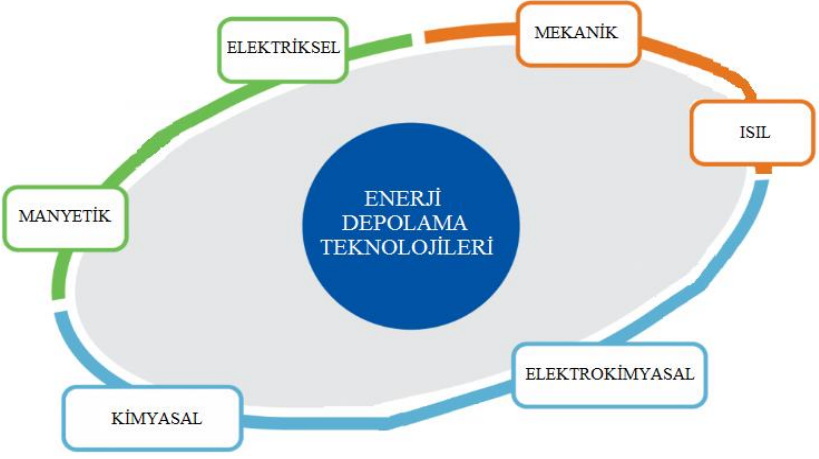


ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

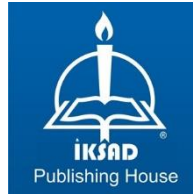
Doç. Dr. Behçet KOCAMAN



ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ



Doç. Dr. Behçet KOCAMAN



Copyright © 2021 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic
Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TURKEY TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2021©

ISBN: 978-625-8007-97-8
Cover Design: İbrahim KAYA
December / 2021
Ankara / Turkey
Size = 16 x 24 cm

ÖNSÖZ

Son yıllarda, artan nüfus ve teknolojiye yaşanan gelişmelerle birlikte yaşam standartlarının yükselmesiyle enerjiye olan ihtiyaç her geçen artmaktadır. Bu artan enerji ihtiyacı, ülkemizin sınırlı enerji kaynaklarıyla karşılanması günümüz şartlarında mümkün gözükmemekte ve enerji üretimi ile tüketimi arasında bulunan fark giderek büyümektedir. Dolayısıyla, enerji ihtiyacının karşılanması için mevcut enerji kaynaklarımızın daha etkili bir şekilde kullanılması ve enerjinin verimli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Ayrıca enerji talebinde ortaya çıkan hızlı artışı karşılamak için rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sağlanan enerjinin verimli olarak depolanması önem arz etmektedir. Ayrıca enerji ihtiyacını karşılayacak en uygun enerji dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesi enerji arz güvenliği açısından faydalı olacaktır. Bunlara ek olarak enerji depolama teknolojileri; puant yük zamanındaki enerji talebini karşılamak, gemilerin güç sistemleri, elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar için gereklidir. Bu nedenle son zamanlarda, enerji depolama teknolojileri alanında, önemli geliştirme ve araştırma çalışmaları yapılmaktadır.

Bu kitapta, çeşitli elektrik güç sistemlerinde kullanılan; kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekanik, ısı ve manyetik enerji depolama teknolojilerinin çalışma prensipleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, bu teknolojilerin avantajları, dezavantajları, uygulamaları, maliyetleri, karakteristikleri, teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırmalı verilerle açıklanmıştır.

Hazırlanan bu mesleki kitap, enerji depolama konusunda çalışan araştırmacılara ve meslektaşlarıma faydalı olmasını ve mühendislik fakültelerinde okutulan enerji depolama ile ilgili derslerde (enerji depolama, enerji depolama sistemleri, enerji depolama teknolojisi vb.) yararlanılacak bir kitap olarak kullanılmasını ümit etmekteyim. Kitap çalışması sürecince her zaman yanımda olan beni yalnız bırakmayan, daima bana destek olan ailem, eşim ve çocuklarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
1.GİRİŞ	5
1.1. Enerji Depolamanın Avantajları.....	9
1.2. Enerji Depolamanın Dezavantajları	10
2. KİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ.....	16
2.1. Hidrojen.....	16
2.2. Sentetik Doğalgaz.....	21
3. ELEKTROKİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	23
3.1. Batarya (Pil).....	23
3.1.1. Kurşun Asit Pil.....	25
3.1.2.Lityum İyon Pil.....	26
3.1.3. Vanadyom Redox Akış Pili	29
3.1.4. Metal Hava Pil	33
3.1.5 Akış Piller	36
3.1.6. Lityum Metal Piller.....	37
3.1.7. Sodyum Sülfür Piller.....	40
3.1.8. Nikel Kadmiyum Piller	41
3.2. Yakıt Hücresi.....	46
3.2.1. Proton Değişimli Membran Yakıt Hücresi	48
3.2.2. Alkali Yakıt Hücresi	49
3.2.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi.....	51
3.2.4. Katı Oksitli Yakıt Hücresi	53
3.2.5. Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücresi.....	54
4. ELEKTRİKSEL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	56

