak: IRENA (2017); based on Li and Liu (2017); IEC (2011); Nguyen and Savinell (2010); Linden and Reddy (2002)

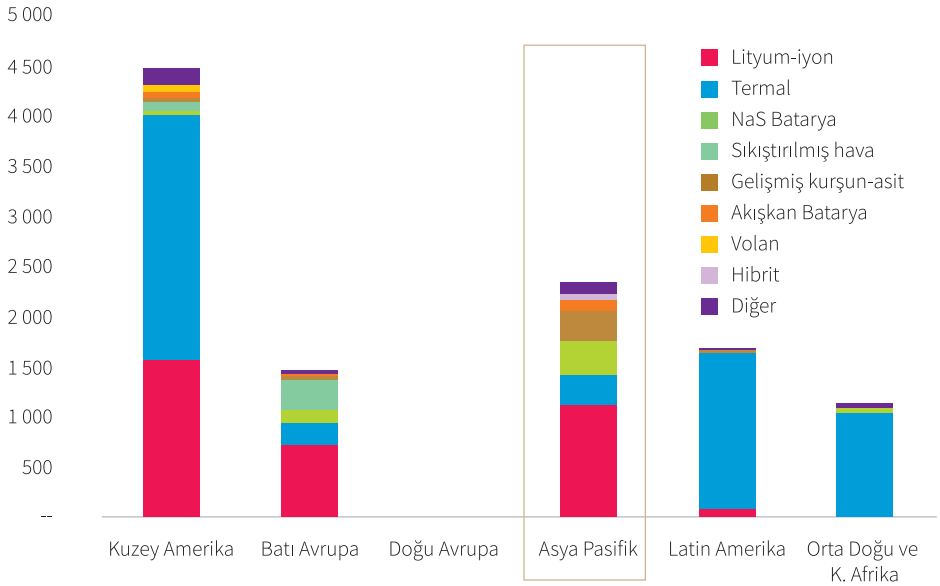
Vanadyum redoks akışkan batarya (VRFB) depolama mekanizması, tanklarda aktif iyonik vanadyum malzemeleriyle beslenen ve devrelerde elektron transferine sebep olan hücrelerde redoks reaksiyonlarını içerir. Redoks akışkan bir bataryada vanadyum kullanılması, bu elementin dört farklı oksidasyon durumunda bulunma yeteneğine dayanarak, bataryada sadece tek bir aktif malzemenin bulunmasını mümkün kılar. Tek bir aktif malzemeye sahip olmak, tanklar arasında tehlikeli çapraz kirlenmeyi önler.

Çinko bromür akışkan bataryalar (ZBFB) hibrit akışkan batarya teknolojileri içerisinde en iyi bilinenidir. Bir ZBFB hücresi, tipik olarak bir mikro gözenekli membran ile ayrılan iki bölmeden oluşur. Hücrenin her iki tarafındaki elektrotlar (biri çinko diğeri bromür tarafındadır), metal elektrotların bromür bakımından zengin bir ortamda korozyona maruz kalması sebebiyle karbon plastik kompozitlerden yapılır. İki harici tank şarj ve deşarj sırasında sulu elektroliti hücre yığınlarına doğru pompalar.

4.2 Piyasa Durumu

Akışkan batarya teknolojileri batarya piyasasının küçük bir kısmını oluştursalar da, uzun süreli depolama hizmeti sunmaları (tipik olarak 2 ila 10 saat arasında) ümit vaat eden sistemler arasında olmalarını sağlar. Bu durum, akışkan batarya teknolojisinin yüksek enerji kapasitesi kullanma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Sistemin performansı, elektroliti depolayan harici tankların eklenmesiyle kolayca artırılabilir. Akışkan bataryalar geçmişte membran malzemelerinin erken bozulması ve yüksek maliyetlerinden mustarip olmuştur. Daha yaygın hale gelmeleri, buralardaki iyileştirmelere önemli ölçüde bağlıdır. Günümüzde bu teknolojilerin kurulumları ve kullanımları nispeten geride kalmıştır. Bu durumun membran ve diğer teknolojilerdeki gelişmeler sayesinde önümüzdeki on yılda değişeceği öngörülmektedir. Günümüzde teknoloji açısından en olgun seviyeye gelmiş akışkan batarya teknolojileri, vanadyum redoks akışkan ve çinko-bromür bataryalardır. Çin, vanadyum redoks bataryaların gelişmesine destek veren ülkelerin başında gelmektedir. Bu sebeple, bu teknolojinin kullanımı diğer bölgelere kıyasla daha fazladır (Şekil 30).

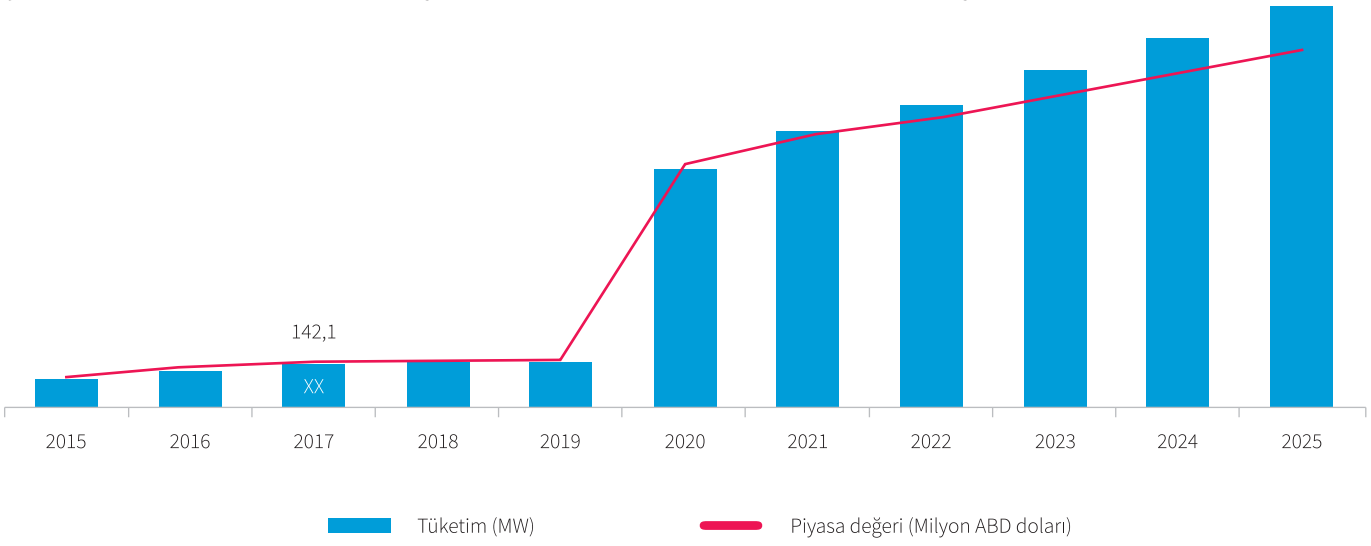
Şekil 30: *Teknoloji ve bölge bazında enerji depolama kapasite gelişimi (Pompaj hidroelektrik depolama hariç), 2018 (MW)*



Kaynak: Busveld (2018); based on Navigant Research

Küresel vanadyum redoks akışkan bataryalar piyasası 2017 yılında 142,1 milyon ABD doları değerine ulaşmıştır (Şekil 31). VRFB'ler, günümüzde esnek tasarım, yüksek verimlilik, daha iyi güvenlik standartları ve uzun yaşam döngüsü nedeniyle; özellikle büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. VRFB, diğer redoks akışkan sistemlere kıyasla hücre kısmında yüksek voltaja sahiptir. Bu sebeple, rüzgar ve güneş enerji santrallerinin şebeke entegrasyonunu kolaylaştırmak için lityum-iyon ve kurşun-asit batarya depolama teknolojilerine kıyasla daha ideal bir seçenek olabilirler.

Şekil 31: *Küresel tahmini VRFB piyasası gelişimi, 2015-2025 (MW, Milyon ABD Doları) (temsili gösterim)*



Kaynak: Androit Market Research (2019)

Vaka Analizi: Zhangbei, Çin, rüzgar enerjisi zaman kaydırma ve yan hizmetler

Prudent Enerji, Çin Rüzgar Enerjisi Araştırma ve Test Merkezi'ne 500 kW/1 MWh kurulu güç kapasiteli vanadyum redoks akışkan batarya sistemi kurmuştur. 2011 yılında hizmete giren sistem, günümüzde halen kullanılmaktadır. Test merkezinde 78 MW rüzgar ve 640 kW güneş fotovoltaik kurulu güç kapasitesi bulunmaktadır. Batarya teknolojisi, bu kurulu güç kapasitesinden üretilen elektriğin şebekeye sorunsuz olarak entegre edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bunu, elektrik talebinin düşük seyrettiği ve aşırı rüzgar üretimi olduğu dönemlerde elektriği depolayarak, daha sonrasında yüksek talep olduğu dönemlerde ise elektriği sisteme vererek gerçekleştirmektedir. Batarya kurulumu, yük kaydırma ve voltaj desteği de dahil olmak üzere, daha kısa zaman dilimleri için de hizmet sağlayabilir. Merkez ayrıca bataryanın çalışmasını test etmek için tasarlanmıştır. Böylece yerel kamu şirketi olan "The State Grid Corporation of China" sistem işletmecisi olarak elektrik şebekesi ile teknolojinin uyumunu test etmektedir.

Vanadyum redoks akışkan batarya, özel karışımlı elektrolit içeren depolama tankları kullanır. Elektrolit, sistemlerin hücre istifinde pompalar aracılığıyla dolaştırılır; böylece vanadyum iyonları reaksiyona girip bir yük oluşturur. Bu daha sonra elektrik deşarjı için koşullar yaratan bir DC devresine akar. Bu işlem geri dönüşümlüdür ve elektrolit tanklara geri pompalanabilir. Sodyum-kükürt bataryaların aksine bu sistem, oda sıcaklığında çalışır ve aynı zamanda düşük basınçlıdır. Hücre bazlı bataryaların aksine akışkan bataryalar, kısmi şarj durumuna bağlı olarak, zamanla bozulmaz. Soğutucular, elektrikli ekipmanın aşırı ısınmasını engellemek için sisteme dahil edilebilir. Çok soğuk iklimlerde elektrolitin akışkanlığını koruyabilmesi için ısı değiştiriciler monte edilebilir.

