

ENERJİ DEPOLAMA YAZI DİZİSİ-3

Enerji Depolama Teknolojilerinin Anatomisine Devam: Elektrokimyasal, Mekanik ve Isıl Sistemlerin İncelenmesi

Gözde DEMİRİSOY - *Elektrik Elektronik Mühendisi & Enerji Sistemleri Yüksek Mühendisi*

gozde.demirsoy@gmail.com

Enerji depolama sistemleri (EDS), yalnızca geçici enerji muhafazası sağlayan yapılar değil, aynı zamanda geleceğin enerji mimarisinin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir. Yazı dizimizin önceki bölümlerinde, EDS'lerin tarihsel gelişimi, temel işlevleri ile kimyasal ve elektriksel sistemlerine odaklanılmıştı.

Bu bölümde ise enerji depolama teknolojileri altyapısının diğer boyutları ele alınmaktadır. Bu doğrultuda elektrokimyasal, mekanik ve ısıl enerji depolama sistemleri; yapı taşları, çalışma prensipleri ve uygulama alanları açısından kapsamlı olarak değerlendirilmektedir.

1. Elektrokimyasal Enerji Depolama Teknolojileri

Elektrokimyasal depolama hem elektrik hem de kimyasal enerjinin aynı elektronu paylaşmasıyla elektriği kimyasal biçimde depolama yöntemidir. Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin önemli uygulama alanları arasında ulaşım ve güç (sabit/taşınabilir) üretimi yer almaktadır. Elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri olarak elektrokimyasal kapasitör, batarya (pil, akü) ve yakıt hücreleri kullanılmaktadır [1-3].

1.1. Elektrokimyasal kapasitör

Elektrokimyasal kapasitörler hızlı oksidasyon-redüksiyon (REDOKS) reaksiyonuna dayanmaktadır. Elektrokimyasal kapasitörler metal oksit süper kapasitörler ve iletken polimer süper kapasitörleri içermektedir. Elektrot yüzeyinde oluşan ters çevrilebilir REDOKS reaksiyonunun veya elektrot potansiyeline bağlı olarak kapasite üretmek için hepsini kullanırlar. Kapasiteleri temelde aktif elektrot malzemesinin uygulamalarına dayanmaktadır [4].

1.2. Batarya

Piller, elektrik enerjisini elektrokimyasal enerjiye dönüştürerek depolayan ve istendiği anda da depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak geri verebilen depolama sistemleridir. Piller, bir veya daha fazla elektrokimyasal hücre veya akış hücreleri gibi, elektrokimyasal aygıtlardan oluşmaktadır. Pillerin bir araya gelerek oluşturdukları pil grupları da “batarya” olarak tanımlanmaktadır [5-6]. Pil hücresi, metal anot (negatif elektrot), metal oksit katyon (pozitif elektrot) ile iki elektrot arasında kimyasal reaksiyonu sağlayan elektrolitten oluşmaktadır. Anot, elektrolizde aşınırken katotta iyonik değişim reaksiyonu sonucu elektrik akımı meydana gelir. Bu reaksiyon sonucu oluşan elektrik enerjisi çeşitli aletlerde kullanılmaktadır.

Piller çeşitli şekillerde sınıflandırılmakta olup aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Tablo 1. Pillerin sınıflandırılması [3]

Sınıflandırma Tipi	Alt Kategori	Açıklama
Çalışma Prensipleri	Birincil Hücre/Pil	Genellikle şarj edilemez. Taşınabilir elektrikli ve elektronik aletler, aydınlatma, fotoğraf ekipmanları ve oyuncaklar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ucuz ve kolay enerji kaynaklarıdır. Uzun raf ömrü, düşük ve orta deşarj oranlarında yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları, küçük boyutlarda olmaları, kullanımı kolay olma avantajlarına sahiptir. Emici malzeme veya ayırıcıda bulunan elektrolitleri kullanırlar. Elektrolit tipine göre sulu ve susuz olarak sınıflandırılabilir. [3,7] Sulu: Zn-C, Zn-AgO. Susuz: Li-SOCl ₂ , Li-MnO ₂ , LiI ₂ , LiAg ₂ V ₄ O ₁₁ vb.
	İkincil Hücre/Pil	Deşarj esnasında akımın tersi yönde hareket ederek devreden geçmesiyle şarj edilebilirler [11]. elektrolit çeşidine göre sınıflandırılmaktadır. Su ve çözücülere dayanan sulu ve susuz elektrolitlere göre 2 çeşittir. Sulu: Kurşun Asit, NiMH, NiCd. Susuz: Li-ion, NaS, Metal-Hava vb.
	Yedek Hücre/Pil	Hücredeki aktif kimyasallar gerekli olana kadar ayrılır ve izole edilir, elektrolit olmadan monte edilir, uzun süreli depolama için tercih edilir.
	Yakıt Hücresi	Hidrojen gibi yakıtlardan elektrik üretir. Tükenmezler veya tekrar şarj edilmeye gerek duymazlar. Yakıt sürekliliği olduğunda elektrik ve ısı üretirler [3]. Elektrolit tipi yakıt hücrelerin polimer elektrolit membran, alkalın, metanol, fosforik, karbonat, katı oksiti tersinir türleri bulunmaktadır.
Deşarj Derinliği	Sığ Döngülü	Çevrim ömrü deşarj derinliğine bağlıdır. Sığ deşarjlar, derin deşarjlara göre daha fazla çevrim sağlar.
	Derin Döngülü	Yenilenebilir enerji uygulamaları için uygundur, daha az kalın plaka içerir.
Elektrolit Tipi	Islak (Su Basmış)	Yenilenebilir uygulamalarda yaygındır.
	Sızdırmaz	İki çeşit sızdırmaz pil bulunmaktadır: Jel ve Absorbe Cam Mat
Kimyasal Yapı	Çeşitli Kimyasallar	Pil yapısında kullanılan kimyasal bileşenlere göre sınıflandırılmaktadır. Seçili pil çeşitlerinin özellikleri Tablo 2’de ve karşılaştırmaları ise Tablo 3’te verilmiştir [7].

Not: Bazı kaynaklar, yakıt hücrelerini pillerden farklı olarak **ayrı bir elektrokimyasal sistem kategorisi**—başka bir ifadeyle **bağımsız bir grup**—olarak ele almaktadır. Bu yazıda da, her ne kadar yakıt hücrelerine pillerin alt başlığında kısaca değinilmiş olsa da, söz konusu yaklaşım benimsenerek **yakıt hücreleri bataryalardan bağımsız şekilde detaylandırılmıştır**. Diğer bir ifadeyle ayrı bir grup olarak ele almaktadır. Bu yazıda da her ne kadar pillerin alt başlığında kısaca yakıt hücrelerine değinilse de yakıt hücreleri, bu yaklaşım benimsenerek bataryalardan bağımsız olarak detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Seçili pil çeşitlerinin özellikleri [2,8]

Pil Türü	Nominal Gerilim (V)	Özgül Enerji (Wh kg ⁻¹)	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L ⁻¹)	Özgül Güç (W kg ⁻¹)	Yaşam Döngüsü	Kendi Kendine Deşarj (aylık %)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun Asit (Pb-Asit)	2,0	35	100	180	1000	< 5	Hayır	-15 ila +50
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	1,2	50-80	300	200	2000	10	Evet	-20 ila +50
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	1,2	70-95	180-220	200-300	< 3000	20	Seyrek	-20 ila +60
ZEBRA	2,6	90-120	160	155	> 1200	< 5	Hayır	+245 ila +350
Lityum-İyon (Li-İyon)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	Hayır	-20 ila +60
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	3,2	90-140	220	2000-4500	> 3000	< 5	Hayır	-20 ila +70
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO ₂) (LCO)	3,6	150-200	-	-	500-1000	-	-	-25 ila +55
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn ₂ O ₄) (LMO)	3,7	100-150	-	-	300-700	-	-	0 ila +50
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	3,6	200-260	-	-	500	-	-	-
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	3,6	150-220	370	2300	1000-2000	-	-	-
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	2,4	50-80	90	4000	3000-7000	-	-	-
Çinko-Hava (Zn-Air)	1,65	460	1400	80-140	200	< 5	Hayır	-10 ila +55
Lityum-Kükürt (Li-S)	2,5	350-650	350	-	300	8-15	Hayır	-60 ila +60
Lityum-Hava (Li-Air)	2,9	1300-2000	1520-2000	70-100	100	< 5	-	-10 ila +70