4.1. Kapasitörler	56
4.2. Ultra Kapasitörler/Süper Kapasitörler	58
5. MEKANİKSEL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ.....	64
5.1. Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama.....	64
5.2. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Teknolojisi.....	71
5.3. Volan Enerji Depolama Teknolojisi	75
6. TERMAL (ISIL) ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	79
6.1. Erimiş Tuz Enerji Depolama	83
6.2. Duyulur Isı Enerji Depolama.....	86
6.3. Gizli Isı Enerji Depolama	89
7. MANYETİK ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	91
7.1. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)	91
KAYNAKLAR.....	98

1.GİRİŞ

Sürekli artan enerji ihtiyacı sebebiyle üretilen ve tüketilen enerji arasındaki fark giderek büyümektedir. Ülkemizin enerji kaynakları potansiyeli, artan enerji ihtiyacını karşılayamadığından dolayı, hali hazırda bulunan enerji kaynaklarımızdan daha etkin bir şekilde yararlanmak için yapılan çalışmalar her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Bu yüzden artan enerji ihtiyacını karşılamak için enerjinin verimli bir şekilde depolanması faydalı olacaktır.

Cumhurbaşkanlığı Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu (BTYPK), tarafından tespit edilen 12 öncelikli alan içerisinde enerji depolama konusunun olması, ülkemizin enerji sektörüne ne derece önem verdiğini ve gelecek yol haritasında, enerjinin öncelikli yerinin olduğunu göstermektedir.

Enerji depolama; bir enerji türünün başka bir enerji türünde veya aynı türde sonradan yeniden kullanılması amacıyla saklanması olarak tanımlanmakta ve üstesinden gelinmesi gereken önemli bir konudur. Enerjinin depolanması fikri, uzun yıllar öncesine dayanmaktadır. Örneğin bataryaların kullanımı, 1800'lerin başlarına dayanmaktadır.

Bunlarla birlikte, Amerika Birleşik Devletlerinde pompalı hidroelektrik enerji depolamayla ilgili yapılan uygulamalar, 1930'lu yıllara kadar uzanmaktadır. Enerji depolama, mevcut üretim ve iletim altyapılarını optimize ederken aynı zamanda pahalı yükseltmeleri önleyecektir. Enerji depolama teknolojilerinde kullanılan cihazlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına (güneş ve rüzgar gibi) bağlı olarak

ortaya çıkan büyük ölçekli güç dalgalanmalarının şebekeye etkisini önleyebilir. Böylece enerji depolama teknolojileri ile şebekenin güç kalitesi ve güvenilirliği artırabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre dostu olmaları nedeniyle bunların enerji üretiminde kullanılmasıyla sera gazı emisyonları azaltabilir. Bu nedenle, tam olarak yenilenebilir enerjiye geçişin yapılması, modern enerji sistemlerinin arz güvenirliliğinin ve kararlılığının sağlanması, üretimdeki enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması ve maliyetlerin en az seviyeye indirilmesi, enerji iletim ve dağıtım probleminin azaltılmasında enerji depolama teknolojilerine olan gereksinim, gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla yük için ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacının her durumda başarılı bir şekilde karşılanması için enerji depolama teknolojileri büyük bir öneme sahiptir.

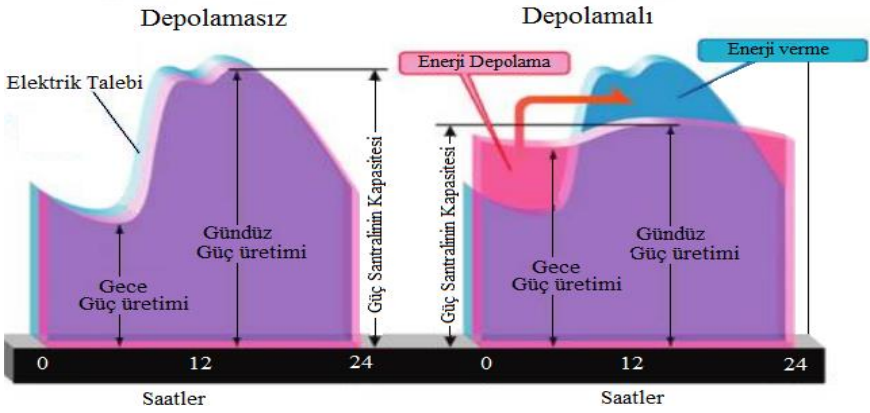
Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla enerji çeşitli enerji depolama teknolojilerinde depolanmaktadır. Depolanan enerji, şebekenin mevcut olmadığı veya talebi karşılayamadığı zamanlarda yükün talep ettiği enerjinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Özellikle şebeke bağlantısı olmadan yapılan uygulamalarda, enerji depolama teknolojilerinin araştırılması ve incelenmesi çalışmalarına hız verilmesi önemlidir.

Enerjinin depolanması için geliştirilen teknolojilerinin parametreleri; depolama kapasitesi, güç kapasitesi, enerjinin kullanılabilirliği, deşarj süresi, verimliliği, sağlamlığı (dayanıklılığı) ve enerjiyi vermedeki

sürekliliği olarak belirtilebilir. Bir enerji depolama cihazının sağlayabileceği maksimum anlık çıktısı, güç kapasitesi olarak bilinir ve genellikle kilowatt (kW) veya megawatt (MW) cinsinden ölçülür. Depolama cihazın depolayabileceği elektrik enerjisi miktarı, enerji depolama kapasitesini verir ve kilowatt-saat (kWh) veya megawatt-saat (MWh) cinsinden ölçülür. Geri kazanılabilecek elektrik enerjisi miktarının, depolama cihazını şarj etmek için kullanılan elektrik enerjisine oranının yüzde cinsinden ifadesi, depolama cihazının verimini verir. Depolama cihazının cevap süresi, gücü serbest bırakmaya başlaması için geçen süredir.