Tablo 11: *Prudent Enerji vanadyum redoks akışkan batarya teknik özellikleri*

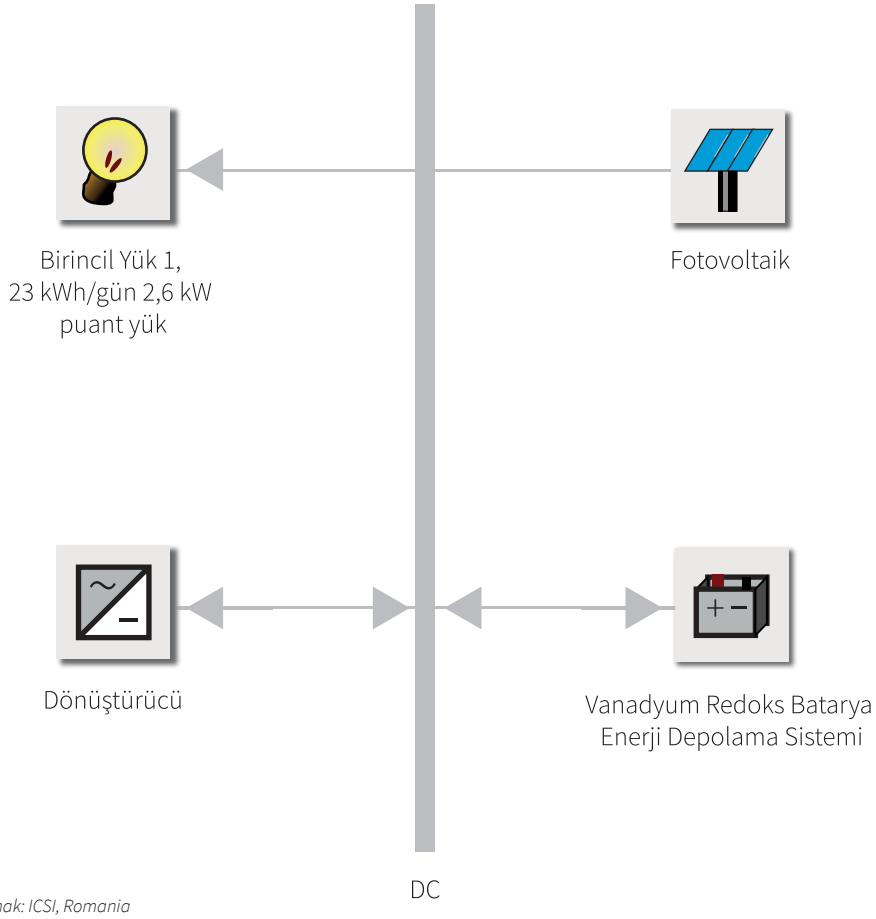
Çevrim ömrü (tam derinlikli şarj/deşarj)	Çevrim ömrü (kısmi şarj/deşarj)	Takvim ömrü	En hızlı tepki süresi	Verimlilik (DC-DC)	Boyutlar (250 kW Modül)	Kuru ağırlık (250 kW Modül)	Deşarj için saatlik elektrolit gereksinimi
10.000	100.000	10 yıl	<50 ms	%85'e kadar	9,3 m x 2,0 m x 2,8 m	13.900 kg	15,4 m^3

Kaynak: IRENA (2015); based on Prudent Energy (2012)

Vaka Analizi: Valcea, Romanya, VRFB'nin şebeke dışı bir hibrit sisteme entegrasyonu

Vanadyum redoks akış bataryasının, Valcea bölgesinde bulunan şebeke dışı bir ev tipi güneş fotovoltaik sisteme entegrasyonu ile enerjinin devamlılığı sağlanmıştır. Sistemin yıllık enerji ihtiyacı 7.895 kWh olup anlık maksimum enerji tüketim seviyesi 2,6 kWh olarak hesaplanmıştır (Şekil 32). Şebekeden bağımsız sistemlerde güneş fotovoltaik panellerinin kullanımındaki ana dezavantajlardan biri, kaynak kalitesi değişkenliği nedeniyle elektrik üretiminin devamlılığının olmayışıdır. Özellikle gündüz döneminde oluşan fazla enerji miktarının depolanarak başka bir zamanda kullanılma olanağı, hibrit sistemlerin oluşmasında önemli bir rol oynamıştır.

Şekil 32: *Şebeke dışı hibrit sistem entegrasyonu*



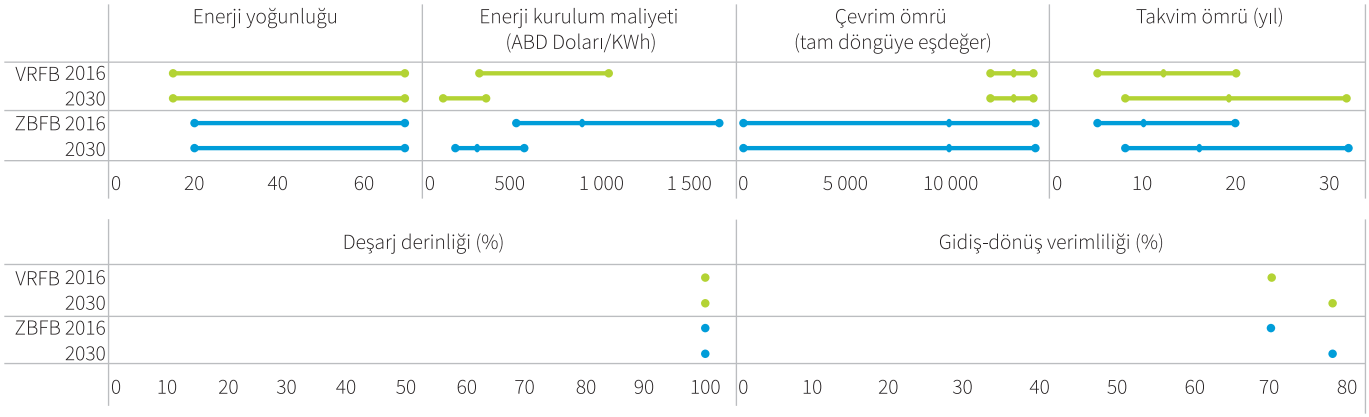
Kaynak: ICSI, Romania

Vanadyum redoks akışkan bataryalar, puant yük tüketimini veya olası kesintileri karşılamak için en iyi uygulamalardan birisi olabilir. VRFB, son yıllarda çeşitli avantajları nedeniyle güneş fotovoltaik kaynaklardan sağlanan enerjinin depolaması için umut verici bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. VRFB, güç çıkışı ve kapasitedeki esnekliği sayesinde yüksek verim ve uzun çalışma ömrü sunar.

4.3 Maliyet ve Yatırımlar

Akışkan bataryalar, ölçeklenebilirlikleri ve büyük ölçekli uygulamalara uygun olmaları nedeniyle son on yılda yoğun olarak araştırılmış ve aynı zamanda artan üretim deneyiminden de faydalanmışlardır. 2016 yılında akışkan bataryalar için enerji kurulum maliyeti kilovatsaat başına 315 ila 1.680 ABD doları arasında değişmektedir. 2030 yılına kadar maliyetlerin yaklaşık üçte iki oranında azalarak 108 ile 576 ABD doları/kWh arasında bir değere düşmesi beklenmektedir.

Şekil 33: *Akışkan batarya enerji sistemi maliyetleri ve teknik özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırması*



Kaynak: IRENA (2017)

Her ne kadar ZBFB sistemleri günümüzde diğer teknolojilere kıyasla daha yüksek ilk yatırım maliyetleri gerektirseler de, akışkan bataryaların genel olarak 10.000 devir üzerine çıkmaları, önemli ölçüde daha yüksek ömürlü enerji verimliliğine ulaşmalarını ve yüksek ilk yatırım maliyetini telafi etmelerini sağlamaktadır. Elektrolitin uzun vadeli kararlılığı, bu uzun ömür oluşumunda kilit rol oynar ve önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Elektrolitin kimyasal kararlılığı, kullanım ömrü maliyetlerinin önemli bir etkenidir; çünkü membranların ve elektrotların kararlılığı ile birlikte sistemin genel güvenilirliğini büyük ölçüde belirler. Akışkan batarya sistemlerinin maliyetlerinin düşürülmesindeki diğer çabalar, malzeme maliyetini düşürmeye (örneğin, aktif redoks malzemeleri, elektrolit ve hücre yığını malzemeleri) veya performansı artırmaya (örneğin, membran iletkenliği ve aynı enerji çıkışı için daha küçük bir hücre yığını boyutuna izin veren elektrot kinetiği) yoğunlaşmaktadır. Özellikle membran teknolojilerindeki yeni gelişmeler, redoks akışkan bataryaların yaygın şekilde kullanılmasında kilit rol oynamalarından dolayı, pek çok araştırmanın odak noktası haline gelmiştir. Membran özellikleri, spesifik akış kimyasına bağlı olarak değişebilse de; genel olarak daha iyi bir membranda aranan özellikler aşağıdaki gibidir;

- Düşük alan direnci sağlarlar.
- Elektrolitlerin çapraz kirlenmesini önlemek için son derece seçici olunmalıdır.
- Elektrolit pH'ına (örneğin, sülfürik asit elektrolit çözeltileri) kimyasal olarak dirençlidirler.
- Hem hızlı ve düşük maliyetle üretilebilmeli hem de uzun ömürlü olmalıdır.

Redoks akışkan bataryalar için mevcut Nafion membran malzemesi zaten bu özelliklerden çoğunu karşılarken, yüksek maliyetli olmaları ve yüksek su transfer seviyeleri nedeniyle yaygın ekonomik uygulamalarda kullanılmaları sınırlanmıştır. Düşük maliyetli yeni malzemelerin kullanılmasına başlanmış olup VRFB geliştiricilerinin çoğu tarafından uygulanmaktadır. Diğer taraftan farklı membran malzemeleri için yeni alternatifler araştırılmaya devam edilmektedir. Akışkan batarya sistemleri için iyileştirme alanları ve maliyet azaltma fırsatlarının bir özeti Tablo 12'de gösterilmektedir.

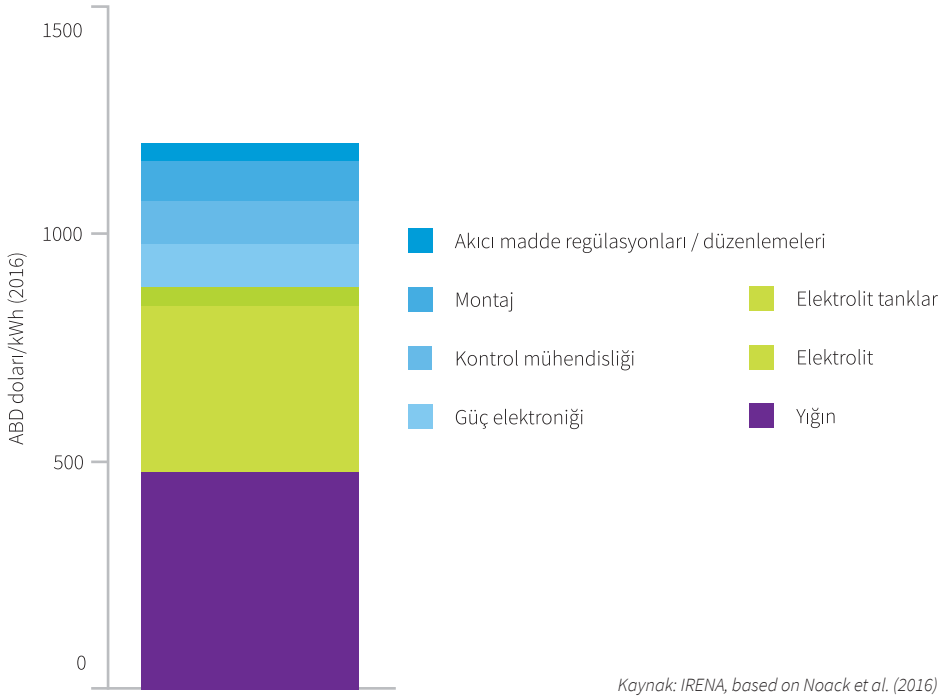
Tablo 12: *Akışkan bataryalar için maliyet araştırma ve geliştirme çalışmaları*

AR-GE	Alt teknoloji için geçerliliği	Teknoloji değişimi	Üretim maliyetinde azalma	Performans artırma
Gelişmiş membranlar: daha düşük direnç	Tüm akışkan bataryalar (ZBFB hariç)	Hayır	Evet	Evet. Daha yüksek verim
Gelişmiş membranlar: daha az çapraz kirlenme	Diğer tüm akışkan bataryalar (VRFB ve ZBFB hariç)	Hayır	Hayır	Evet. Daha az bakım
Gelişmiş membranlar: daha az sızıntı	Tüm akışkan bataryalar (ZBFB hariç)	Hayır	Hayır	Evet. Daha az bakım
Entegre yığınlar	Tüm akışkan bataryalar (ZBFB hariç)	Hayır	Evet. Daha yüksek otomasyon derecesi	Evet. Daha az sızıntı
Tuzlu su elektroliti	Yeni teknoloji	Evet	Evet. Çok düşük enerji maliyeti potansiyeli	Hayır. elektriksel performans şimdiki durumdan daha iyi değil

Kaynak: IRENA (2017)

Seçilen elektrolit ve elektroaktif redoks malzemelerine bağlı olarak, çoklu redoks akışkan batarya sisteminin kimyasal konfigürasyonları mevcuttur. Vanadyum redoks akışkan ve çinko bromür hibrit akışkan batarya teknolojileri "sulu" sistemlerdir ve burada elektrolit çözeltileri için ana çözücü sudur. Her ikisinde de olan ana elektrokimyasal aktif maddeler inorganik kimyasallardır. İyi güvenlik özellikleri ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle inorganik redoks malzemelere sahip sulu sistemler genellikle sabit uygulamalar için düşünülür. Genel çevrim maliyetlerini azaltmak için farklı kimyasal araştırmaları sürdürülmekte ve birçok farklı kombinasyon araştırılmaktadır. Örneğin, çok düşük maliyet potansiyeline sahip tuzlu su elektrolit batarya sistemleri önerilmiştir. VRFB maliyeti, elektrolit, dışsal etkenler ve diğer toplam maliyet birimleri şeklinde, kabaca üç kategoriye ayrılabilir (Şekil 34).