Tablo 3. Seçili pil çeşitlerinin karşılaştırmaları [2,8]

Pil Türü	Östün Yönleri	Zayıf Yönleri
Kurşun Asit (Pb-Asit)	•Düşük fiyat •Yüksek özgül güç	•Düşük özgül enerji •Kısa yaşam ömrü •Yüksek bakım maliyeti
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	•Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	•Geri dönüşüm maliyeti yüksek •Pahalı kadmiyum •Kadmiyumun zehirli madde olması •Çevreye zararlı •Hafıza etkisi
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	•Yüksek enerji yoğunluğu •Güvenli •Uzun yaşam ömrü	•Yüksek fiyat •Kendi kendine deşarj yüksek •Hafıza etkisi
ZEBRA	•Yüksek sıcaklık aralığında çalışma •Yüksek özgül enerji	•Düşük özgül güç
Lityum-İyon (Li-İyon)	•Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu •Yüksek özgül enerji ve özgül güç •Yüksek nominal voltaj	•Kullanım ömrü az •Güvenilirlik •Yüksek maliyet
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	•Yüksek çevrim ömrü •Yüksek özgül güç •Düşük maliyet •Uzun ömürlü	•Düşük özgül enerji
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO ₂) (LCO)	•Yüksek özgül enerji •Yüksek nominal voltaj	•Düşük güvenlik •Yüksek maliyet •Düşük yaşam ömrü
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn ₂ O ₄) (LMO)	•Yüksek nominal voltaj •Maliyet düşük	•Düşük çevrim ömrü
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	•Yüksek özgül enerji •Yüksek özgül güç	•Düşük çevrim ömrü •Düşük güvenlik •Yüksek maliyet
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	•Yüksek özgül enerji •Yüksek özgül güç Yüksek verimlilik	•Düşük kararlılık
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	•Yüksek özgül güç •Yüksek çevrim ömrü •Yüksek güvenlik	•Düşük özgül enerji •Düşük hacimsel enerji yoğunluğu •Yüksek maliyet
Çinko-Hava (Zn-Air)	•Yüksek özgül enerji •Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	•Düşük nominal voltaj •Düşük çevrim ömrü
Lityum-Kükürt (Li-S)	•Yüksek özgül enerji •Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu •Geniş sıcaklık aralığında çalışma	•Düşük nominal voltaj •Yüksek kendi kendine deşarj oranı
Lityum-Hava (Li-Air)	•Yüksek teorik özgül enerji	•Düşük çevrim ömrü •Düşük güvenlik

Tabloda yer alan sodyum nikel klorür (NaNiCl) pillere Zebra pilleri de denir. Zebra ismi “Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Faaliyeti” (Zero Emission Battery Research Activity) projesinden türetilmiştir. ZEBRA pil, elektrikli araç uygulaması için uygun olan yüksek enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, aşırı çalışma sıcaklığı, termal yönetimi ve güvenlik endişeleri üzerinde büyük baskı oluşturmıştır [8]. Kurşun asit pil, elektrikli araç motorlarını çalıştırmak için güç sağlayan uzun süreli olan (100 yıl) pillerin gelişmiş şekilleri olup sabit enerji depolama kullanımları için uygundur. Ticari olarak piyasada bulunmaktadır. Ayrıca, faydalı şarj ve deşarj edilebilir durumları başka kullanım amaçları için araştırılmaya devam edilmektedir [2]. Lityum iyon piller; enerji depolama kapasitelerinin yüksek, iç dirençlerinin düşük ve verimleri %90’ın üzerinde olması nedeniyle uygulamada yaygın kullanılmaktadır. Bu pillerin verimlilikleri enerji yoğunluklarından dolayı yüksektir. Bu nedenle enerji kalitesinin önem arz ettiği yerlerde, enerji dağıtım şebekelerinde, cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi kişisel elektronik cihazlar, elektrik araçlarında ve sabit enerji depolama sistemleri için kullanılan en fazla tercih edilen şarj edilebilir pillerdir. Bunun yanında detaylı olarak lityum iyonun uygulamaları incelendiğinde, öncelikle kara yolu ulaşımı, özellikle hibrit ve elektrikli araçlar, şebeke destek hizmetleri (şebeke işletimi daha esnek), havacılık ve taşımacılıkta günlük depolama ve mevsimsel enerji depolaması için kullanıldığı görülmektedir. Ömürlerini uzatmak için, örneğin süper kapasitörler ve yenilenebilir enerji kaynakları ile paralel olarak bağlanmaktadır [2].

Redoks akış pilleri, içerisine eklenen hidroklorik ve sülfürik asit ile Li-ion türevlerine göre %70 daha yüksek yoğunluk gözlenmiştir. Bu pil çeşidi rüzgar tribünleri ve güneş panellerinden elde edilen enerjinin depolanması amacıyla kullanılmıştır. Elektrikli araçlara uygulanması durumunda ise bir şarj ile 1600 km sürüş olanağı tanımaktadır. Bu piller daha hafif ve yüksek enerji depolama imkanı sunmaktadır [3]. Söz konusu piller, anolit ve katolit kimyalarına göre; vanadyum redoks akış pilleri (VRB’ler), polisülfür/brom akış pilleri (PSB’ler), demir/krom akış piller (ICB), çinko/bromlu akış pilleri (ZBB), vanadyum/seryum akış pilleri, çözünür kurşun-asit akış pilleri olarak sınıflandırılabilir [9].

İlgili piller içinde VRB’ler, vanadyum bazlı elekt-

rolitin pozitif ve negatif akü bileşenlerinde akışı, tekrar tekrar şarj-deşarj olmasını sağlayan elektrokimyasal oksidasyon/redüksiyon işleminden geçer. Diğer pil türlerinden temel farkı, enerjinin doğrudan elektrolit içine depolandığı, elektrolitin dolaşımındaki akışı sırasında şarj-deşarjın gerçekleşmesidir. Büyük miktarlarda enerjinin uzun süre depolanmasına imkân veriler; şarj etmek için güç kaynağı yoksa elektrolit değiştirerek yeniden şarj edilebilirler; emniyet bakımından diğer pillere göre (özellikle Li piller) herhangi bir yanma-patlama özelliği göstermezler; aynı anda hem şarj hem deşarj olabilir; %100 deşarj derinliğine sahiptir ve bu durum batarya ömrünü etkilemez; kullanım süreleri uzundur ve kullanım kaynaklı kapasite azalması olmaz. Güç üretimi ve enerji depolama bileşenleri ayrı olduğundan, vanadyum redoks akış piller tasarım esnekliği sunar. Herhangi bir depolama kapasitesi, herhangi bir güç çıkışı kapasitesiyle eşleştirilebilir [2]. Özet olarak, vanadyum redoks akış pilinin uzun hizmet ömürleri ve yüksek güvenlikleri nedeniyle enerji depolama alanında kullanılmaktadır ki bu durum, vanadyum redoks akış pillerini vanadyumun gelecekteki en önemli kullanım alanından biri haline getirecektir [2]. Söz konusu pillerin en önemli dezavantajı bulunmaktadır ki bu da düşük enerji yoğunluğudur. Ancak tanklar, herhangi bir boyuta ölçeklendirilebildiğinden, çok daha fazla toplam enerji depolama özelliğine sahiptir. Bir diğer önemli dezavantaj ise pilde kullanılan ve pil teknolojisinde uygun bir malzeme olarak kabul edilen vanadyum maddesinin de kritik bir hammadde olması ve bu açıdan Çin’e bağımlılık yaratmasıdır [9-10]. Ülkemizde Şırnak, Mardin-Silopi asfaltit yatakları ile Seydişehir boksitlerinde vanadyum bulunmaktadır. Bunların dışında Türkiye’de bilinen vanadyum yatağı bulunmamaktadır [10]. Ülkemizde doğrudan vanadyum cevheri üretimi yoktur. Mevcut vanadyum kaynakları ise ekonomik değildir. Ancak, içinde vanadyum bulunan diğer cevherleşmelerin işletilmesi sırasında yan ürün olarak kazanma için teknoloji geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Ülkemiz vanadyum ihtiyacı ithalat yoluyla karşılanmaktadır. İthal edilen vanadyum demir-çelik sektöründe demir alaşımları üretmek için kullanılmaktadır. İthal edilen vanadyum ürünleri ferrovanadyum, vanadatlar ve vanadyum pentaoksittir [10].