Enerji depolama teknolojilerinde bazı zorluklar vardır. Bunlar, büyük güçlü talep değişimi olması durumunda kW olarak depolamadaki puant gücünün ve entegre kapasite oranının armasına sebep olur. İlbahardan yaza veya sonbahardan kışa değişen üretim (mevsimsel depolama) en pahalı ve çevreyi yıkıcı etkisinden dolayı depolamada bir zorluktur. Teknolojiye ve depolama süresine bağlı olarak tüm depolama seçenekleri zaman içerisinde depolanana enerjinin %5-50 oranında kısmını kaybeder.

Enerji depolama teknolojileri, elektrik güç sistemine enerji üretim, iletim, dağıtım ve tüketici düzeylerinde entegre edilebilir. Enerji üretim düzeyinde; enerjiye olan talebin az olduğu veya enerjinin ucuz olduğu saatlerde depolanıp, yüksek talebin olduğu veya enerjinin pahalı olduğu saatlerde kullanılması, dengeleme ve rezerv güç olarak kullanılabilir. Buna uygun olarak yükü eşitlemek için üretim ve talep dengesi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Yükü Eşitlemek İçin Üretim ve Talep Dengesi (Yang,2011)

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda şebekeye depolanan enerji aktarılması sonucunda şebekeyi rahatlatarak ve sürekli dengeli bir şebeke meydana getirmek mümkün olabilmektedir.

Üretilen enerjinin fazla ve tüketilen enerjinin az olması durumunda frekans artar. Üretilen enerjinin az ve tüketilen enerjinin fazla olması durumunda ise frekans azalır. İşte enerji üretim ve tüketim arasında meydana gelebilecek dengesizliği gidermek amacıyla kısa süreli güç desteği ve frekans regülasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle enerji depolama teknolojileri, enerji iletim düzeyinde frekans kontrolünde kullanılabilir. Enerji dağıtım düzeyinde, gerilim denetimi, kapasite desteği gibi durumlarda kullanılabilir. Tüketici düzeyinde ise, tepe yük düzeltme ve maliyet yönetiminde kullanılabilir.

Enerji depolama teknolojisinin seçiminde, kapasite (kWh), çıkış gücü (kW), çevrim süresi, ömür (yıl), cevap süresi (ms), deşarj derinliği (%), kendiliğinden deşarj (süre), maliyet (\$), bakım ve çalıştırma

maliyeti, boyutlar (kg, cm³) ve çalışma sıcaklığı (°C) gibi kriterler göz önüne alınmalıdır. Başka bir ifadeyle, seçilecek teknolojinin depolama kapasitesinin ve şarj/deşarj veriminin yüksek olması, kendi kendisine boşalmanın ve kayıp miktarının az olması, uzun ömürlü olması, maliyetlerinin ucuz olması ve yüksek enerji yoğunluklu olması (kWh/kg veya kWh/lt) gerekir.

Her bir enerji depolama teknolojisinin, kendine ait avantajları ve dezavantajları vardır. Ayrıca şarj/deşarj, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, maliyeti, tepki süresi, yaşam döngüsü gibi farklı konulardan dolayı enerji depolamada zorluklarla karşılaşmaktadır.

1.1. Enerji Depolamanın Avantajları

- Enerji üretmek için kullanılan sistemlerinin işletme verimliliğini, dayanıklı ve esnek olmasını sağlayarak, enerjinin sürdürülebilirliğini artırır.
- Enerji arz ve talep süreleri arasında oluşan uyumsuzluğu azaltır.
- Şebekedeki gerilim ve frekans regülasyonu sağlar.
- Güneş ve rüzgar gibi sürekli olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarından daima enerji üretilmesi sorunu, enerji depolama teknolojileriyle azaltılabilir. Böylece, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payı artar. Bu sayede, iklim değişikliğinin zararlı etkileri azalır ve enerji üretiminde fosil yakıtların kullanım miktarı düşürülerek karbon salımının azaltılmasına büyük katkı sağlanır.

- Enerji üretim santrallerinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini düşürerek ekonomik açıdan katkı sağlar.
- Güç kalitesinin iyileştirmesine yardımcı olur.
- Bazı durumlarda enerji depolama teknolojileri, atık enerjiyi sisteme geri kazandırdığı için enerji üretim sisteminin verimini artırarak yakıt kullanımını azaltılabilir.