Şekil 34: *Vanadyum Redoks Akışkan Batarya sistemlerinin maliyet analizi*



Kaynak: IRENA, based on Noack et al. (2016)

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin "Sistem esnekliğini artırmak için gereken seçeneklerin maliyet ve faydaları" çalışmasında, bazı akışkan batarya teknolojilerinin

kWh başına maliyetlerine ilaveten; 2020 yılında Türkiye iletim şebekesi seviyesinde 600 MW'lık enerji depolama tesisi kurulması durumunda, toplam yatırım maliyetleri tahmini olarak gösterilmiştir (Tablo 13). Bu tahmini yatırım maliyeti değerleri hesaplanırken, 300 MW'lık kısmının sekonder frekans kontrolü, diğer 300 MW'lık kısmının ise enerji kaydırma işlemi için kullanılacağı öngörülmüştür.

Tablo 13: *Akışkan batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri*

Depolama Teknolojisi	Enerji kurulum maliyeti (ABD doları/kWh)	600 MW'lık batarya depolama tesis toplam yatırım maliyeti (Milyon ABD doları)
VRFB	255	836,28
ZnBr	655	2036,28

Kaynak: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

4.4 Bariyerler

Redoks vanadyum akışkan bataryalar, vanadyum veya benzeri iyonların oksidasyon-redüksiyon reaksiyonu vasıtasıyla şarj ve deşarj olurlar.

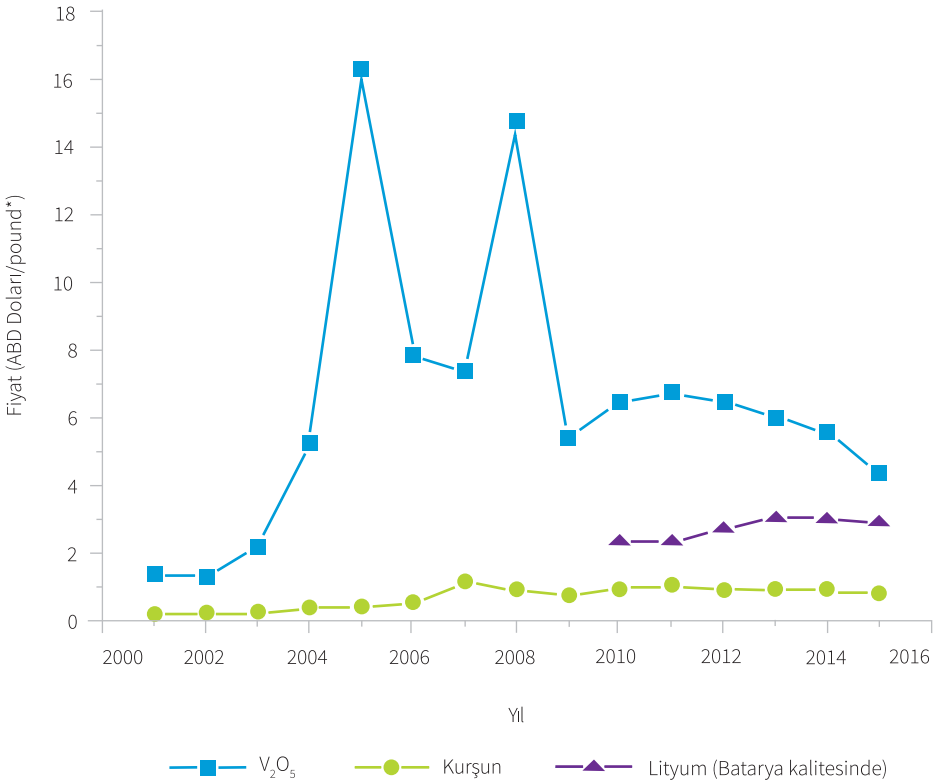
Akışkan bataryaların başlıca dezavantajı, nispeten düşük verimliliğe (örneğin, lityum-iyon bataryaya kıyasla) ve karmaşık sistem yapılarına sahip olmalarıdır. Olası problemler ortaya çıktığı durumlarda bakım ve onarım için yüksek maliyete yol açabilirler. Geleneksel bataryalarla karşılaştırıldığında, pompalar, sensörler ve akışkan yönetim mekanizmaları gerektiren elektrolit çözeltisi sirkülasyonunda olduğu gibi birçok hareketli eleman vardır. Aynı zamanda sistem tasarımlarının, kontrol önlemleri gerektiren asitli sıvıların sızıntı riskini hesaba katması gerekir.

Tablo 14: *Akışkan batarya enerji depolama sistemlerinin genel avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Ortam sıcaklığına yakın çalışabilir	Olası asidik çözeltiler kaçağı
Enerji ve güç özelliklerini bağımsız olarak ölçeklendirebilirler	Sensör ihtiyacı, pompalama ve akış yönetimi mekanizmalarının bakım maliyetlerini artırması
Güç, hücre yığını tasarımı (yani elektrot yüzeyi) tarafından belirlenirken, tanklarda depolanan elektrolit hacmi artırılarak enerji ölçeklendirilebilir	Membran veya elektrolit depolama kapları gibi bazı aktif materyallerin veya ana sistem elemanlarının maliyetlerinin yüksek olması
10.000 tam çevrim üzerinde yaşam ömrü devri sunarlar	
Nispeten ucuz ve bol miktarda bulunan ham maddeleri kullanabilir	
Toplam döngü ömrünü çok fazla etkilemeden çok derin deşarj oranlarına ulaşabilirler	
Elektrolitlerin akışı, ısıyı hücreden uzaklaştırdığı için, ısı kaçaklarını önleyerek iyi güvenlik özellikleri sunarlar. Ayrıca bataryanın çalışması sadece pompaları kapatmak suretiyle durdurulabilir	
Akışkan bataryalar genellikle aşırı şarj veya deşarjdan daha az etkilenir	

Vanadyum, VRFB'nin çevrimi sırasında elektrolit sülfürik asit içinde çözündüğü için ihmal edilebilir bir bozulma gösterir. Bununla birlikte, depolama sistemleri sızıntı sorunlarına eğilimlidir. VRFB, dünya genelinde (örneğin Avustralya, Avrupa, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri) geniş çaplı uygulamalarda, uzun süredir kullanılmış olan tek redoks akışkan batarya teknolojisidir. Bunun yanında vanadyumun ve kullanılan membranların maliyetleri, VRFB teknolojileri için önemli dezavantajlardan biridir. Yüksek performans çelik üretiminde de kullanılan vanadyumun fiyatı, çelik üretim miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte, diğer batarya teknolojilerinin hammaddeleri olan kurşun ve lityuma göre nispeten yüksektir.

Şekil 35: *V_2O_5, Pb ve Li fiyatlarının 2001-2015 yılları arasındaki değişimi*



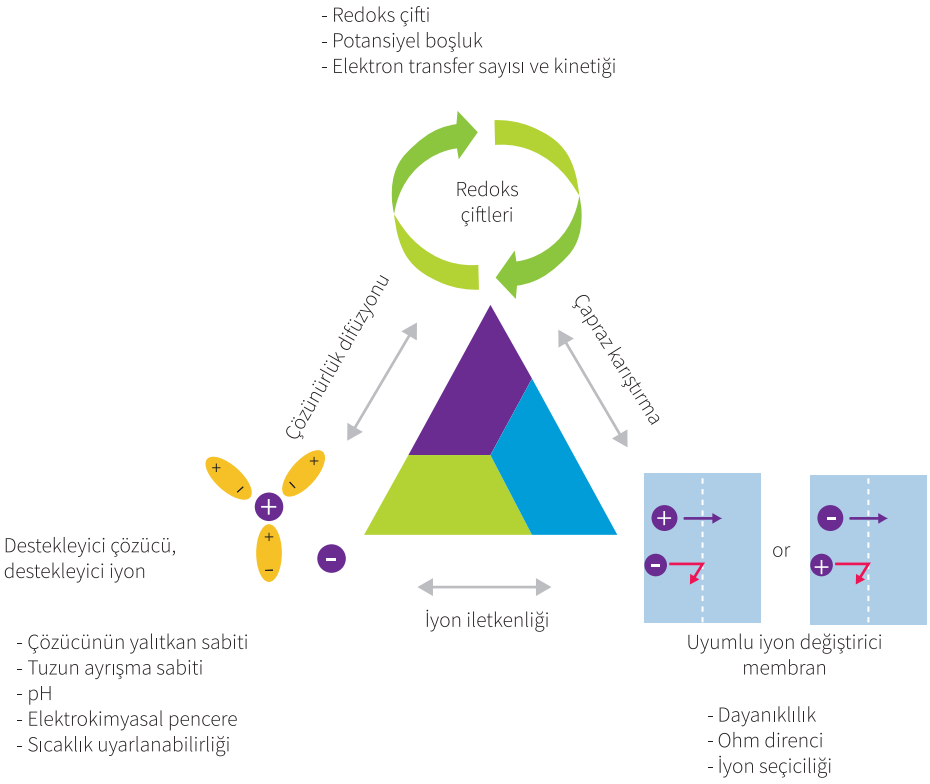
** 1 Pound yaklaşık olarak 0,45 kg'a eşdeğerdir.*
Kaynak: Winsberg et al. (2017)

Tablo 15: *Vanadyum redoks akışkan batarya (VRFB) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Uzun çevrim ömrü sunar (10.000 üstü tam çevrim)	Düşük elektrolit kararlılığı ve çözünürlük, enerji yoğunluğunu sınırlar ve sabit olmayan uygulamalarda düşük spesifik enerji limitleri kullanılır
Nispeten yüksek enerji verimliliği sağlar (%85'e kadar), ancak lityum-iyon bataryalardan daha düşüktür	V_2O_5'in 40°C'nin üzerindeki elektrolit sıcaklıklarda çökeltilmesi, batarya ömrünü ve güvenilirliği düşürebilir, ancak bu yönetilebilir
MW ölçeğinde çoklu gösterime sahip ve yayılmış en olgun akışkan bataryalardandır	Vanadyum ve membran tasarımları yüksek maliyetlidir
Enerji/Güç oranı belirli bir uygulamaya uyacak şekilde optimize edilebilir	Zamanlanmamış elektrolit akış hızları, pompalama enerji gereksinimlerini artırabilir ve enerji verimliliğini azaltabilir
Uzun süreli (2-10 saat), sürekli deşarj ve yüksek deşarj oranları mümkündür	
Hızlı tepki süreleri sunar	
Elektrolit tanklarındaki aktif maddelerde bulunan aynı element, iyon çapraz kirlenmesini sınırlar	
Elektrolit, proje ömrünün sonunda geri kazanılabilir	
Elektrolit nedeniyle ısı çekme, termal kaçak oluşumunu önler	

Akışkan bataryaların daha yaygın hale gelmesinin önünde duran en önemli zorluklardan biri yüksek maliyetli oluşudur. Dolayısıyla yapılan çalışmaların odak noktası maliyet bileşenlerinin düşürülmesidir. Öncelik düşük maliyetli malzemeler ve yüksek çözünürlüğe sahip yeni redoks kimyaları ile sulu sistemlerin geliştirilmesidir. Ancak redoks çiftleri, destekleyici elektrolit ve membran arasında hassas bir denge vardır (Şekil 36). Yeni geliştirilecek her bir bileşenin, diğeri üzerine etkisi olduğu için bütüncül bir yaklaşım gerekmektedir.