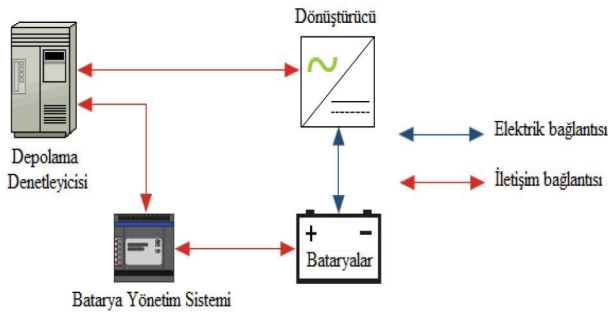
Yukarıda bahsi geçen piller haricinde literatürde yer alan piller aşağıda özetlenmiştir:

Tablo 4. Seçili pil teknolojileri ve özellikleri

Pil Teknolojisi	Özellikler
Metal Hava Pili	Li-ion pillere göre daha yüksek teorik enerji yoğunluğu; elektrikli araç ve şebeke depolamada önerilmektedir.
Lityum Metal Pili	Başta elektrikli araçlar olmak üzere çok çeşitli potansiyel uygulama alanları bulunmaktadır.
Sodyum Sülfür Pili	Sabit uygulamalar için uygundur. Yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu destekler. Sanayi ve acil durumlarda kullanılır.
Lityum İyon Pili	Kısa sürede yüksek güç sağlar.
Nikel Kadmiyum Pili	Acil aydınlatma, telekom, güneş enerjisi sistemleri, uzay araçları; yaklaşık %75 verimliliğe sahip olma.
Alüminyum Grafit Pili	Çok hızlı şarj olabilir. Şu an düşük enerji çıkışıyla sınırlı (1.5 V).
Sodyum İyon Pili	Li-ion alternatifi yeni nesil sistemdir. Ağır yapısı nedeniyle dezavantajlıdır; henüz ticari değildir.
Lityum Sülfür Pili	Yüksek kapasite sunar ama ömrü kısadır. Korozyon sorunları vardır.
NanoBolt Lityum Tungsten Pili	Geniş yüzey alanlı anotlar sayesinde daha fazla enerji depolar ve hızlı şarj olur.
Katı Hal Pili	SSD teknolojisinden esinlenmiştir. Seramik, sülfat vb. ile yüksek enerji yoğunluğu (2-10 kat); yangın riski düşüktür.
Biyoelektrokimyasal Pili	Anaerobik bakterilerle çalışır, kendini yeniler; teoride sonsuz ömür. MFC'lerle ilişkilidir.
Organosilikon Elektrolit Pili	Li-ion pillerdeki yanma riskini azaltmak için organosilikon bazlı çözücüler içerir. Araştırma aşamasındadır.
Altın Nanokablolu Jel Elektrolit Pili	Altın nanokablolar ve MnO ₂ kaplama ile 200.000 defa şarj edilebilir; aşınma gözlenmez.

Detayları yukarıda verilen pillerin bazıları çeşitli endüstrilerde kendilerine uygulama alanı bulurken bazıları da araştırma ve geliştirme aşamasındadır.

Pillerin modüler yapıdaki birleşimleriyle oluşturulan batarya enerji depolama sistemleri, enerji alt yapısında kritik bir rol oynamakta olup batarya enerji depolama sisteminin temel bileşenleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 1. Batarya enerji depolama sistemi [2]

Bataryanın enerji depolama kapasitesi alternatif enerji sistemlerinin boyutlandırılmasında önemli

bir etkidir. Batarya boyutları, ihtiyaç duyulan enerji miktarına göre tasarlanmaktadır. Uygun ortam koşullarında, özellikle 20 °C sıcaklıkta işletildiğinde, bataryaların ömrü genellikle 5 ila 10 yıl arasında değişmektedir [2].

Batarya depolama teknolojileri, merkezi ve dağıtık üretim yapılarında kullanılmakta olup teknolojik ilerlemelere paralel olarak uygulama alanları hızla genişlemektedir. Özellikle güneş enerjisi sistemlerinde ve konut uygulamalarında kullanımları yaygınlaşırken elektrikli araçlarda ise temel güç kaynağı olarak önemli bir rol üstlenmektedir [2].

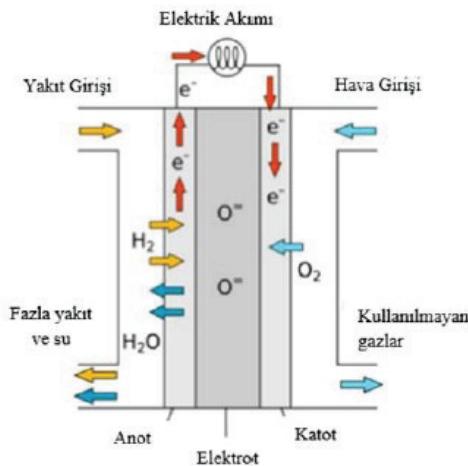
Bu yaygın kullanımın temelinde, batarya enerji depolama sistemlerinin sunduğu çok yönlü işlevsellik yatmaktadır. Bu sistemlerin sağladığı en önemli avantaj, aktif ve reaktif güç ihtiyaçlarını karşılama esnekliğidir. Bu yetenek sayesinde batarya enerji depolama sistemleri, yatırımcılar, tüketiciler ve sistem operatörleri açısından; üretim, iletim ve dağıtım seviyelerinde çeşitli şebeke hizmetlerinin sağlanmasına olanak tanımaktadır [11].

Tablo 5. Batarya enerji depolama sistemlerinin paydaşlara göre kullanım amaçları [12]

İlgili Taraflar	Hizmet Alanları	Örnek Uygulamalar
Yatırımcılar	Fiyat ve üretim yönetimi	- Fiyat arbitrajı - Üretim kesintisi yönetimi - Üretim santrali yük profili düzenlemesi - Dengesizlik ve dengesizliğe bağlı maliyet yönetimi - Yenilenebilir enerji santrallerinin entegrasyonunu hızlandırma
Tüketiciler	Enerji güvenliği ve verimlilik	- Yük kaydırma (load shifting) - Enerji güvenliği (elektrik kesintilerinden tüketicinin korunması)
Sistem Operatörleri	Yan hizmetler ve şebeke desteği	- Primer Frekans Kontrolü (PFK) - Sekonder Frekans Kontrolü (SFK) - Dengeleme Güç Piyasası (DGP) - Reaktif güç/gerilim desteği - Oturan sistemin toparlanması (Black Start) - Hızlı Frekans Tepkisi (FFR) - Rampalama rezervi - Dinamik reaktif güç desteği - Yatırım erteleme - Kısıt yönetimi - Kararlılık desteği

1.3. Yakıt hücresi

Yakıt hücresi, hidrojen veya başka bir yakıtın enerjisini elektrokimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisine dönüştürmektedir [2]. Bir yakıt hücresi; anot, katot ve elektrolit zarından oluşmaktadır [13].