1.2. Enerji Depolamanın Dezavantajları

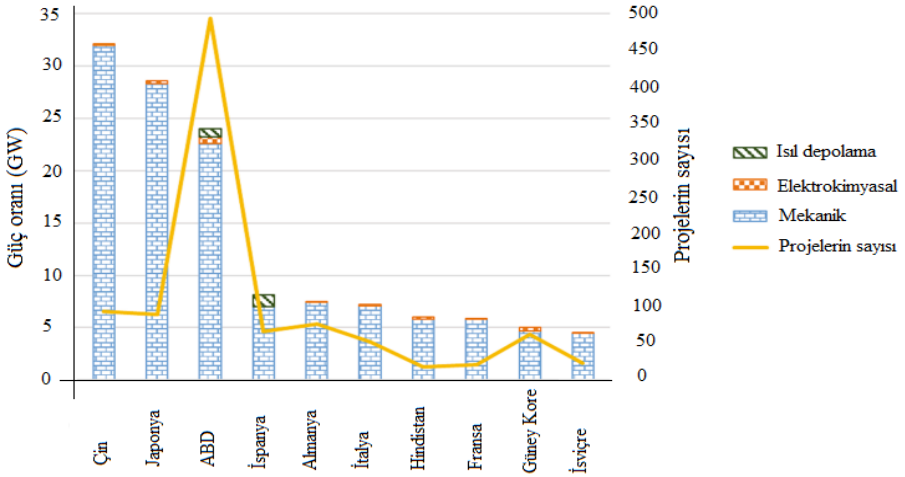
Enerji depolama teknolojilerinin bir çok üstünlüğünün yanında bazı dezavantajları da vardır.

- Enerji depolama teknolojilerinin elektrik şebekesine entegre edilmesi için büyük değerde bir yatırım maliyetine sebep olur. Bu da depolama teknolojisinin ilk yatırım maliyetini yükseltir.
- Elektrik enerjisinin depolanabilmesi için öncelikle şekil değiştirmesi gerekir (alternatif akımdan doğru akıma, elektrik enerjisinden kimyasal enerjiye dönüştürmek vb). Bu durum, enerjinin depolanmasında verim kaybına sebep olur.
- Gücü yüksek olan enerji sistemleri için, genel olarak pompalanmış hidroelektrik ve sıkıştırılmış hava enerji depolama teknolojileri uygulanması gerekir. Bu teknolojiler, her istenilen yere ve istenilen her araziye kurulması imkansızdır. Eğer kurulması yapılırsa yüksek bir maliyet ortaya çıkar.

Enerji depolama teknolojileri; temelde besleyiciler ve acil durum terminallerin enerji ihtiyacını karşılamak için küçük güçlü uygulamalar olan şebekeden bağımsız olan alanlarda, şehir şebekesi

beslemesinde, puant zamanlarında şebeke bağlantılarında ve güç kalitesi kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır.

Enerji depolamanın önemli olması nedeniyle dünya genelinde bir çok ülke farklı enerji depolama teknolojileri kullanarak enerjiyi depolamaktadır. Enerji depolama kurulu kapasitesine göre ilk on ülke Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Enerji Depolama Kurulu Kapasitesine Göre İlk On Ülke (DOE Global Energy Storage Database. 2018)

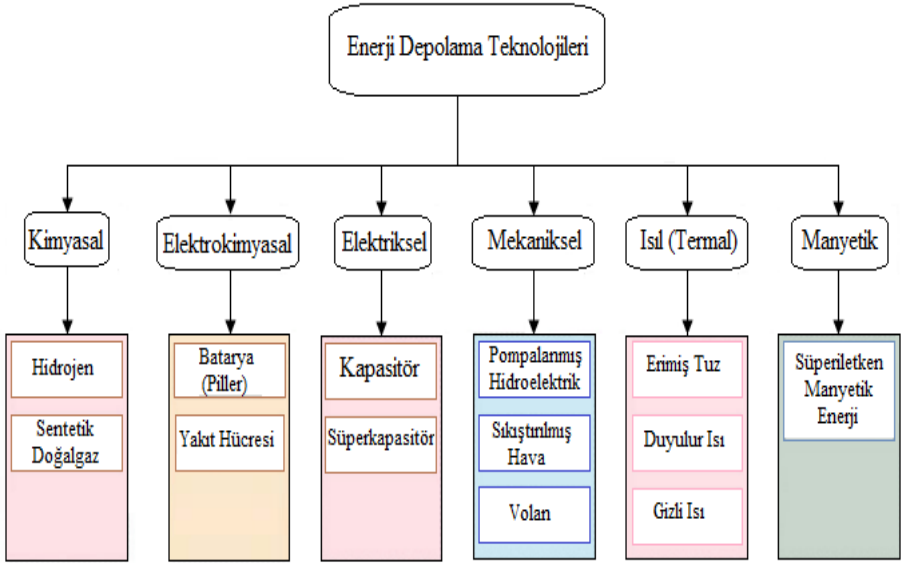
Şekil 1.2’de görüldüğü gibi enerji depolamanın en fazla mekanik enerji depolama teknolojileri kullanılarak yapıldığı ve ilk sırayı Çin almaktadır. Çin’den sonra en fazla kurulu kapasitesine sahip ülke Japonya ve 3. sırada ise Amerika Birleşik Devletleri gelmektedir.