Şekil 36: *Akışkan bataryalarda redoks çifti/elektrolit/membran arasındaki denge*



Kaynak: Chen (2019)

4.5 Yenilikçilik için fırsatlar

Akışkan bataryalar, harici depolama tanklarında tutulan bir veya daha fazla elektrolitten ayrılan reaksiyon yığınlarıdır. Aktif malzemelerden biri veya ikisi her zaman elektrolit içerisinde çözelti içindedir. Akışkan bataryalar, güç (enerji değişim hızı) ve sağladıkları enerji (enerji hacmi) bakımından benzersiz özelliklere sahiptir. Güç (kW cinsinden) istiflenen hücre sayısının bir fonksiyonudur. Enerji (kWh) ise pompalarla dolaştırılan elektrolit hacminin bir fonksiyonudur. Akışkan bataryalar genellikle aşırı şarj veya deşarjdan daha az etkilenir. Bu durum, performansta önemli bir bozulma olmadan kullanılabilecekleri anlamına gelir. Çoğu batarya tipi için nadir olan bu özellik, belirgin bir avantaj olan enerji kapasitesinin çoğunluğunu (derin deşarj) kullanırken bile geçerlidir.

Vanadyum redoks akışkan batarya teknolojileri hızla gelişme aşamasındadır. Tüm batarya bileşenlerinin maliyetini düşürmek için AR-GE çalışmalarında önemli bir potansiyel görülmektedir. Bu duruma bir örnek olarak sulu olmayan elektrolitlerin kullanımına ilişkin araştırmalar verilebilir. Bununla birlikte asgari maliyet büyük olasılıkla vanadyum maliyeti ile sınırlı olacaktır. Alternatif reaksiyon kimyasalları, yani vanadyum dışındaki diğer redoks çiftleri kullanılarak akış bataryalarının maliyetini azaltma konusunda önemli bir potansiyel vardır. Şebeke ölçekli redoks akışkan bataryaları, potansiyel olarak çinko-bromür (ZBFB), polisülfür-bromür (PSB) ve demir-krom (ICB) çiftleri şeklinde olabilir. Bu redoks çiftlerinin teknik özelliklerinin VRFB ile karşılaştırması aşağıdaki tabloda verilmiştir. Maliyet dışında sağlayabilecekleri avantajlar daha yüksek voltaj ve özellikle polisülfür-bromür ve çinko-bromürün sahip olduğu yüksek enerji yoğunluğudur. Aktif malzemelerin maliyetleri ise şu şekilde karşılaştırılabilir: V: 27 USD/kg, Cr: 2,8 USD/kg, Fe: 2 USD/kg, Zn: 1,8 USD/kg, Br: 1,5 USD/kg ve S: 1-30 USD/kg.

Tablo 16: *Farklı redoks kimyaları ile VRFB karşılaştırması*

Tür	Açık devre gerilimi	Açık devre gerilimi	Açık devre gerilimi	Kendi kendine aylık deşarj yüzdesi % (20° C derecede)	Çevrim ömrü (çevrimler)[c]	Gidiş-dönüş DC enerji verimliliği
VRFB	1.4	15 (29)[a]	4-12	5-10	5000	70-80%
PSB	1.5	20 (41)	4-12	5-10	2000	60-70%
ICB	1.18	<10	4-12		2000	70-80%[b]
ZBFB	1.8	65 (429)	2-5	12-15	2000	65-75%

[a] *Teorik özgül enerji.*
[b] *Çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak.*
[c] *Derin şarj / deşarj altında sıkça görülen çevrim sayıları, genellikle %20-80*
Kaynak: Yang et al. (2011)

Ayrıca organik redoks mediatörler, hem sulu hem de organik çözücü kullanan sistemler için, üzerinde çalışılan malzemelerdir. Redoks kimyalarında yapılan değişiklikler ile birlikte elektrolitler üzerine çalışmalar da önemli hale gelmektedir.

Tüm redoks kimyası, aktif maddelerin elektrolit içinde çözünürlükleri ile kısıtlı olduğu için; enerji yoğunluğunu artırabilmek adına, yarı-katı akışkan batarya konsepti ortaya atılmıştır. Süspansiyon halinde akışkan kullandığı için sınırsız aktif madde içerebilen bu dizayn, enerji yoğunluğu açısından lityum-iyon bataryalarla karşılaştırılabilir hale gelmesine rağmen, sistemin her parçası için yeni mühendislik çözümleri gerektirmektedir.

Membran malzemeleri erken bozulma ve kirlenmeye karşı hassas ve pahalıdır. Akışkan bataryalar, genellikle uzun süreli enerji tedarik işlemlerinde (tipik olarak 2 ila 10 saat arasında) depolama ve deşarj için kullanılır. Vanadyum redoks akışkan bataryalar, elektrolit olarak kullanılan asidik ortam nedeniyle pahalı polimer membranlara ihtiyaç duymaktadır. Özellikle kimyasal dayanımlarından dolayı tercih edilen Nafion membranlar, farklı oksidasyondaki vanadyum iyonlarının ve suyun yarı hücreler arasında kontrolsüz geçişini engelleyemediği için, batarya kapasitesinin ve enerji verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. SPEEK (sulfonated poly(ether ether ketone)), PEI (polyethyleneimine) gibi farklı katyonik polimerler ve bunların Nafion-hibrit membranları yanı sıra iyonik olmayan, seçici olmamasına rağmen iyon geçirgenliği yüksek gözenekli membranlar alternatif olarak sunulmaktadır.

Diğer taraftan genel batarya performansını artırmak amacıyla donanım iyileştirmeleri yapılmalıdır. Üzerinde durulması gereken bir konu olarak elektrot yığınının yeniden dizayn edilmesi örnek verilebilir. Kimyasallar özelinde ise maliyet gereksinimlerine uyularak, elektrotun performansını artıracak daha optimal bir etken kompleksi kullanılabilir. Redoks akışkan bataryalarda (çoğu araştırma aşamasında olan), vanadyum-vanadyum, bromür-polisülfid, çinko-bromür, çinko-seryum, magnezyum-vanadyum, vanadyum-seryum, vanadyum-bromür, vanadyum-polihaid, vanadyum-oksijen ve hidrojen-bromür gibi sulu ve susuz çözeltiler de dahil olmak üzere çeşitli kimyasallar kullanılabilir. Kinon-bromür gibi (organik kinonlara dayalı) diğer kimyasallar da araştırılmaktadır, fakat henüz rekabetçi endüstriyel ortamdan uzak görünmektedirler. Diğer kimyasallarla ümit verici sonuçlar alınmış olmasına rağmen, VRFB'lerde kullanılan vanadyum kimyası (V-V), şu ana kadarki en iyi geliştirilmiş seçenektir.

5. Yüksek Sıcaklıklı Batarya

- Sodyum sülfür bataryalar (NaS), tipik olarak 300°C ile 350°C arasında, sodyum nikel klorür batarya ise 250°C ile 350°C arasında çalışır. Yüksek sıcaklıkta çalışma, aktif tuz malzemelerinin sıvı halde kalmasını ve elektrolitin yeterli iletkenliğini sağlar.

- Sodyum metalinin yer kabuğunda en çok bulunan dördüncü element olması, büyük ölçüde sodyum kullanan yüksek sıcaklıklı bataryaları avantajlı kılan önemli etkenlerdendir. Tüm kaynakların yaklaşık %99'unu sağlayan Şili, Çin, Avusturalya ve Arjantin olmak üzere dünyanın pek çok bölgesinde bulunan sodyum 2.100 ABD doları/ton olarak fiyatlandırılmaktadır. Yüksek sıcaklıklı bataryaların bir diğer avantajı da çalışma sırasında emisyon üretmemeleri ve batarya malzemelerinin toplam ağırlığının %99'undan fazlasının (çelik, bakır ve alüminyum) geri dönüştürülebilir olmasıdır.

- Korozyon sorunları, yüksek sıcaklıklı batarya hücre ömürlerinin hızlıca bitmesine neden olan en önemli etkenlerdendir. Bunlar özellikle sabit depolama uygulamalarında tercih edilen daha büyük hücreleri etkileyebilir. Bu bataryalardan daha düşük hizmet maliyeti elde etmek ve bataryaların ömrünü uzatmak için korozyona karşı dayanıklı malzemeler, kaplamalar ve bağlantılar geliştirmeye devam etmek önemlidir. Yüksek sıcaklıklı bataryalar, elektrik depolama işlemini makul bir fiyata sağlama potansiyeli sunar. Özellikle NaS bataryalar, düşük maliyetli aktif malzemeleri nedeniyle 2016 yılında 263 ila 735 ABD doları/ kWh arasında değişen bir kurulum maliyeti ve 2030 yılına kadar %75'e varan maliyet düşme potansiyeli ile popüler olmuştur.

- NaS batarya veya sıvı metal batarya, sodyum ve sülfürden yapılmış bir tür erimiş metal bataryadır. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj ve deşarj verimliliği (%89 - %92) ve uzun bir kullanım ömrü sunarken, düşük maliyetli malzemelerden üretilirler. Bununla birlikte, 300°C - 350°C arasındaki yüksek çalışma sıcaklıkları ve sodyum polisülfürlerin yüksek korozif doğası nedeniyle, bu tür hücreler öncelikle elektrik şebekesi enerji depolaması gibi büyük ölçekli mobil olmayan uygulamalar için kullanılır.