Proton değişim membran yakıt hücreleri çalışma prensibi incelendiğinde, hidrojen anottan ve oksijen katottan geçerek çalışmaktadır. Hidrojen anotta elektronlara ve protonlara ayrışır. Elektronlar bir elektrik akımı ve aşırı ısı üretirken protonlar elektrolit zarından geçer. Katotta protonlar, elektronlar ve oksijen birleşerek su molekülleri oluşturur. Sonuç olarak, yakıt hücresi hidrojen ve oksijeni bir elektrokimyasal reaksiyonla birleştirerek elektrik, su ve ısı üretmektedir. Gerekli yakıt (anot tarafı) ve oksitleyici (katot tarafı) sağlandığı sürece yakıt hücresi sonsuza kadar çalışabilmektedir. Diğer ifadeyle, yakıt sürekliliği sağlandığında elektrik ve ısı üretirler, tükenmezler ve tekrar şarj edilmeye gerek duymazlar [13].

Şekil 2. Tipik yakıt hücresinin çalışma prensibi [13]

Tablo 6. Yakıt hücreleri ve pillerin karşılaştırılması [2]

Özellik	Yakıt Hücreleri	Piller
Çalışma Prensipleri	Sürekli olarak dışarıdan sağlanan yakıtla çalışan açık sistem	Kapalı sistemde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.
Reaktan Tüketimi	Elektrokimyasal reaksiyon sırasında yakıt sürekli olarak tüketilir	Enerji, hücre içerisinde depolanır; reaktantlar sınırlı ve kapalı sistemdedir.
Elektrot Yapısı	Katalitik elektrotlar; genellikle kararlıdır.	Elektrotlar reaksiyona girer ve zamanla değişir
Özgül Enerji (Wh/kg)	Yüksek (pillerden daha yüksek enerji yoğunluğu)	Daha düşük (yakıt hücresine göre)
Özgül Güç (W/kg)	Düşük (yüksek enerjiye rağmen anlık güç çıkışı sınırlı)	Daha yüksek özgül güç
Maliyet	Yüksek	Görece daha düşük
Yük Değişimine Uyum	Düşük tepki hızı; ani yük değişimlerine adaptasyon zayıf	Yük değişimlerine daha hızlı uyum sağlar.

Yakıt hücresi çeşitleri arasındaki temel ayırt edici unsur, kullanılan elektrolit malzemesidir [14]. Çünkü elektrolit, yakıt hücresinin tasarım ve çalışma performansı üzerinde belirleyici etkilere sahiptir.

Piyasada farklı elektrolitlere sahip yakıt hücreleri bulunmaktadır. Her bir hücre tipi, elektrolit yapısına bağlı olarak farklı sıcaklık aralıklarında çalışır ve uygulama alanlarına yönelik özel avantajlar sunar. Yaygın olarak kullanılan yakıt hücresi türleri arasında; proton değişimli membran (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), erimiş karbonat (Molten Carbonate

Fuel Cell, MCFC), alkali (Alkaline Fuel Cell, AFC), fosforik asit (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) ve katı oksitli yakıt hücre (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) teknolojileri yer almaktadır [2]. Söz konusu yakıt hücre teknolojilerinin çalışma sıcaklığı ve elektrik verimliliğinin karşılaştırmaları tabloda verilmiştir.

Tablo 7. Farklı yakıt hücre teknolojilerinin karşılaştırılması [2]

Özellik /Yakıt Hücresi Tipi	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	Polimer iyon değişim filmi	Fosforik asit	Karbonat	Çinko üzerine tutturulmuş yittria (YSZ)
Elektrolit Taşıyıcısı	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂ ²⁻
Hücre Materyali	Karbon	Karbon	Nikel, paslanmaz çelik	Seramik vb.
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350-1500	120-180	30-40	15-20
Yakıt Türü	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar, fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar
Çalışma Sıcaklığı (°C)	80	200	600-700	1000
Güç Üretim Verimi (%)	60	37-42	45-60	60-70
Uygulama Alanları	Ulaşım araçları, askeri sistemler	Ticari uygulamalar (oteller, hastaneler vb.)	Elektrik santralleri	Ticari uygulamalar, sanayi uygulamaları, elektrik santralleri

2. Mekanik Enerji Depolama Teknolojileri

Mekanik enerji depolama teknolojilerinde enerji; fiziksel ilkeler kullanılarak kinetik, potansiyel formda veya basınç enerjisi olarak depolanmakta ve ihtiyaç anında elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Yüksek güç kapasiteleri, uzun operasyonel ömürleri ve basit çalışma prensipleri ile öne çıkan bu sistemler; özellikle büyük ölçekli enerji yönetimi uygulamaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının sistem entegrasyonu ve şebeke dengeleme açısından uygundur. Başlıca mekanik enerji depolama teknolojileri; volan (FESS), pompalı hidro (PHS) ve sıkıştırılmış hava tabanlı depolama teknolojileridir (CAES)[13].

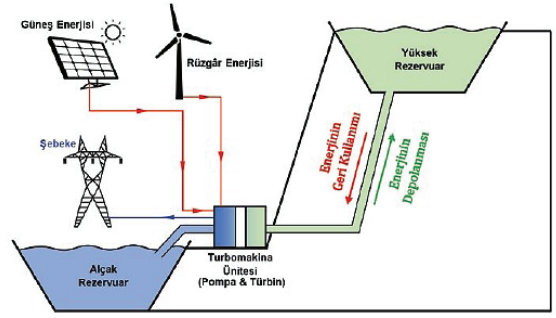
2.1. Pompalı Hidro

Literatürde pompalı hidro, pompaj depolama, pompalı depolama gibi terimlerle ifade edilen bu yöntemin temel prensibi, elektrik talebinin düşük olduğu dönemlerde suyun alt rezervuardan üst rezervuara pompalanarak enerjinin potansiyel enerji formunda depolanmasına dayanmaktadır. Bu sayede sistem, yüksek talep anlarında hızlı ve güvenilir biçimde enerji üretimine hazır hale gelmektedir.

Elektrik talebinin arttığı, üretimin düşük olduğu durumlarda ya da diğer enerji santrallerinde meydana gelebilecek planlanmamış kesintileri dengelemek amacıyla, depolanan su türbinlerden geçirilerek yeniden alt rezervuara yönlendirilmekte ve bu süreçte elektrik üretilmektedir. Böylece suyun döngüsel olarak yeniden kullanımı sağlanmakta ve enerji arz güvenliği desteklenmektedir [13,15].

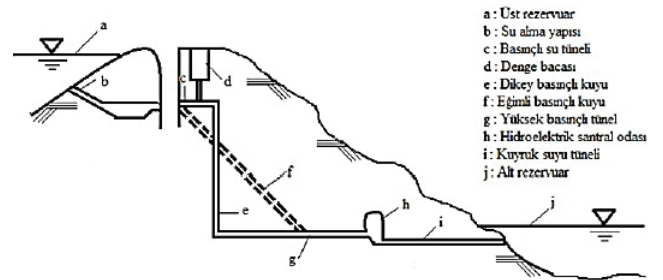
Söz konusu su döngüsü, yalnızca enerji depolamaya hizmet etmekle kalmamakta; aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekedeki payının giderek arttığı günümüz enerji sistemlerinde, frekans ve voltaj regülasyonu gibi kritik hizmetleri sağlayarak sistem kararlılığına önemli katkılar sunmaktadır.

Ayrıca kurak dönemlerde dahi bu sistemlerin avantaj sağladığı, rezervuar yönetiminin optimize edilmesiyle suyun, tarımsal sulama gibi alanlarda ikili fayda sağlayacak şekilde kullanılabilirdiği de ifade edilmektedir.