Enerji depolama teknolojileri, güç üretim sistemleri ile birlikte endüstriyel uygulamalarda, dizüstü bilgisayar ve cep telefonları gibi mobil elektronik cihazlarda, otomotiv sektöründe, bağımsız elektrik sistemleri veya şehir şebekesi uygulamasında, küçük güçlü acil durum

sistemlerinin beslemesinde, kara, deniz, hava ve uzay araçlarının güç tahrik sistemlerinde, puant saatlerindeki enerji talebini karşılamak amacıyla şebeke bağlantısı uygulamalarında ve güç kalitesinin kontrol edilmesi için yapılan uygulamalarda kullanılmaktadır.

Enerji depolama teknolojileri kısa, orta ve uzun süreli depolama olarak kullanılabilir. Batarya, süperkapasitör ve volan gibi kısa süreli (saniye- dakika seviyesinde) enerji depolama teknolojileri; güç dengeleme ve kesintisiz güç kaynakları sistemlerinde kullanılır. Orta süreli (dakika- saat seviyesinde) enerji depolama teknolojileri; yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgar gibi) elektrik üretimi, şebekeye besleme yapmak, gerilim dengelemesinde ve peak-shaving (maksimum güç talebi olması durumunda elektrik enerjisi tüketimini azaltmak için kullanılan ve üretimin tüketimden fazla olduğunda enerjinin depolanıp, az olduğunda şebekeye verilerek güç dengesinin sağlanması) amacıyla kullanılır. Bunlara batarya, termokimyasal ve redoks akış pilleri örnek olarak verilebilir. Uzun süreli (saat-gün/ay seviyesinde) enerji depolama teknolojileri; hacimli depolama (pompalanmış hidroelektrik, erimiş tuz, basınçlı hava) ve gece enerji birim fiyatı düşükken depolanıp ihtiyaç durumunda kullanılması amacıyla kullanılmaktadır.

Enerji depolama teknolojilerini genel olarak; kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekaniksel, ısıl (termal) ve manyetik enerji depolama teknolojileri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın ayrıntıları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Enerji Depolama Teknolojilerinin Sınıflandırılması (Fang, Wang. 2021)

Enerji depolama teknolojileri, büyük (Giga Watt, GW), orta (Mega Watt, MW) ve küçük ölçekli (kilo Watt, kW) ticari uygulamalarda kullanılmaktadır.

Büyük ölçekli (GW) enerji depolama teknolojileri:

Pompalanmış hidroelektrik, Sıkıştırılmış hava enerji depolama

Kimyasal depolama (hidrojen, büyük ölçekli >100 MW, haftalar ve aylara kadar)

Orta ölçekli (MW) enerji depolama teknolojileri:

Güç: Süper kapasitör, süperiletken manyetik enerji depolama, volanlar

Enerji: Kurşun asit, Lityum iyon, sodyum sülfür ve akış pilleri gibi piller

Enerji ve Güç: Kurşun asit ve lityum iyon piller, hidrojen enerji depolama/ sıkıştırılmış hava enerji depolama/ pompalı hidroelektrik enerji depolama (küçük ölçekli 10 MW<P> 100 MW, saatten güne kadar)

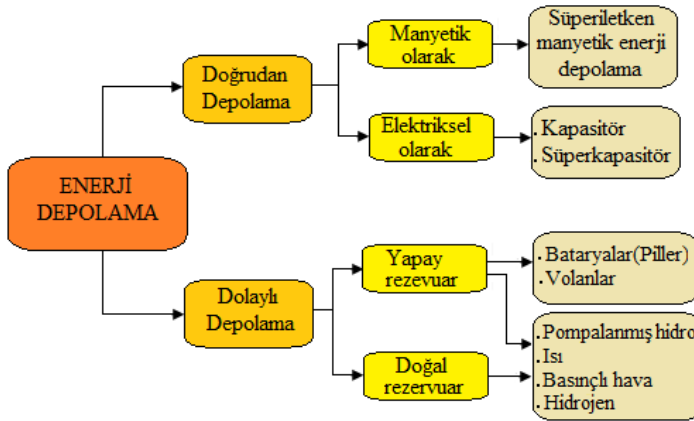
Küçük ölçekli (kW) son kullanıcı enerji depolama teknolojileri:

Güç: Süper kapasitör, volanlar

Enerji: Kurşun asit ve lityum iyon pilleri gibi

Enerji Güç: Lityum iyon piller

Enerjiyi depolamak için doğrudan veya dolaylı enerji depolama teknolojileri kullanılmaktadır. Ancak kullanılan enerji depolama teknolojilerinin çoğunluğu dolaylı depolama yöntemlerinden oluşmaktadır. Enerji depolama yöntemleri Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji depolama yöntemlerinin belirtildiği Şekil 1.4'te görüldüğü gibi süper kapasitör, kapasitör ve süperiletken manyetik enerji depolama

teknolojileri doğrudan depolama yöntemi iken Bataryalar (piller), pompalanmış hidro, ısı, basınçlı hava ve hidrojen gibi teknolojiler dolaylı depolama yöntemi sınıfına girmektedir.