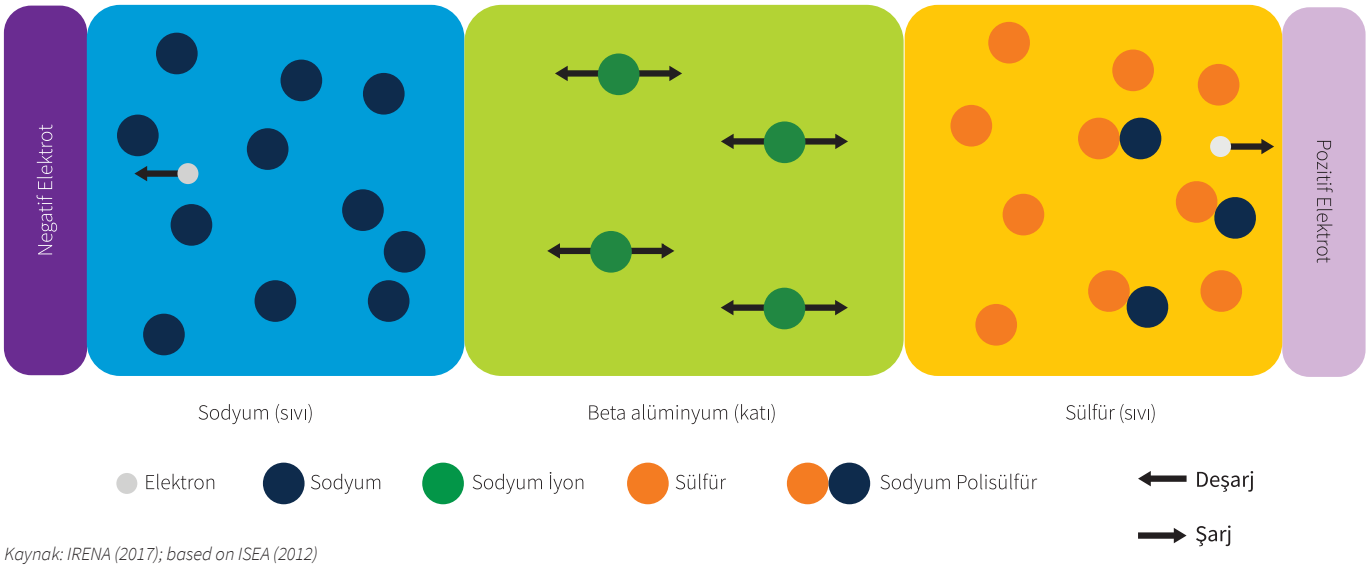
- Teknolojinin geliştirme potansiyelinin ne kadar olduğu konusunda ölçülen bir değer olmamakla birlikte, potansiyelin hem teknik hem de finansal açıdan bakıldığında önemli olduğu tahmin edilmektedir. Bataryanın tüm kritik bileşenleri aktif olarak araştırılmaktadır. Bu geliştirmelere Beta-alüminyum katı elektrolit (BASE), sızdırmazlık malzemeleri, sodyum elektrot, katot ve batarya ara yüzleri de dahildir.

5.1 Mevcut Teknoloji

Yüksek sıcaklıklı batarya teknolojisi, sıvı aktif malzemeler ve beta-alüminyumdan (β "-Al_20_3 sodyum-iyon iletken membran) yapılmış katı bir seramik elektrolit kullanır. Yüksek sıcaklıklı batarya denmesinin nedeni aktif malzemeleri sıvı halde tutmak için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymasından kaynaklanır. Beta-alüminyum katı elektrolit (veya BASE), bataryanın elektrotları arasındaki ayırıcı olarak da işlev görür. Genel olarak bu yapıdaki anot materyali erimiş sodyumdur (Na) ve bu nedenle bu depolama sistemleri ailesinde "sodyum beta" veya "sodyum beta alüminyum" batarya olarak bilinir. Batarya teknolojisi, enerjiyi depolamak ve serbest bırakmak için membran

boyunca sodyum-iyon taşınmasına dayanır. Sıvı sodyum kullanan yüksek sıcaklıklı batarya sistemlerinden en yüksek teknoloji olgunluk seviyesine ulaşmış olan iki ana tür, sodyum sülfür (NaS) ve "ZEBRA" olarak da bilinen sodyum-nikel klorür ($Na-NiCl_2$) bataryalardır. NaS bataryalarda, katot için en yaygın konfigürasyon erimiş sülfürdür (Şekil 37).

Şekil 37: *Sodyum-sülfür bataryanın çalışma şekli*



Kaynak: IRENA (2017); based on ISEA (2012)

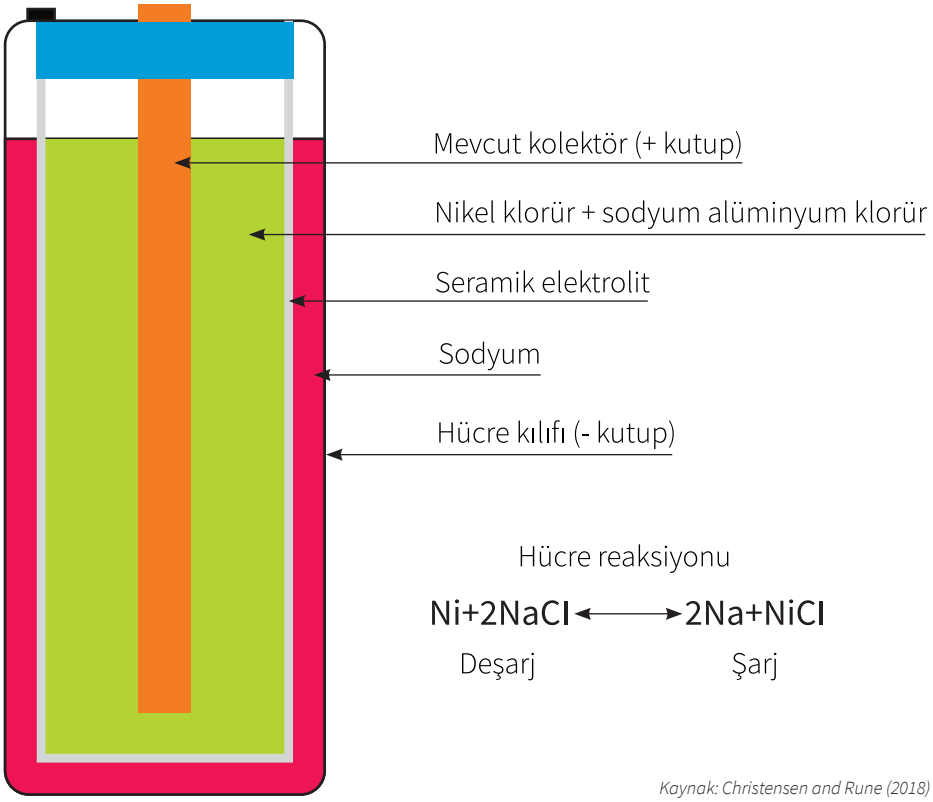
Katot materyali olarak nikel klorürün kullanıldığı $Na-NiCl_2$ batarya teknolojisinde ise sodyum iyonunun taşınmasını sağlamak için ikincil bir sıvı elektrolit, sodyum alüminyum klorür ($NaAlCl_2$), kullanılır. Bu ikisi ticari olarak en uygun teknolojilerdir. NaS bataryaları tipik olarak 300°C ile 350°C arasında, sodyum nikel klorür batarya ise 250°C ile 350°C arasında çalışır. Yüksek sıcaklıkta çalışma, aktif tuz malzemelerinin sıvı halde kalmasını ve elektrolitin yeterli iletkenliğini sağlar.

Sodyum sülfür bataryalar (NaS), pozitif elektrot olarak erimiş sülfür (erime sıcaklığı, T_m = 115°C) ve negatif olarak erimiş sodyum (T_m = 98°C) kullanan bir tür erimiş tuzlu batarya teknolojisidir. İki elektrot, elektrolit olarak da görev yapan katı bir seramik sodyum alüminyum ile ayrılır. Deşarj sırasında elektronlar sodyum metal atomlarından salınır ve elektrolit boyunca pozitif elektrotlara ilerleyerek elektrik üreten sodyum iyonlarının oluşumuna yol açar. NaS bataryaları yüksek sıcaklıklarda çalışmalarından dolayı çoğu durumda harici ısıtıcılar gerekir. Yaklaşık %90 seviyelerinde yüksek gidiş-dönüş verimliliğine sahiptirler. Spesifik enerji 150 Wh/kg veya daha yüksektir; spesifik gücü ise 200 W/kg seviyelerindedir. Genellikle yenilenebilir enerji üretimini dengelemek ve yan hizmetler sağlamak için kullanılırlar. NaS bataryalar, düşük maliyetli ham madde kullanımı, büyük tek hücre (≥1200 W h) hazırlayabilme esnekliği, uzun ömür (15 yıl ve üzeri ya da 4500 çevrim) ve yüksek spesifik enerji (222 W h/kg) sağlayabilme özellikleri ile büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için büyük avantajlar getirebilmektedirler.

Sodyum-nikel klorür ($Na-NiCl_2$), "ZEBRA" batarya (Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Projesi, "Zeolite Battery Research Africa projesi") olarak da bilinen ikincil (yani şarj edilebilir) bataryalardır. $Na-NiCl_2$ batarya teknolojisi daha olgun olan NaS bataryalara benzer bir batarya kimyasına ve çalışma prensibine sahiptir. Bir $Na-NiCl_2$ batarya hücresinin ana bileşenleri, erimiş sodyum anot, bir seramik β-alüminyum oksit katı

hal elektroliti (BASE) ve reaktifin $NiCl_2$ olduğu gözenekli bir katottur. Katot ayrıca yeterli iyonik iletkenlik elde etmek için sıvı NaAlCl4 içerir. Hem güç yoğun hem de enerji yoğun elektrik enerjisi depolamaları için uygundur. ZEBRA bataryalar 120 Wh/kg spesifik enerji ve 180 W/kg spesifik güç sağlayabilirler. Hem şebeke seviyesinde hem de elektrikli ve hibrit araçlar gibi mobil uygulamalar için kullanılabilirler.

Şekil 38: *Na-$NiCl_2$ batarya hücresi, seramik elektrolit BASE'dir.*



Kaynak: Christensen and Rune (2018)

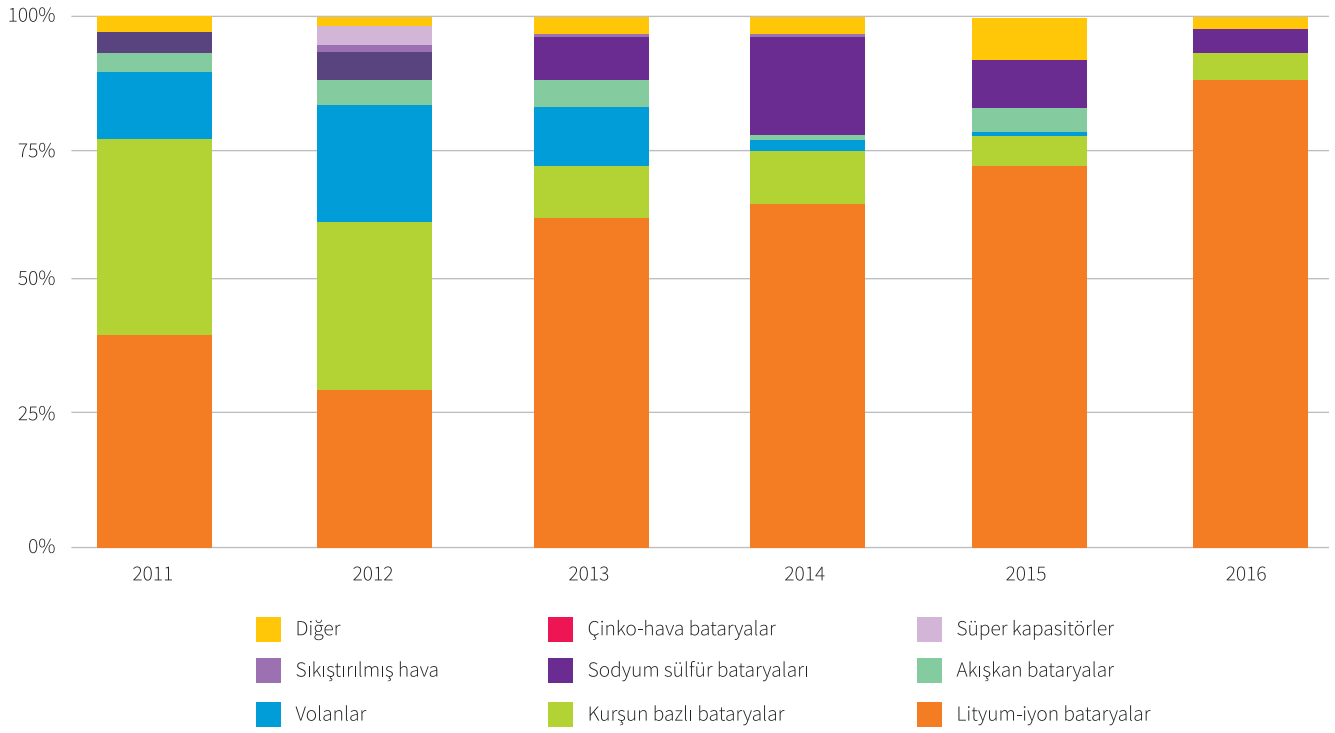
5.2 Piyasa Durumu

Yüksek sıcaklıklı bataryalar yeni bir teknoloji olmamasına rağmen, teknolojisinde yaşanan hızlı gelişmeler ile gelecek vaat eden çevresel performansa sahip bataryalar arasında gösterilmektedir. Sodyum, doğada saf ve element halinde bulunmaz. Aksine doğal bileşiklerde bol bulunan elementlerdendir. Sodyum metalinin yer kabuğunda en çok bulunan dördüncü element olması, büyük ölçüde sodyum kullanan yüksek sıcaklıklı bataryaları avantajlı kılan önemli etkenlerdendir. Sodyum metali, kuru erimiş sodyum kloridin elektrolizi ile üretilir. Tüm kaynakların yaklaşık %99'unu sağlayan Şili, Çin, Avusturalya ve Arjantin olmak üzere dünyanın pek çok bölgesinde bulunan metalik sodyum 2.100 ABD doları/ton olarak fiyatlandırılmaktadır.