Şekil 3. Pompalı hidro enerji depolama çalışma şekli [6]

Ayrıca, ilgili akademik ve teknik kaynaklarda “pompalı hidroelektrik depolama”, “pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri (PDHES/PHES)” ve “pompa depolamalı hidroelektrik santralleri” gibi ifadeler, aynı temel prensibe dayanan bu teknolojiyi tanımlamak üzere eşdeğer kavramlar olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4. Pompalı hidro depolama sistem şeması [13]

Pompaj depolamalı hidroelektrik santrali (PDHES) iki rezervuardan, pompalardan, türbinlerden, motorlardan, jeneratörlerden, cebri borulardan, akış kontrol valflerinden, sistem kontrolöründen ve yardımcı ekipmanlardan oluşmaktadır. PDHES, 90 saniye içerisinde çevrimiçi olmakta ve 120 saniye içinde tam güce çıkabilmektedir. Ayrıca pompalama modundan üretime veya üretimden pompalama moduna 180-240 saniye aralığında geçebilmektedir. Pompaj depolamalı sistemlerin verimliliği ise %75 ile %80 arasında değişmektedir [15]. Yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen, PDHES uzun vadede yatırım geri dönüşü imkanı sunmaktadır ve batarya teknolojilerine kıyasla daha düşük birim maliyetle enerji depolama yapmaktadır.

PDHES’lerin avantaj ve dezavantajları arkadaki tabloda özetlenmiştir [15].

Tablo 8. PDHES’lerin avantaj ve dezavantajları

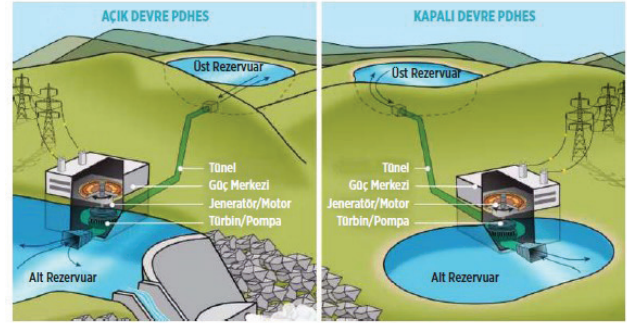
Avantajlar	Dezavantajlar
Kurulum ve işletme açısından eski ve güvenilir bir teknoloji olması	Potansiyel kaynakların coğrafi olarak sınırlı olması
Çok düşük enerji kayıpları bulunması	Hazırlık sürecinin uzun yıllar alması (Planlama ve inşaat süreci 6 ila 10 yıl sürebilmektedir.)
Düşük işletme maliyetlerine sahip olması	Verimliliğin %70–80 seviyelerinde kalması
Başlama ve durdurma esnekliği sağlaması	Özel coğrafi yapı ve su kaynağı gerektirmesi
3–5 dakika içinde hızlı devreye girme yeteneğine sahip olması	Rezervuarlar arası ulaşım zorlukları
Yük dengesizliklerinde frekans regülasyonu sağlaması	Yerleşim alanlarından uzak olması gerekliliği sağlaması
Büyük miktarda enerji depolayabilmesi	Çevresel etkilerinin yüksek olabilmesi
Yaklaşık 75 yıl gibi uzun bir kullanım ömrüne sahip olması	
Ekonomik bir çözüm sunması	
6 ila 24 saat arasında veya daha uzun süreli enerji depolama kapasitesine sahip olması	

PDHES, genel çalışma prensiplerine göre iki ana kategoriye ayrılmaktadır [15].

Kapalı devre PDHES: Daha önce üst rezervuara pompalanmış su hacmi kullanılmaktadır. Alt ve üst rezervuarı besleyen harici doğal bir akış bulunmamaktadır.

Açık devre PDHES: Üst ya da alt rezervuar doğal bir akış ile beslenmektedir. Bazı açık devre PDHES uygulamalarında üst rezervuarın büyük ölçüde doğal kaynaklardan beslendiği durumlar da söz konusudur. Bu sayede, üst rezervuarın suyla doldurulması gereken durumlarda, alt re-

zervuardan pompalama yapılmaksızın yalnızca doğal akışla su temini mümkün olabilmektedir.



Şekil 11: Açık ve Kapalı Devre PDHES (www.pnnl.gov)

Şekil 5. Açık ve kapalı devre PDHES [15]

Dünya üzerindeki depolama teknolojilerinin büyük çoğunluğu PDHES’tir. Aynı şekilde, toplam depolama kapasitesinin büyük bir oranı PDHES’e aittir [15].

PDHES projelerinde maliyetler proje bazında farklılık göstermekle birlikte; büyük ölçüde proje sahasının jeolojik, topografik ve hidrolojik özelliklerine bağlıdır. Bu tür santraller genellikle engebeli arazilerde, yerleşim yerlerinden uzak, ulaşım yolları ve iletim hatlarına erişimin kısıtlı olduğu bölgelerde konumlanmaktadır. Dolayısıyla, bu projelerde çevresel ve altyapısal koşullar genellikle zorlu ve maliyet artırıcı niteliktedir [15].

PDHES projelerinde maliyet değişimlerini belirleyen ana kriterler üç temel grupta sınıflandırılabilmektedir [15]:

1. Ekipman seçimi (sabit, değişken hızlı veya bazı hibrit yaklaşımlar) : Sabit ve değişken hızlı üniteler arasındaki maliyet farkı yaklaşık %25 düzeyindedir. Bu fark, ağırlıklı olarak değişken hızlı sistemlerde daha fazla güç elektroniği ekipmanına duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu tür ekipmanların yerleştirilmesi için santralin daha büyük tasarlanması gerektiği belirtilmektedir.
2. Proje boyutu/kapasitesi
3. Mevcut altyapının mevcudiyeti (iletim, barajlar, rezervuarlar vb.)

PDHES projelerinde yatırım süresinin uzunluğu ve inşaat maliyetlerinin yüksekliği dikkate alındığında, ticari finansman kuruluşlarına kıyasla

23

lası gözenekli oluşumda depolanmakta ve gaz depolama teknolojisinde gözenekli oluşumlar tamamen gelişmiş durumdadır [2].

SHED ile üretilen enerjinin çoğu, o anda olmasa da daha sonra talebin arttığı veya yenilenebilir kaynaklarının düşük üretim dönemlerinde kullanılmaktadır[13].

SHED teknolojisi, diğer enerji depolama teknolojiler ile karşılaştırıldığında, uzun vadeli büyük ölçekli enerji depolamada en etkili ve ekonomik teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir. Sıkıştırılmış hava enerji depolama teknolojilerinin depolama net verimliliği sıkıştırmada meydana gelen sıcaklıktan dolayı sınırlanmaktadır. Enerji depolama verimliliği yaklaşık olarak %75 civarındadır.

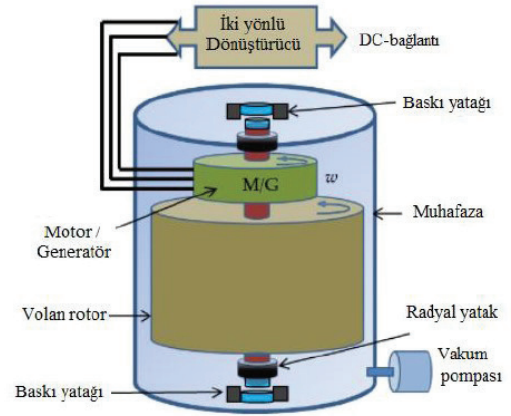
SHED’te sıkıştırılmış olan basınçlı hava kullanılarak, standart gaz türbinlerinin kullanıldığı durumlara kıyasla, aynı miktarda yakıt tüketilerek üç kat fazla elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Ayrıca söz konusu teknolojiler büyük kapasiteli depolama teknolojisinde pompalı depolamadan sonra ikinci sıradadır. [2, 19, 20].

İlk ticari CAES tesisi,1978’ de Almanya’nın Hunderdorf şehrinde inşa edilen 290 MW’ lık bir ünedir [20].

2.3. Volan

Volan en eski enerji depolama teknolojilerinden biri olup mekanik batarya olarak adlandırılmaktadır. Volan kinetik enerjiyi, mekanik enerji formunda depolayan ve tek ekseninde dönen bir kütledir. Volan, elektrik enerjisine talebin yoğun olmadığı zamanlarda, yüksek devir sayısı ile dönen motor sayesinde enerjiyi kinetik enerji şeklinde depolamaktadır.