Günümüzde çok çeşitli enerji depolama teknolojisi geliştirilmesine rağmen hiçbir teknoloji, tüm uygulamaların gereksinim duyduğu özelliklere tam anlamıyla sahip değildir. O nedenle teknolojinin kullanılacağı uygulama için hangi enerji depolama teknolojisinin seçileceğine depolama teknolojisi çeşitlerinin karşılaştırılması sonucu belirlenmesi gerekir. Enerji depolama teknolojileri, teknik olarak enerji kapasitesi, maksimum depolama süresi, özgül enerji ve özgül güç değerleri açısından birbirlerinden farklılık gösterirler. Teknolojilerin işletme ve kurulum maliyetleri ekonomik açıdan büyük farklılıklar gösterebilir. Enerji depolama teknolojisi seçimi yapılırken kullanılacak teknolojinin yapılacak uygulamaya uygunluğu özenli bir biçimde analiz edilerek tespit edilmelidir.

Enerji depolama teknolojilerinin ticarileştirilmesini engelleyen bir çok engel bulunmaktadır. Bunların bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Enerji depolama teknolojilerini/cihazlarını geliştirenler, enerji depolamayı şebekenin altyapısı olarak görürken iletim sistemi işleticileri ise bunu yenilenebilir enerji tesisinin bir parçası olarak görmektedir. Bu durumda enerji depolama için kimin ödeme yapacağı net olarak belirlenememesi, teknolojinin ticarileştirilmesi için bir engel olarak görülmektedir.

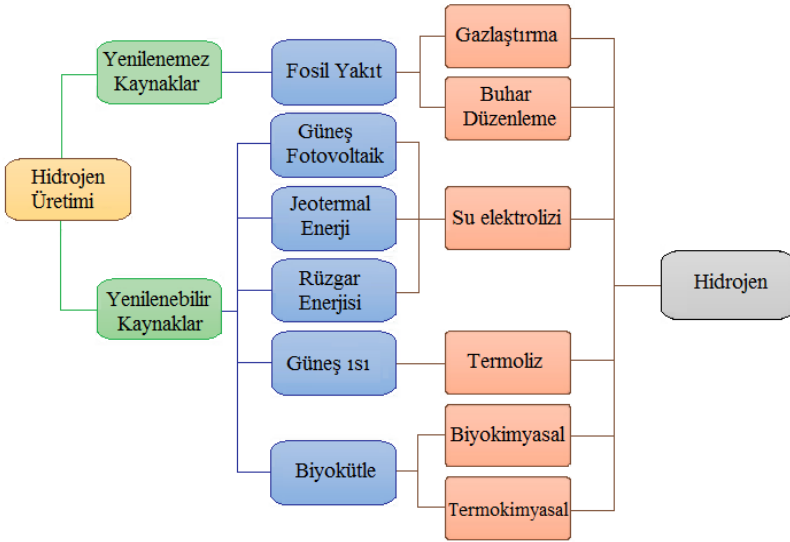
- Tüketiciler, enerji depolamanın faydalarının tasarruf ve ayrıca güç kalitesi açısından tam olarak ne olduğunu anlamadığından teknolojinin ticarileşmesi gecikmektedir.
- Teknoloji üreticilerin deneyim eksikliğinin olması, teknolojinin ticarileşmesinde bir engeldir. Bunun için müşterinin güvenini artırmak adına bir takım tanıtım projesi yapılarak bu engel çözülebilir.
- Teknoloji üreticilerinin deneyim eksikliği ve tüketicilerin enerji depolamanın faydalarını tam olarak anlamadığından bunları çözmek için yüksek sermaye maliyetlerine olan ihtiyaç nedeniyle enerji depolama teknolojilerinin ticarileşmesini engellemektedir.

2. KİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

2.1. Hidrojen

Hidrojen, bir enerji sisteminin elektrik, ısı ve ulaşım sektörleri arasında bir köprü görevi görür. Büyük miktarlarda kesikli rüzgar enerjisini entegre etmek için çok çekici bir seçenek haline gelmesi nedeniyle, bu sektörler arasında etkileşime izin veren tek enerji depolama sistemidir. Hidrojen depolama teknolojisinde, hidrojenin oluşturulması, depolanması ve gerekli uygulamalar için kullanılması gibi üç aşaması vardır.

Hidrojenin elde edilmesinde, fosil yakıtlardan çıkarma, buharın metan ile reaksiyona girmesi ve elektrik (elektroliz) olmak üzere üç temel teknik vardır.



Şekil 2.1: Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretim Yöntemleri (Olabi .2021)

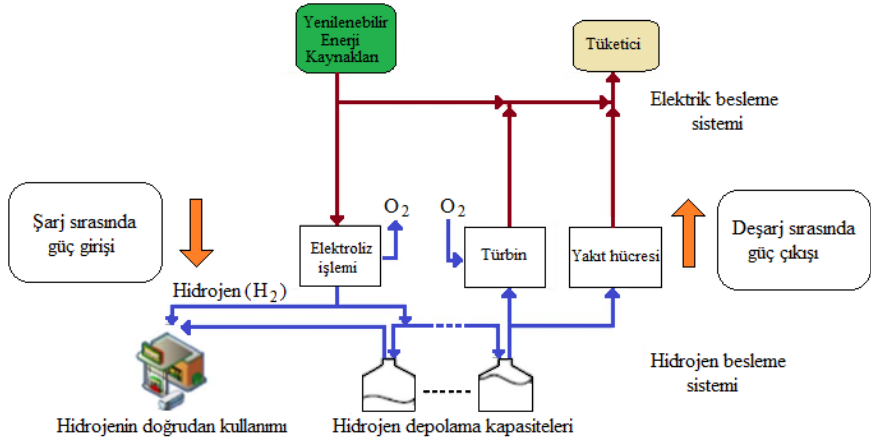
Hidrojen; ulaşımda, güç üretim tesislerinde veya endüstriyel uygulamalarda yakıt olarak kullanılmasının yaygın hale gelmesi için hidrojen depolama teknolojilerinin maliyetlerinin az, verimliliğin ve dayanıklılığın yüksek, uzun ömürlü, hafif ağırlıkta ve düşük hacimde, kısa dolum süresi ile standartlara uygun olması gerekmektedir. Hidrojen depolama teknolojilerinin 2030 hedefleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Hidrojen depolama teknolojilerinin 2030 hedefleri