Yüksek sıcaklıklı bataryaların bir diğer avantajı da çalışma sırasında emisyon üretmemeleri ve batarya malzemelerinin toplam ağırlığının %99'undan fazlasının (çelik, bakır ve alüminyum) geri dönüştürülebilir olmasıdır. Bununla birlikte, sodyum ve sülfürün geri dönüşümü hâlâ bir zorluk olarak görülür. Batarya üreticileri güvenlik önlemlerinin arttığını söylemesine rağmen, Japonya'da 2011'de meydana gelen büyük bir yangın olayından sonra, NaS batarya teknolojisinin kullanılmasında güvenlik endişeleri halen sürmektedir.

ZEBRA batarya olarak da bilinen Na-$NiCl_2$, NaS'den daha güvenlidir. Şebeke depolama uygulamalarının yanı sıra, elektrikli ve hibrit araçlar için uygun olabilirler. Artan montaj boyutlarından kaynaklanan önemli finansal faydalar, üreticilerle birlikte yapılacak işbirlikleriyle gelişim gösterebilir. Na-$NiCl_2$ bataryalar yüksek ticari potansiyele sahip olsalar da, alternatif depolama çözümlerinin, örneğin lityum-iyon bataryaların ticari yayılımı, Na-$NiCl_2$ bataryaların teknolojik gelişimini durdurabilir. Bu, Na-$NiCl_2$ bataryaların tam ticari potansiyele ulaşmasını önleyebilir (Şekil 39).

Şekil 39: *Enerji depolama teknolojilerinin yüzdesel dağılımı (Pompaj hidroelektrik hariç)*



Kaynak: IEA Energy storage (2019)

Vaka Analizi: Rokkasho, Aomori, Japonya, rüzgar enerjisi zaman kaydırma ve frekans tepkisi

"NGK Insulators", Japonya'nın kuzeyindeki 51 MW'lık bir rüzgar çiftliğine 34 MW/204 MWh kapasiteli sodyum sülfür batarya sağlamıştır. Proje 2008 yılında hayata geçirilmiştir. NaS bataryalar, düşük talep dönemlerinde geceleri fazladan üretilen enerjiyi depolayarak, daha sonra gündüz yüksek talep zamanlarında satılmasını sağlar. Bu sayede sisteme daha çok rüzgar entegrasyonu sağlanmasına ön ayak olur. Bataryalar ayrıca rezerv tutulması ve frekans tepkisi sağlamak için de kullanılabilir. Bölgedeki tuzlu havadan korumak için uygun bir yerde tutulan bataryalar, toplam 17 adet 2 MW'lık batarya ünitesinden oluşur.

Tablo 17: *"NGK Insulators" sodyum sülfür batarya teknik özellikleri*

Takvim ömrü (yıl)	Çevrim ömrü	Depolama süresi	Verimlilik (DC-DC)	Minimum deşarj süresi	Enerji yoğunluğu	Bakım	Çalışma sıcaklığı
15 yıl	4500	6 saat	85%	2 milisaniye	Yaklaşık 1500 ft^2 / MW	minimal planlı bakım (pompalar, supaplar veya ısı eşanjörleri yok)	300-350

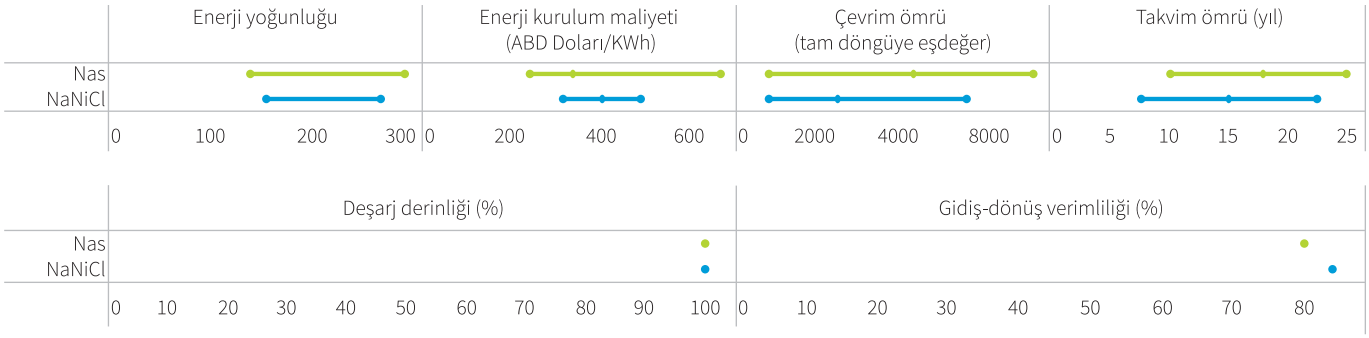
Kaynak: IRENA (2015), based on Abe, H. (2013)

5.3 Maliyet ve Yatırımlar

NaS bataryalar, Japonya'daki elektrik şebeke uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır (örneğin rüzgar santrallerinde yük kaydırma şeklinde). Ülke genelinde 170'ten fazla projeye 300 MW'tan fazla NaS depolama kapasitesi kurulmuştur. Örneğin, Tokyo Elektrik Şirketi, 1990'lı yıllardan beri Tokyo'da yük kaydırma için 6 MW/48 MWh kapasiteli sabit depolama sistemi kullanmaktadır. NaS projelerinin çoğu başlangıçta Japonya'da gerçekleşmiş olsa da, bu durum zamanla değişmiş ve operasyonel deneyim bu ülkeye özgü olmaktan çıkmıştır.

NaS batarya sistemlerinin avantajları, redoks akışkan ve kurşun asit teknolojilerine kıyasla nispeten yüksek enerji yoğunlukları içerir ve bunlar lityum-iyon enerji yoğunluğu aralığının düşük seviyeleri civarındadır. NaS sistemlerinin enerji yoğunluğu 140 Wh/L ve 300 Wh/L arasındadır, ancak güç yoğunluğu tahmini tipik olarak 140 W/L'ye ulaşmaktadır. Bu bataryalar, yüksek darbe güçleri için deşarj yapabilme avantajı ile (250 MWh civarında yüksek kapasiteye sahip olanlar da dahil olmak üzere) günlük çevrim kullanımına uygun, nispeten kompakt sistemlerdir.

Şekil 40: *Yüksek sıcaklıklı batarya elektrik depolama sistemlerinin özellikleri*



Kaynak: IRENA (2017)

NaS bataryaları nispeten düşük maliyetlerle yüksek çevrim ömrü potansiyeli sunarken, seramik elektrolit sızdırmazlığı ve güvenlik sistemi ile ilgili bazı kısıtları devam etmektedir. NaS sisteminin ana dezavantajı, göreceli yüksek yıllık işletme maliyetidir. Maliyetler 40 ila 70 USD/kW arasında bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışma göz önüne alındığında, batarya rölantide çalışırken nominal gücünün yaklaşık %3'ünü tüketebilen bir termal muhafaza ve elektrikli ısıtıcı gerektirir. Isıtıcı ya çalışma başlangıcında hücreleri ısıtmaya ya da bataryanın doğru çalışma sıcaklığında olduğu zamanlarda ısı kaybını dengelemeye hizmet eder, ancak sistem rölantide çalışmaktadır. Normal çalışma sırasında sisteme ilave ısı aktarmaya gerek yoktur, çünkü kimyasal reaksiyon ve hücrelerdeki ohm direnci ısıtma etkisi nedeniyle sıcaklık korunur.

Makul enerji yoğunluğu ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle NaS bataryaların sadece sabit uygulamalar için değil, mobil uygulamalar için de kullanması uygun gözükmektedir. Bununla birlikte çözümlenmesi gereken bazı konular halen söz konusudur. Bir çarpışma durumunda seramik elektrolit, mekanik olarak zarar görebilir ve erimiş sodyum ile erimiş sülfür arasında gerçekleşmemiş patlamaya sebep olabilecek reaksiyonlar meydana gelebilir. Bu potansiyel olarak kaza yerini tehlikeye atabilir. Sonuç olarak NaS bataryalar şimdiye kadar yalnızca sabit uygulamalarda ticarileştirilebildiler.

Sodyum sülfür depolama teknolojisine benzer bir çalışma prensibi kullanan sodyum nikel klorür (Na-$NiCl_2$) batarya (genellikle ZEBRA olarak adlandırılır), iyi enerji yoğunluğu ve düşük bakım maliyetleri sağlar. Teknoloji, NaS bataryasında olduğu gibi birincil seramik elektrolit olarak BASE'i kullanır, ancak sodyum transferine yardımcı olmak için ikincil bir elektrolit ($NaAlCl_4$) ihtiyacı vardır. Bu ikincil elektrolitin erime noktası, ZEBRA hücrelerinin minimum çalışma sıcaklığını 157°C'de ayarlar. Bu sayede hücrede kendinden daha güvenli reaksiyonlara yol açarak yangın riskinin ihmal edilebilir olduğunu gösterir. NaS bataryaların aksine, Na-$NiCl_2$'nin aktif maddeleri daha az aşındırıcıdır ve bu da hücreyi mobil uygulamalar için uygun hale getirir. Teknoloji bu tür uygulamalarda test edilmiş olsa da, araştırmalar artık sabit uygulamalarda kullanımlarına odaklanmaktadır.