Elektrik enerjisine talebin yoğun olduğu zamanlarda ise kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Sistemden enerji alındığı zaman, enerjinin korunumu kanunu gereği devir sayısı azalmaktadır. Benzer şekilde sisteme enerji verildiği zaman devir sayısı artmaktadır. Bu işlemler sırasında devir sayısı yaklaşık olarak 75.000 devir/dakika’yı bulabilmektedir [2].



Şekil 7. Volanın yapısı ve bileşenleri [7]

Volan ne kadar hızlı dönerse o kadar fazla enerji depolar. Volanlar hızın yüksek ve düşük olmasına bağlı olarak sınıflandırılabilir[13].

Volan, kontrollü enerji çıkışı sağlama ve ani güç taleplerine yanıt verme kapasiteleri sayesinde ulaşım, uzay teknolojileri, telekomünikasyon altyapıları ve nükleer araştırma gibi yüksek hassasiyet gerektiren endüstriyel güç sistemlerinde etkin biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik şebekesi düzeyindeki büyük ölçekli uygulamalardan son kullanıcı seviyesindeki küçük ölçekli sistemlere kadar geniş bir yelpazede başarıyla entegre edilebilmektedir. Bununla birlikte, şebekeden uzak olan uygulama alanlarında, frekans stabilizasyonu sağlamak ve ani güç dalgalanmalarını sönmekle amacıyla da tercih edilmektedir [2].

Bu bağlamda volanlar, özellikle rüzgar ve güneş gibi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonunda sistem kararlılığını artırıcı bir rol üstlenmektedir. Hızlı yanıt verme kabiliyetleri sayesinde, özellikle rüzgar enerjisi entegrasyonunda şebeke frekansı regülasyonu açısından oldukça elverişlidirler. Bunun yanı sıra, elektrikli demiryolu taşımacılığında, volan sistemleri elektrifikasyonun bulunmadığı hat kesimlerinde lokomotif hareketliliğini sürdürmek amacıyla enerji depolama çözümü olarak kullanılmaktadır. Ray altyapısına entegre edilen volan sistemleri, statik enerji depolama birimi (statik pil) olarak değerlendirilmekte olup bu alana yönelik ilgi giderek artmaktadır. Ayrıca, lokomotiflere sağlanan elektrik gücünü dengelemek ve frenleme esnasında oluşan rejeneratif enerjiyi geri kazanarak depolamak amacıyla da etkili bir çözüm sunmaktadırlar [2,13].

Yer çekimi Enerji Depolama sistemi

Yukarıda bahsi geçen mekanik enerji depolama sistemlerine ek olarak literatürde yer çekimi enerji depolama teknolojilerinden de bahsedilmektedir. Yer çekiminden faydalanan bu yöntem, kuru ve ıslak yer çekimi enerji depolama teknolojisi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Bir cismin yer çekimi potansiyel enerjisinin kullanılarak enerji depolanması yeni bir fikir olmayıp özellikle uzun vadeli, büyük ölçekli depolamada PHES şu anda dünyada en çok kullanılan depolama yöntemidir [21]. PHES ıslak yerçekimi enerji depolama yöntemi içinde yer almakta olup detayları önceki bölümde anlatılmıştır.

Su altı okyanus depolama sistemleri, ıslak yer çekimi enerji depolama teknolojisinde yer almakta olup açık denizde yüzen bir yenilenebilir enerji tesisi ile kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Depolama sistemi, batık bir tanktan (örneğin, büyük bir tank veya bir dizi boru/silindir veya içi boş bir beton küre), kaba bağlı ters çevrilebilir bir türbinden ve türbini generatör ünitesine bağlayan bir elektrik kablosu sisteminden (örneğin, yüzer PV tesisi veya rüzgar türbini) oluşmaktadır. Batık gemi okyanus tabanına demirlenmiştir ve şarj döngüsü sırasında su gemiden dışarı pompalanmakta ve boşaltma sırasında gemiye geri akmaktadır. Depolama sisteminin boyutu tamamen generatör ünitesine bağlıdır. Daha büyük ölçekli sistemler (birkaç GWh'lık) tahmini % 65-70 verimlilikle sunulurken yapılan bir uygulamada 1000 m derinlikte 360 m³ hacme sahip bir geminin %90 verimlilikle 984 kWh depolayabileceği gösterilmektedir [21].

Yer çekimi güç modülü (GPM), derin ve su dolu bir şaftta asılı duran büyük boyutlu bir piston, bu pistona bağlı pompa-türbin sisteminden ve bir dönüş borusundan oluşmaktadır [20]. Şarj işlemi sırasında su pompalanarak dönüş borusu aracılığıyla pistonu yukarı kaldırılmaktadır. Deşarj aşamasında ise pistonun aşağı hareketiyle su, dönüş borusundan geçerek türbinden geri döner ve böylece elektrik üretimi sağlanmaktadır. Sistem boyutları; 30-100 metre çapında piston, 500-1000 metre derinliğinde şaft ve şaft uzunluğunun yaklaşık yarısına karşılık gelen piston yüksekliği şeklinde değişkenlik göstermektedir. Bu teknolojinin hedeflediği güç ve enerji aralığı 40 MW / 160 MWh ile 1,6 GW / 6,4 GWh arasında değişmektedir Amaç, 40 MW/ 160

MWh ile 1,6 GW/6,4 GWh aralığında güç ve enerji sağlamaktır [21].

Hem Heindl Energy hem de EscoVale, benzer prensiplere dayanan sistemler geliştirmiş olup, bu sistemler daha büyük ölçekli uygulamalar ve farklı inşaat düzenleriyle öne çıkmaktadır. Heindl Energy'nin sistemine Hidrolik Hidro Depolama (HHS), EscoVale'nin sistemine ise Çığır Açan Enerji Depolama (GBES) adı verilmektedir. Her iki sistemin inşası, doğal bir piston oluşturmak amacıyla bir alanın kazılması ve bu alanın yapısal olarak güçlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Kazılan bölüm, ardından bir dönüş borusuna bağlanmakta ve su sızıntısını önlemek için tamamen sızdırmaz hâle getirilmektedir. Her iki sistemin çalışma prensibi, GPM ile temelde aynıdır. Önerilen depolama kapasiteleri 1 ila 10 GWh arasında değişmektedir Bu piston tabanlı teknolojilerin tamamı, geleneksel pompajlı hidroelektrik sistemlere kıyasla çok daha az topografik sınırlamaya ihtiyaç duymalarıyla önemli bir avantaj sunmaktadır [21].

Kuru yer çekimi enerji depolama teknolojileri, çalışma prensibi açısından ıslak sistemlerle benzerlik gösterse de su kullanımına ihtiyaç duymamaktadır[21].

Kuru yerçekimi enerji depolama teknolojileri kapsamında öne çıkan örneklerden biri, Kaliforniya merkezli teknoloji geliştirme şirketi ARES LLC tarafından geliştirilen Gelişmiş Raylı Enerji Depolama (Advanced Rail Energy Storage - ARES) sistemidir [24]. Bu sistemde, demiryolu taşıtlarıyla taşınan beton bloklar biçimindeki kütleler, elektrik şebekesinden sağlanan fazla yenilenebilir enerji veya düşük maliyetli elektrik kullanılarak yokuş yukarı çıkarılmakta; boşaltma aşamasında ise bu kütlelerin yerçekimi etkisiyle aşağı inmesine izin verilmektedir. Her biri yaklaşık 45-64 ton ağırlığında olan mekikler, %8,5 eğime sahip 16 km uzunluğundaki bir parkurda hareket etmektedir Sistem, bekleme durumunda enerji kaybı yaşamamakta (kendi kendine deşarj olmadan) ve %78-80 arasında değişen verimlilik ile 40 yıllık bir tasarım ömrü sunmaktadır. ARES LLC, bu teknolojiyi göstermek amacıyla California Tehachapi'de küçük ölçekli bir pilot proje gerçekleştirmiş olup, Nevada'da 50 MW / 12,5 MWh kapasiteli, ortalama %7,05 eğime sahip 9,3 km uzunluğunda bir hat üzerinde ve 780 tonluk toplam kütleye sahip mekiklerle ilk ticari sistemin inşasına devam etmektedir [21].