Depolama Tekniği	2030 Hedefi
Hidrojenin yer altında depolanmaması	Hidrojenin tuz mağaralarında depolanması
Basınçlı tanklar	Yüksek basınçlı tanklar için malzeme maliyetinin 15\$/kWh altına düşürülmesi
Kriyojenik depolama ve	Enerji oluşan kayıpları %30’a düşürerek

sıvılaştırma	hidrojen sıvılaştırma için verimin artırılması
Metal hidritler ve karbon nano-yapılar	AR-GE fonlarının sürekliliğinin sağlanması

Yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen elektrik enerjisinin yük talebini karşıladıktan sonra kalan enerjinin fazlası, bir elektrolizör birimi vasıtasıyla hidrojenin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bir elektrolizör kullanarak güç üretmenin tahmini maliyetleri, 300 €/kW - 1,100 €/kW'a kadar olup son derece değişkendir. Elektroliz yardımıyla meydana gelen hidrojen, farklı özelliklerdeki hidrojen tanklarında depolanabilir. Hidrojen enerji depolama sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Hidrojen Enerji Depolama

Hidrojenin depolanması bazı avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

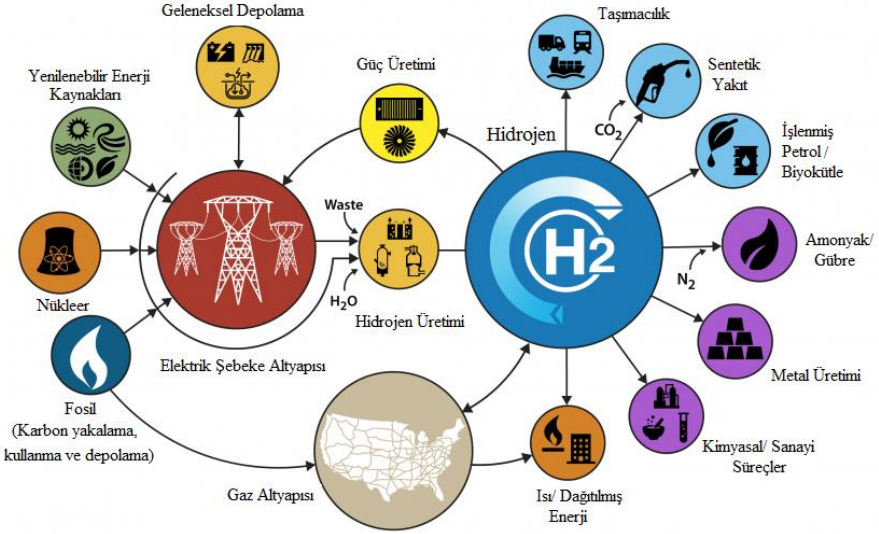
- Yakıtın kütle ve hacim açısından yoğunluklarını arttırmak,
- Kullanılan sistemlerin verimliliğini iyileştirmek,
- Yakıtın taşınabilirliğini kolaylaştırıp güç üretim yeteneğini iyileştirmek,
- Farklı alanlarda yakıtın kullanımını yaygınlaştırmak,
- Yakıt için ekonomik değeri artırmak,
- Kullanılan yakıt için kullanım süresini yükseltmek,
- Yüksek verimli, sera gazı emisyonu olmayan, çevreye dost ve sürdürülebilir sistemler elde etmeyi sağlamak gibi avantajları vardır.

Depolanan bu hidrojen ihtiyaç olduğu zaman bir yakıt hücresi teknolojisi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek yükün ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamak için kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında, hidrojenin depolanması için geliştirilen sistemler, gelecekte kendinden söz ettiren önemli enerji depolama yöntemleri arasında yer alacağı değerlendirilmektedir.

Bir enerji depolama teknolojisi olarak hidrojenin ek esnekliği vardır. Hidrojen, elektrikten veya doğal gaz gibi diğer birincil enerji kaynaklarından üretilebilir. Daha sonra yakıt olarak kullanılır veya elektriğe geri dönüştürülür. Hidrojen aynı zamanda amonyak veya hidrokarbonlar gibi yakıtlar ve diğer enerji taşıyıcılarının üretimi için moleküler bir yapı taşı olarak kullanılabilir. Hidrojen, hem fiziksel hem de kimyasal yöntemler kullanılarak çeşitli şekillerde depolanabilir. Gaz hidrojen depolaması, tuz mağaralarındaki basınçlı kaplar, tükenmiş gaz sahalarındaki ve kaya mağaralarında olmaktadır.