Yüksek sıcaklıklı bataryalar, elektrik depolama işlemini makul bir fiyata sağlama potansiyeli sunar. Özellikle NaS bataryalar, düşük maliyetli aktif malzemeleri nedeniyle 2016 yılında kilovatsaat başına 263 ila 735 ABD doları arasında değişen bir kurulum maliyeti ve 2030 yılına kadar %75'e varan maliyet düşme potansiyeli ile popüler olmuştur. NaS batarya sistem enerji kurulum maliyeti 2030 itibariyle 120 ile 330 ABD doları/kWh arasında bir değere düşebilir. 2016 yılında sodyum nikel klorürlü bataryaların enerji kurulum maliyeti 315 ila 490 ABD doları/kWh arasında değişmekte olup 2030'da potansiyel olarak 130 ile 200 ABD doları/kWh arasında olacağı öngörülmektedir.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin "Sistem esnekliğini artırmak için gereken seçeneklerin maliyet ve faydaları" çalışmasında, yüksek sıcaklıklı batarya teknolojilerinin kWh başına maliyetlerine ilaveten, 2020 yılında Türkiye iletim şebekesi seviyesinde 600 MW'lık enerji depolama tesisi kurulması durumunda toplam yatırım maliyetlerinin tahmini olarak ne olacağı gösterilmiştir (Tablo 18). Bu tahmini yatırım maliyeti değerleri hesaplanırken, 300 MW'lık kısmının sekonder frekans kontrolü, diğer 300 MW'lık kısmının ise enerji kaydırma işlemi için kullanılacağı öngörülmüştür.

Tablo 18: *Yüksek sıcaklıklı batarya teknolojilerinin tahmini maliyetleri*

Depolama Teknolojisi	Enerji kurulum maliyeti (ABD doları/kWh)	600 MW'lık batarya depolama tesis toplam yatırım maliyeti (Milyon ABD doları)
NaS	210	701,28
Na-$NiCl_2$	310	1.001,28

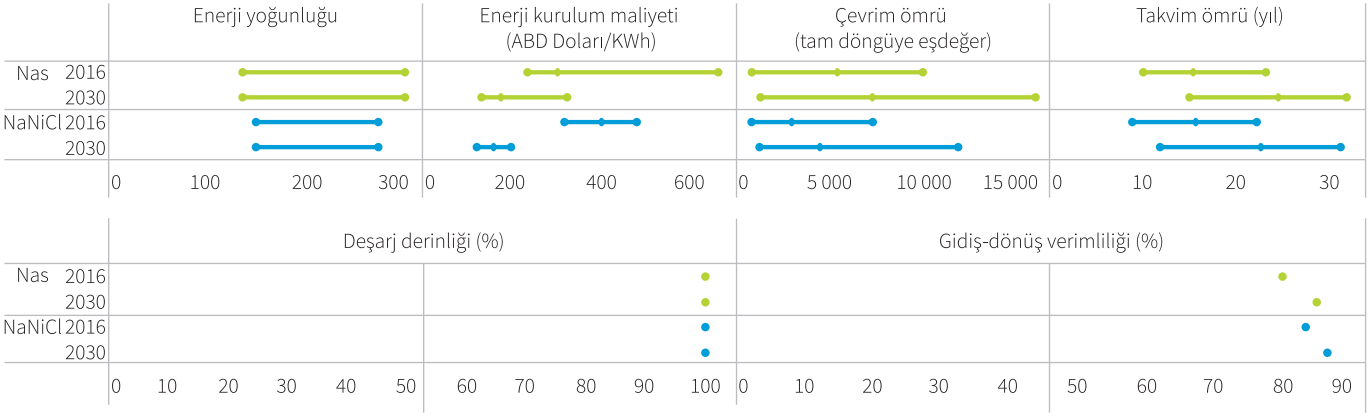
Kaynak: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi

Korozyon sorunları, yüksek sıcaklıklı batarya hücre ömürlerinin hızlıca bitmesine neden olan en önemli etkenlerdendir. Bunlar özellikle sabit depolama uygulamalarında tercih edilen daha büyük hücreleri etkileyebilir. Bu bataryalardan daha düşük hizmet maliyeti elde etmek ve bataryaların ömrünü uzatmak için korozyona karşı dayanıklı malzemeler, kaplamalar ve bağlantılar geliştirmeye devam etmek önemlidir. Başka bir araştırma potansiyeli, sodyum beta batarya sistemlerinde tatmin edici elektrokimyasal aktivite elde etmek için gerekli olan yüksek çalışma sıcaklıklarının düşürülmesini içerir. BASE seramik elektroliti ile iyon transferini artırmaya odaklanmak ise başka bir çalışma alanı olabilir. Bazen, BASE yüzeyindeki nem nedeniyle, iyonların sodyum anottan BASE seramik elektroliti boyunca taşınmasını önleyen bir sodyum oksit tabakası oluşur. BASE'in kaplanması veya kurşun ya da bizmut eklenerek sodyum anotunun değiştirilmesinin sıcaklıkların düşürülmesinde etkili olduğunu kanıtlamıştır, ancak 200°C'nin altında bozulma başlar. Düzlemsel sodyum metal halojenür bataryaların

kullanılması gibi diğer yaklaşımlar (geleneksel boru tasarımının yerine), 190°C'lik daha düşük hücre çalışma sıcaklıklarının elde edilmesinde umut verici sonuçlar vermiştir. Hücre anodu olarak yeni sodyum materyalleriyle yapılan diğer deneyler (örneğin, sodyum-sezyum alaşımları), hücrenin bu sıcaklıktan bile daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını mümkün kılar ve deney hücreleri 95°C kadar düşük bir sıcaklıkta iyi performans sonuçları gösterir.

BASE seramik elektrolitinin çalışma sıcaklığının tamamen katı halde bir hücre çalışmasını sağlayacak kadar düşük olmasını sağlamak için başka bir malzeme ile değiştirilmesi, devam eden araştırmaların odak noktasıdır. Son birkaç yılda, iletkenlik potansiyeli yüksek olan çeşitli "sodyum süper iyonik iletkenler" tanımlanıp incelenmiştir. Böylece daha güvenli ve daha yüksek enerji yoğunluğu olan tüm katı hal sodyum batarya sistemlerinin önü açılmış oldu. Örneğin bir katı elektrolit tetra tiyofosfat (Na_3PS_4) çalışması, gelecekte tüm katı hal sodyum iyon bataryaların ticarileşmesine yol açabilecek olumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Şekil 41: *Yüksek sıcaklıklı batarya elektrik depolama sistemleri özelliklerinin 2016 ve 2030 yılları için tahmini karşılaştırılması*



Kaynak: IRENA (2017)

5.4 Bariyerler

NaS batarya veya sıvı metal batarya, sodyum ve sülfürden yapılmış bir tür erimiş metal bataryadır. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj ve deşarj verimliliği (%89 - %92) ve uzun bir kullanım ömrü sunarken, düşük maliyetli malzemelerden üretilirler. Bununla birlikte, 300°C - 350°C arasındaki yüksek çalışma sıcaklıkları ve sodyum polisülfürlerin yüksek korozif doğası nedeniyle, bu tür hücreler öncelikle elektrik şebekesi enerji depolama uygulamaları gibi büyük ölçekli mobil olmayan sistemler için kullanılır.

Tablo 19: *Sodyum sülfür batarya (NaS) teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları*

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük maliyet potansiyeli: Pahalı olmayan hammaddeler ve bakım gerektirmeyen sızdırmazlık	300°C'nin üzerinde çalıştırılması gerekir
Yüksek çevrim ömrü: Sıvı elektrotlar	Suya maruz kaldığında yanıcı olan metalik sodyumun (kurulum aşamasında kullanılan malzemenin bir kısmı) yüksek oranda reaktif doğası
İyi enerji ve güç yoğunluğu: Düşük yoğunluklu aktif malzemeler, yüksek hücre voltajı	Seramik elektrolitin kırılma olasılığı: Karışan aktif malzemeler arasında istenmeyen, tehlikeli tepkimeler
Esnek çalışma: Çok çeşitli koşullarda işlevsel hücreler (oran, deşarj derinliği, sıcaklık)	Sızıntıyı önlemek için kapalı yapıyı inşa etmenin ekstra maliyeti
Yüksek enerji verimliliği: %100 coulomb verimi, makul direnç	Sıkı çalışma ve bakım gereksinimleri
Ortam koşullarından etkilenmeme: Sızdırmaz yüksek sıcaklık sistemleri	
Şarj durum göstergesi: Voltaj artışı, şarj ve deşarj	

Diğer bataryalarla karşılaştırıldığında, Na-$NiCl_2$ bataryaların güvenilir olmaları ve düşük bakım gerektirmeleri ön plana çıkmaktadır. Na-$NiCl_2$ yüksek sıcaklıklı batarya olmasına rağmen, NaS bataryalardan daha düşük sıcaklıklarda çalışabilirler. NaS bataryaların aksine tekrar tekrar soğutmaya ve bozulma olmadan tekrar ısıtmaya dayanabilirler. Önemli darbe gücü özelliklerine sahiptirler, yani kısa süre için derecelendirilenden daha yüksek güçte çalışabilirler. En verimli büyük ölçekli bataryalar arasındadır. Yüksek reaktif erimiş sodyum elektrotuna ve yüksek sıcaklıklara rağmen, iç güvenlik özellikleri nedeniyle nispeten güvenli olarak kabul edilirler.

Hem enerji hem de güç yoğun uygulamalar için şebeke ölçeğinde uygulamalarda kullanımları, diğer batarya teknolojilerine kıyasla halen pahalıdır. Şu anda sadece bir ticari üreticisi vardır. Enerji depolama kapasitesi, hammadde maliyetlerinin %47 ila %60 arasında bir değerde bulunan nikel kullanımına doğrudan bağlıdır. Nikel maliyeti, şu anda genel toplam batarya maliyeti için kritik bir öneme sahip değildir, ancak çoklu üretim sayesinde maliyetlerin düşmesinde önemli hale gelebilir.

Tablo 20: *Enerji depolama uygulamaları için diğer teknolojilere kıyasla Na$NiCl_2$ bataryaların genel avantajları ve dezavantajları*

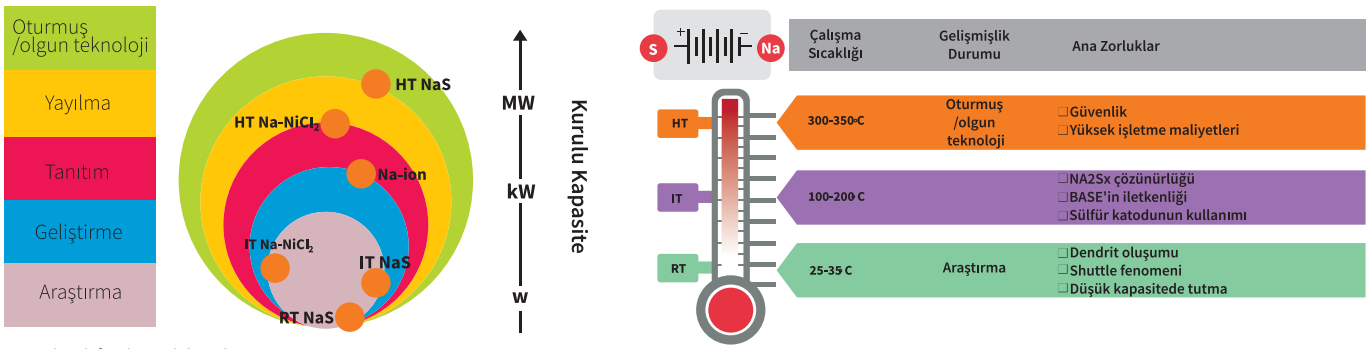
Avantajlar	Dezavantajlar
Kısa tepki süreleri ve esnek kurulum boyutu	Nispeten kısa ömür
Yüksek enerji verimliliği ve çok yönlü uygulama olanağı	Büyük yatırım maliyetleri gerekliliği
Nispeten kompakt bir yapı ve düşük bakım maliyeti	