Bir diğer uygulamada ise ağır bir kütlenin yer altındaki dikey bir şaft içerisinde yukarı ve aşağı hareket ettirilmesi esas alınmaktadır. Bu sistemde, 3000 tona kadar ağırlığa sahip pistonların, mevcut maden kuyuları veya özel olarak inşa edilen şaftlar aracılığıyla yaklaşık 1500 metre derinliğe kadar taşınması planlanmaktadır. Madenlerde kullanılan kaldırma sistemlerine benzer şekilde; vinçler, halatlar ve kılavuz sistemleriyle kütle dikey doğrultuda hareket ettirilmektedir. Uygulama, %80-90 aralığında verimlilik, yaklaşık 0,5 saniyelik yanıt süresi, 50 yıla kadar tasarım ömrü ve 15 dakika ile 8 saat arasında değişen enerji çıkış süresi sunma potansiyeline sahiptir [21].

Benzer bir prensiple çalışan ancak altyapı gereksinimini azaltmayı hedefleyen bir başka sistem olan MGH Derin Deniz Enerji Depolama Teknolojisi, kütlelerin açık deniz üzerindeki yüzer bir platformdan dikey olarak yükseltilip alçaltılmasını esas alır. Böylece yer altı şaft altyapısına olan ihtiyaç tamamen ortadan kaldırılmaktadır. Bu yaklaşıma paralel olarak, StratoSolar tarafından geliştirilen sistemde, yaklaşık 20 km yüksekliğe yerleştirilen yüzer fotovoltaik platformlardan kütleler yukarı ve aşağı hareket ettirilerek enerji depolama işlemi gerçekleştirilir [1].

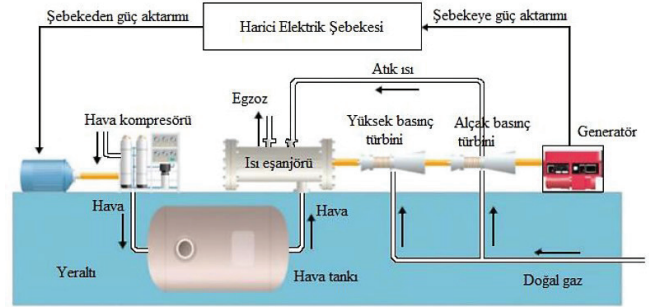
3. Isıl Enerji Depolama Teknolojileri

Termal enerji depolama (TED) olarak da adlandırılan ısı enerji depolama teknolojileri, bir depolama ortamının ısıtılması veya soğutulması yoluyla ısı enerjisinin tutulmasını sağlayan teknolojilerdir. Bu sayede depolanan enerji, daha sonraki süreçlerde hem ısıtma ve soğutma uygulamalarında hem de elektrik üretiminde kullanılabilir hale gelmektedir [1]. Termal depolama sistemleri, işlevsel olarak bir "ısı aküsü" olarak değerlendirilebilmektedir; zira bu sistemlerde ısı enerjisi, ileri bir zamanda kullanılmak üzere depolanmaktadır [2,22]. Dolayısıyla, bu teknoloji sayesinde enerji üretimi ile tüketimi arasındaki zamansal ve mekânsal uyumsuzlukların giderilmesi mümkün olmaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri, özellikle binalarda, endüstriyel tesislerde, tarımda ve ulaşım sektöründe gerçekleştirilen ısıtma ve soğutma uygulamalarında etkin biçimde kullanılmaktadır.

Söz konusu teknolojinin enerji sistemlerinde kullanımı sayesinde; doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılmakta,

genel sistem verimliliği artırılmaktadır. Ayrıca, enerji birim maliyetinin düşük olduğu zaman dilimlerinde depolanan ısı enerjisinin, yüksek maliyetli saatlerde kullanılmasıyla ekonomik optimizasyon sağlanmakta, bu durum hem yatırım ve işletme maliyetlerini düşürmekte hem de karbon emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla, termal enerji depolama sistemleri hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji arz güvenliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri, temelde dört ana bileşenden oluşmaktadır: ısıyı tutabilen bir depolama materyali, ısı iletim ortamı, ısıyı taşıyacak bir güç kaynağı ve ısı kaynağı [22].



Şekil 8. Örnek bir ısı enerji depolama yapısı [2]

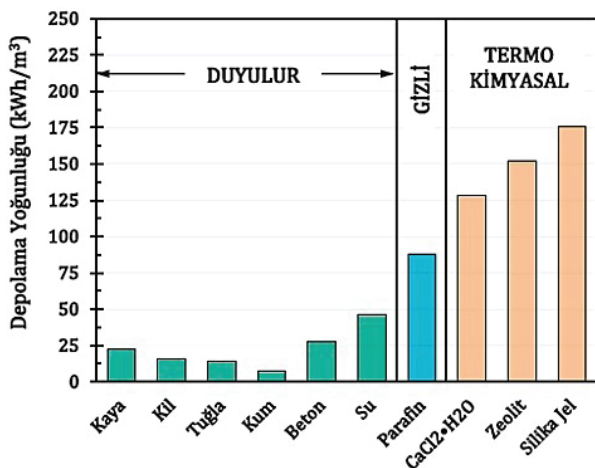
Isıl enerji depolama teknolojilerinde ısı enerjisinin depolanması ve yeniden kullanımı; malzemenin sıcaklık değişimi (duyulur ısı), faz değişimi (gizli ısı) veya termo-kimyasal reaksiyonları ile gerçekleştirilmektedir [6].



Tablo 9. Isıl enerji depolama teknolojileri

Depolama Türü	Temel Prensiptir	Avantajları	Dezavantajları	Depolama Ortamı	Uygulamalar
Termokimyasal	Isı enerjisinin kimyasal bağ enerjisi olarak depolanması ve tersinir reaksiyonlarla geri kazanılması	Yüksek enerji yoğunluğu; uzun süreli depolamaya uygun; çok düşük ısı kaybı; yalıtım gerektirmemesi; kompakt yapı	Gelişmekte olan teknoloji; karmaşık sistem tasarımı	Kimyasal bileşikler	Uzun süreli (mevsimsel) depolama
Duyulur Isı	Katı veya sıvı bir ortamın sıcaklığının değiştirilmesi yoluyla enerji depolanması (depolanan enerji depolama elemanı miktarı, sıcaklık farkı ve ısı kapasitesi ile orantılı)	Ucuz, kolay bulunur malzeme (özellikle su); uzun ömürlü; yangın ve toksik risk düşüktür; geniş uygulama alanı; kimyasal, fiziksel ve termodinamik karakteristiklerinin çok iyi bilinmesi, ısı kapasite değeri büyük, soğutma ve ısıtma sistemlerinde gerekli sıcaklık aralığında kararlı bir sıvı buhar dengesi bulunması	Yüksek sıcaklıkta verim düşer; donma, korozyon riski	Su, taş, beton, erimiş tuz, yağ, zemin vb.	Konut, endüstri, tarım ve ulaşımda yaygın kullanım; sıcak su tankları ve taş dolgu sistemler, akifer
Gizli Isı	Maddenin faz değişimi (katı-sıvı-gaz) sırasında sabit sıcaklıkta enerji depolanması	Küçük hacimde yüksek enerji depolama; sabit sıcaklıkta enerji çıkışı; çeşitli biyo-bazlı tuz hidrat alternatifleri (organik/inorganik) mevcut	Yüksek maliyet	Faz değişim malzemeleri (parafin, tuz hidratları, buz)	Bina iklimlendirme; buz depolama sistemleri; sabit sıcaklık gerektiren uygulamalar

Isıl enerji depolama teknolojileri, kullanılan depolama ortamına bağlı olarak farklı termal yoğunluk seviyelerine sahiptir. Aşağıdaki şekilde duyulur ısı, gizli ısı ve termo-kimyasal depolama yöntemlerinin enerji yoğunlukları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Söz konusu grafiksel karşılaştırma, özellikle yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda hangi teknolojinin daha uygun olabileceğine ilişkin önemli ipuçları sağlamaktadır.



Şekil 9. Depolama ortamına göre farklı tip ısı enerji depolama yöntemlerinin depolama yoğunlukları [6]

Aşağıda yer alan tabloda, farklı ısı enerjisi depolama yöntemlerinin kapasite (kWh/ton) ve ısı gücü (MW) değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. En yüksek enerji yoğunluğu ise termo-kimyasal depolama teknolojilerindedir. Bu değerler, termo-kimyasal sistemlerin yüksek yoğunluklu depolama uygulamaları için daha uygun olduğunu göstermektedir.

Tablo 10. Farklı tip ısı enerji depolama tekniklerinin karşılaştırılması [6]

Isıl Enerji Depolama Yöntemi	Kapasite (kWh/ton)	Isıl Güç (MW)	Maliyet (€/kWh)
Duyulur	10 – 50	50 – 90	0,1 – 10
Gizli	50 – 150	75 – 90	10 – 50
Termo-kimyasal	120 – 250	75 – 100	8 – 100

KAYNAKÇA

[1] İnternet: Elektrikli Araçlar ve Depolama Teknolojileri Bilgilendirme Notu. Web: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/elektrikli-araclar-ve-depolama-teknolojileri-bilgilendirme-notu-120721.pdf> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[2] Kocaman, B. (2021). ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ. Ankara: İksad Yayınevi.

[3] Emeksiz C., Kara B., 'Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi', International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 6(2): 134-142, (2022)

[4] Turan, A. Yönetken, ‘Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi’, Afyon Kocatepe Üniversitesi. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 : 113-121, (2016).

[5] Efe, Ş., & Güngör, Z. A. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(32), 947-955. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1048673>.

[6] İnternet: TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu. Web: <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[7] Mühendis V., “Li - İyon Pillerin Farklı Kullanım Koşullarında Performanslarının Ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2006)

[8] Özcan Ö.F., Karadağ T., Altuğ M., Özgüven Ö.F., ‘Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması’, Gazi University Journal of Science, 8(2): 276-298 (2021).

[9] internet: Redoks Akışkan Piller. Web: <https://muhendisbeyindefteri.wordpress.com/2016/11/17/redoks-akiskan-piller/> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[10] internet: Vanadyum. Web:[https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/vanadyum#:~:text=Vanadyum%2C%20esas%20olarak%20C3%A7elik%20ala%C5%9F%C4%B1mlar%C4%B1n,ak%C4%B1-C5%9F%20pillerinde%20\(VRB\)%20kullan%C4%B1lmaktad%C4%B1r](https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/vanadyum#:~:text=Vanadyum%2C%20esas%20olarak%20C3%A7elik%20ala%C5%9F%C4%B1mlar%C4%B1n,ak%C4%B1-C5%9F%20pillerinde%20(VRB)%20kullan%C4%B1lmaktad%C4%B1r) adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[11] İnternet: Enerji ve Ulaştırma Sektörleri Dönüşümünde Batarya Teknolojilerinin Rolü: Eğilimler, Fırsatlar ve Yenilikçi Uygulamalar. Web: <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/11/Enerji-ve-Ulastirma-Sektorleri-Donusumunde-Batarya-Teknolojilerinin-Rolu-Egilimler-Firsatlar-ve-Yenilikci-Uygulamalar.pdf> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[12] İnternet: Türkiye için Batarya Enerji Depolama Seçenekleri. Web: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2024/08/SHURA-EDM-Turkiye-icin-Batarya-Enerji-Depolama-Secenekleri-01.08.2024.pdf> adresinden 23 Temmuz 2025'te alınmıştır.

[13] Emeksiz C., Kara B., 'Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi', *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6(2): 134-142, (2022).

[14] U.S. Department of Energy, “Types of Fuel Cells.” [Çevrimiçi]. Erişim: 23 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>

[15] İnternet: Enerji Depolama Teknolojileri Pompaj Depolamalı Hes Projeleri. Web: <http://tesab.org.tr/attachments/article/120/ENERJ~.pdf> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[16] İnternet: Hidrolik Ve Yenilenebilir Enerji Çalışma Grubu Hidrolik Enerji Alt Çalışma Grubu Raporu. Web: https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2017/10/hidrolik_enerji_raporu_304.pdf adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[17] İnternet: Enerji Depolama Sistemleri. Web: <https://www.termodinamik.info/makale/enerji-depolama-sistemleri> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

[18] İnternet: Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri - II. Web: <https://www.mmo.org.tr/istanbul/haber/elektrik-enerjisi-depolama-sistemleri-ii> adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

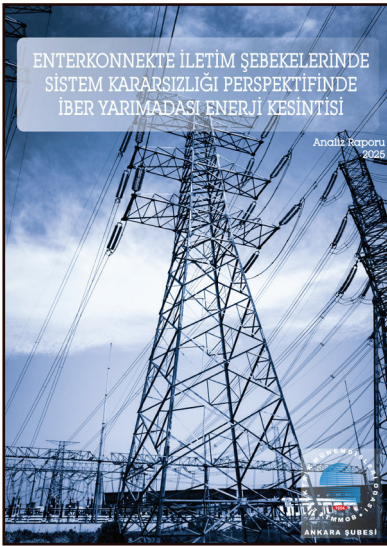
[19] M. Yılmaz, "Basınçlı Hava ile Enerji Depolama," Bilim ve Teknik, sayı 546, ss. 50-53, Temmuz 2013. [Çevrimiçi]. Erişim: 23 Temmuz 2025. Erişim adresi: <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf?dergiKodu=4&cilt=46&sayi=812&sayfa=50&yaziid=34928>

[20] Y. Uludüz ve A. T. Erdoğan, "Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleri," Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27(1):151-159, 2012.

[21] Botha C.D., Kamper M.J., 'Capability study of dry gravity energy storage', Journal of Energy Storage, 23: 159-174, (2019).

[22] İnternet: Termal Enerji Depolama Sistemlerinin Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. Web: https://www.researchgate.net/publication/337686006_Termal_Enerji_Depolama_Sistemlerinin_Uygulanabilirliginin_Incelenmesi adresinden 6 Nisan 2023'te alınmıştır.

ENTERKONNEKTE İLETİM ŞEBEKELERİNDE SİSTEM KARARSIZLIĞI PERSPEKTİFİNDE İBER YARIMADASI ENERJİ KESİNTİSİ ANALİZ RAPORU 2025 YAYINLANDI



EMO Ankara Şubesi Enerji Komisyonu İber Yarımadası Sistem Çökmesi Çalışma Grubu tarafından hazırlanan "Enterkonnekte İletim Şebekelerinde Sistem Kararsızlığı Perspektifinde İber Yarımadası Enerji Kesintisi Analiz Raporu 2025" elektronik olarak yayına açıldı. Rapora ulaşmak için haberimizin devamındaki bağlantıyı takip ediniz.

28 Nisan 2025 tarihinde İber Yarımadası'nda yaşanan ve kıta düzeyinde etkiler yaratan büyük çaplı elektrik iletim sistemi çöküşünü teknik, yapısal ve sistemsel açıdan detaylı biçimde inceleyerek, benzer bir olayın Türkiye'de veya başka bir ülkede yaşanmasının önüne geçebilecek stratejik çıkarımlar ve önlemler sunmak amacıyla hazırlanan bu çalışma, teknik içeriği ve önerileriyle yalnızca meslektaşlara değil; aynı zamanda enerji alanında politika geliştiren kurumlara, sistem operatörlerine ve akademik çalışmalara katkı sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, benzer teknik raporların hazırlanmasına örnek teşkil

ederek, ülkemizin enerji sistemlerinin daha dirençli ve esnek hâle getirilmesine yönelik stratejik bir kaynak niteliği taşımaktadır.

ENTERKONNEKTE İLETİM ŞEBEKELERİNDE SİSTEM KARARSIZLIĞI PERSPEKTİFİNDE İBER YARIMADASI ENERJİ KESİNTİSİ ANALİZ RAPORU 2025