5.5 Yenilikçilik için fırsatlar

Teknolojinin geliştirme potansiyelinin ne kadar olduğu konusunda ölçülen bir değer olmamakla birlikte, potansiyelin hem teknik hem de finansal açıdan bakıldığında önemli olduğu tahmin edilmektedir. Bataryanın tüm kritik bileşenleri aktif olarak araştırılmaktadır. Bu geliştirmelere BASE, sızdırmazlık malzemeleri, sodyum elektrot, katot ve batarya ara yüzleri de dahildir. Araştırma çalışmaları özellikle BASE ile geometri optimizasyonlarına ve sodyum iyonik iletkenliğinin iyileştirilmesine odaklanmıştır. BASE'in hem mekanik sağlamlığının hem de iyonik iletkenliğinin artırılması için izlenilen stratejiler arasında Ni^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+} ve Ti^{4+} gibi elementler ile katkılandırma, daha ince yoğun bir tabaka ve daha kalın gözenekli bir tabakadan oluşan çift-katmanlı bir yapı, farklı proses şartları sıralanabilir. Ayrıca BASE'in yerini alacak yeni katı elektrolitler (NASICON, Na_3PS_4 gibi cam-seramikler, PEO ve PVDF-HFP gibi polimer elektrolitler) de dikkate alınmaktadır. Özellikle daha düşük sıcaklıklarda çalışabilen NaS bataryalar üzerindeki beklentiler ve çalışmalar arttıkça, katı elektrolitin düşük sıcaklıklardaki iyon iletkenlikleri daha da önem kazanmaktadır. Araştırmalar, aynı zamanda batarya özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilecek kimya alanında yapılan ufak geliştirmelere dayanmaktadır. NaS ve Na-$NiCl_2$ bataryaların benzer özellikleri nedeniyle, araştırma ve geliştirme çabalarında sinerjiler beklenebilir. Her iki batarya sisteminin avantajlarını bir araya getirebilecek Na-S/$NiCl_2$ hibrit sistemler üzerine de çalışmalar mevcuttur. Aktif malzeme olarak Ni, NaCl ve Na_2S ve katolit olarak $NaAlCl_4$ kullanılan bu hibrit sistem ile erimiş polisülfürlerin korozif özelliklerinden kaynaklı kısıtlamaları ortadan kaldırırken, daha düşük sıcaklıklarda (280°C) çalışabilme imkânı ortaya konmuştur.

NaS bataryalarının çalışma sıcaklığını düşürmek, bozulma mekanizmalarını yavaşlatarak güvenliğini, maliyetini ve dayanıklılığını artırmak için önemli bir kriterdir. Yakın zamanda yapılan bir araştırmada, Na_2S_4 eritilmiş bir sıvı katolit ile bir Beta-alüminyum elektrolit vasıtasıyla ayrılan erimiş sodyum kullanılarak, işlem sıcaklığının 150°C'ye düşürülmesi üzerine çalışılmıştır. Diğer araştırmalar, sulu olmayan elektrolitte bir sülfür-karbon kompozit katodunu kullanarak NaS bataryasının çalışmasını oda sıcaklığına düşürmeyi amaçlamaktadır. Oda sıcaklığındaki NaS bataryalardaki önemli olan ve aşılması gereken zorluklar ise, elektrokimyasal olarak aktif olmayan polisülfürler oluşması, oda sıcaklığında katı olan sodyumun dendrit oluşturarak bataryada kısa devre oluşturma riski, kendi kendine deşarj ve daha kısa çevrim ömrüdür. Kısaca, düşük sıcaklık ve oda sıcaklığındaki sodyum esaslı bataryalar üzerine yapılan çalışmalar henüz araştırma-geliştirme seviyesinde olup çözülmesi gereken sorunlar barındırmakla birlikte gelecek vadetmektedirler.

Şekil 42: *Sodyum-esaslı teknolojilerin mevcut durumu ve çözülmesi gereken sorunlar*



Kaynak: Nikiforidis et al. (2019)

Kaynaklar

Alex Scott, 2019. In the battery materials world, the anode's time has come, Chemical & Engineering News, 97 (14).

Asian Development Bank, 2018. Handbook on Battery Energy Storage System.

Avicenne Energy, Mike Sanders, 2017. Lithium-ion Battery Raw Material Supply and Demand 2016 – 2025. San Francisco, CA, USA.

Badea G., Raboaca S. M., Felseghi R.A., Aşchilean I. and Naghiu G.S. Integration of a VRFB in a hybrid system. Building Services Engineering Department, Technical University of Cluj-Napoca. National R&D Institute for Cryogenic and Isotopic Tecnologies ICSI, Romania.

Bushveld Minerals, 2018. Energy Storage & Vanadium Redox Flow Batteries 101.

Cavanagh K, Ward J K, Behrens S, Bhatt A I, Ratnam E L, Oliver E and Hayward J., 2015. Electrical energy storage: technology overview and applications. CSIRO, Australia.

Chen, R., 2019 Toward High-Voltage, Energy-Dense, and Durable Aqueous Organic Redox Flow Batteries: Role of the Supporting Electrolytes.

Christensen, R.,2018. Na-$NiCl_2$ batteries. In Technology Data for Energy storage: November 2018 (pp. 147-160). [183] Danish Energy Agency.

Christensen, R. 2018. Vanadium Redox Flow Battery. In Technology Data for Energy storage: November 2018 (pp. 113-146). [181] Danish Energy Agency.

C. I. Stefan, 2018. High Energy Density and Specific Energy Silicon Anode-based Batteries, 48th Power Sources Conference, Denver, CO, USA.

CNESA, 2019. Energy Storage Industry White Paper. China Energy Storage Alliance, China.

Duduta M, Ho B and Wood VC et al., 2011 Semi-solid lithium rechargeable flow battery. Adv Energy Mater, 1, 511–6.

Geoffrey J. May, Alistair Davidson, Boris Monahov. 2018 Lead batteries for utility energy storage: A review. J. of Energy Storage, 15, 145

Ghassan Zubi, Rodolfo Dufo-López, Monica Carvalho, Guzay Pasaoglu, 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, Elsevier Ltd, Zaragoza, Spain.

Ghent University, 2013. Current and future development of battery technology and its suitability within smart grids.

Hueso, K. B., Palomares, V., Armand, M. and Rojo, T., 2017. Challenges and perspectives on high and intermediate-temperature sodium batteries, Nano Res, 10, 4082.

https://global.nissannews.com

https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/vanadium-redox-batteries-market, Mart 2019.

https://arcactive.com/ (Temmuz, 2019).

https://www.globenewswire.com/news-release/2019/03/18/1756530/0/en/Lithium-Ion-Battery-Market-To-Reach-USD-109-72-Billion-By-2026.html

https://www.iea.org/tcep/energyintegration/energystorage/

https://www.reuters.com/brandfeatures/venture-capital/article?id=73054

IEA, 2019. World Energy Investment 2019. International Energy Agency, France.

IEEE Industrial Electronics Magazine, December 2016. Vanadium Redox Flow Batteries: Potentials and Challenges of an Emerging Storage Technology.

IRENA, 2017. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA, 2015. Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA, 2015. Case Studies: Battery storage. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
Innovation for Cool Earth Forum, 2017. Energy Storage Roadmap - Technology and Institution.
ITRI Ltd. 2017. Lead-Acid Batteries, Impact on future tin use technical report.
Johnson Controls, 2018. Impact of CO_2 Emission Targets on Battery Technologies.
J. W. Choi & D. Aurbach, 2016. Promise and Reality of Post-lithium-ion Batteries with High Energy Density, Nature Reviews, 1, 13
Li, B. and Liu, J., 2017. Progress and directions in low-cost redox-flow batteries for large-scale energy storage, Nat Sci Review, 4, 91.
Nikiforidis, G., van de Sandenac, M. C. M. and Tsampas, M. N., 2019. High and intermediate temperature sodium–sulfur batteries for energy storage: development, challenges and perspectives, RSC Adv, 9, 5649.
RCS Global. The Battery Revolution: Balancing progress with supply chain risks.
REN21, 2019. Renewables 2019-Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.
Shane Christie, Yoon San Wong, Grigory Titelman and John Abrahamson, 2017. Lead-acid Battery Construction, US Patent 9543589-B2, 10 January 2017.
SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2019. Türkiye'de kullanılan elektriğin %50'den fazlası yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilir: Sistem esnekliğini artırmak için gereken seçeneklerin maliyet ve faydaları
Science for Environment Policy 2018. Towards the battery of the future. European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol.
Suschem European Technology Platform for Sustainable Chemistry, 2018. Batery Energy Storage-White paper.
Turgut M. Gür, 2018. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. Energy Environ. Sci. 11, 2696
Türkiye Enerji Vakfı, Enerji Panorama, Sayı : 69, Nisan 2019
U.S. Department of Energy, Office of Technology Transitions, 2018. Solving Challenges in Energy Storage
Winsberg, J., Hagemann, T., Janoschka, T., Hager, M.D. and Schubert, U.S., 2017. Redox Flow Batteries: From Metals to Organic Redox Active Materials. Angew Chem Int Ed, 2017, 56, 686.
Yang, Z., Zhang, J., Kintner-Meyer, M. C. W., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J. P. and Liu, J., 2011. Electrochemical Energy Storage for Green Grid, Chem Review, 111, 3577.

NOTLAR

NOTLAR

NOTLAR

İstanbul Politikalar Merkezi

İstanbul Politikalar Merkez (İPM) demokratikleşmeden iklim değişikliğine, transatlantik ilişkilerden çatışma analizi ve çözümüne kadar, önemli siyasal ve sosyal konularda uzmanlığa sahip, çalışmalarını küresel düzeyde sürdüren bir politika araştırma kuruluşudur. İPM araştırma çalışmalarını üç ana başlık altında yürütmektedir: İPM-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi, Demokratikleşme ve Kurumsal Reform, Çatışma Çözümü ve Arabuluculuk. 2001 yılından bu yana İPM, karar alıcılara, kanaat önderlerine ve paydaşlara uzmanlık alanına giren konularda tarafsız analiz ve yenilikçi politika önerilerinde bulunmaktadır.

European Climate Foundation

European Climate Foundation (ECF) Avrupa'nın düşük karbonlu bir toplum haline gelmesine yardımcı olabilmek ve iklim değişikliğiyle mücadelede uluslararası alanda güçlü bir lider rolü oynayabilmek amacıyla kurulmuştur. ECF, her türlü ideolojiden uzak kalarak düşük karbonlu bir topluma geçişin "nasıl" olacağı konusunu odağına alır. Ortaklarıyla yaptığı iş birliği kapsamında ECF, bu geçişte kilit rol oynayacak patikaları ve farklı alternatiflerin sonuçlarını ortaya çıkararak bu tartışmalara katkı sağlamayı hedefler.

Agora Energiewende

Agora Energiewende; Özellikle Almanya ve Avrupa olmak üzere tüm dünyada temiz enerjiye başarılı bir geçiş yapılmasını sağlamak amacıyla veri odaklı, politik açıdan uygulanabilir stratejiler geliştirir. Bir düşünce kuruluşu ve politika laboratuvarı olan Agora; yapıcı bir fikir alışverişi sağlarken siyaset, iş ve akademi dünyasından paydaşlarla da bilgi birikimini paylaşmayı hedefler. Kâr amacı gütmeyen ve bağışlarla finanse edilen Agora, kendini kurumsal ve siyasi çıkarlara değil, iklim değişikliğiyle mücadeleye adamıştır.

SHURA
Enerji Dönüşümü Merkezi

Evliya Çelebi Mh. Kıblelizade
Sk. Eminbey Apt. No:16 K:3 D:4
34430 Beyoğlu / İstanbul
Tel: +90 212 243 21 90
E-mail: info@shura.org.tr
www.shura.org.tr

SHURA Kurucu Ortakları:

İPM | IPC İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ KAMPUSU
İSTANBUL POLICY CENTER
AT SABANCI UNIVERSITY

European Climate Foundation

Agora Energiewende