Sıvı hidrojen, kriyojenik kaplarda yüksek basınçta depolanır. Ayrıca hidrojen; amonyak, metanol ve daha ağır sıvı organikler gibi moleküler enerji taşıyıcılarına dönüştürülebilir. Böylece hidrojen daha düşük basınçlar ve daha yüksek sıcaklıklar altında depolaması sağlanır.

Enerji üretimi ve ısı/dağıtılmış güç için hidrojenin sabit ve ulaşım enerji depolama teknolojileri ile kullanımına ilişkin ekonomisi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Hidrojen enerjisi ekonomisi (U.S. Department of Energy, (2020))

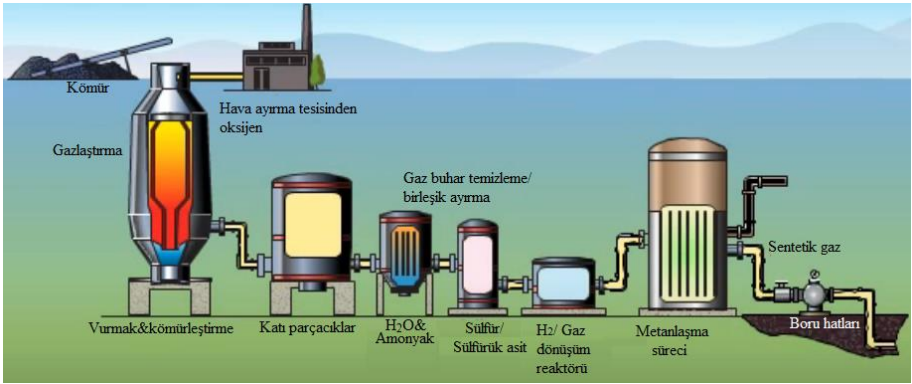
Hidrojen, uzun mesafelere taşınabilmekte ve elektrik enerjisinden daha iyi depolanabilmektedir. Bu taşıma üretim veya depolama yerinden kullanıcıya yer altı boru hatlarıyla veya süper tankerlerle ulaştırılabilir. Kullanım taleplerine uygun olarak sıvı veya gaz halinde

boru veya izolasyonlu konteynırlarla deniz veya kara yoluyla taşınır ve dağıtılır.

2.2. Sentetik Doğalgaz

Sentetik doğal gaz, bileşim ve özellikler açısından doğal gaza mümkün olduğunca yakın olan çeşitli doğal gaz alternatifleri şeklinde tanımlanır. Ayrıca geleceğin yakıtı ve enerji geçişinde önemli bir bileşen olarak görülmektedir. Sentetik doğal gaz, genellikle kömür gazlaştırmadan, biyokütleden (atık) elde edilebilir veya fazla olan yenilenebilir enerji kullanılarak sentezlenerek elde edilebilir.

Sentetik doğal gazın temel kullanım alanı elektrik üretmektir. Bunun yanında yanıcı özelliğinden dolayı içten yanmalı motorlarda yakıt olarak da kullanılabilir. Sentetik doğal gazın elde edilmesine ilişkin prensip bağlantı şeması Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: Sentetik Doğal Gazın Elde Edilmesi

Sentetik doğal gaz, enerji yoğun birkaç endüstriyi daha verimli ve sürdürülebilir kılarken karbon salınımını azaltma açısından temiz bir yakıttır. Daha da önemlisi, aynı zamanda esnek, depolanabilir ve taşınabilir bir yakıttır. Bu nedenle enerji depolama miktarının artmasına yol açar ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen bir dünyada arz güvenliğini sağlar.

Sentetik doğal gazın çevresel etkisi; sentetik gazı oluşturmak için kullanılan hammadde ve son uygulamasında gazla değiştirilen yakıt olmak üzere iki ana faktöre bağlıdır. Daha temiz, karbonsuz kaynaklar arttıkça ve enerji geçişinin bir parçası olarak enerji üretimleri daha verimli hale geldikçe, bu yakıtlar yavaş yavaş doğal gazın yerini alabilirler.

Kömür veya biyokütleden etkili bir şekilde sentetik doğal gaz üretmek için buhar-oksijen gazlaştırma, hidro gazlaştırma ve katalitik gazlaştırma gibi çok sayıda teknik vardır. Üretim teknikleri, süreçleri ve döngüleri genellikle birleştirilir veya ayrı ayrı çıkarılır.

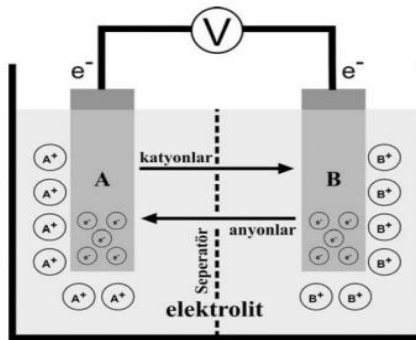
Sentetik doğal gazın biyokimyasal üretiminin potansiyel enerji verimliliği %80, termokimyasal üretiminin potansiyel enerji verimliliği %75 ve elektrokimyasal üretiminin potansiyel enerji verimliliği %78'dir.

3. ELEKTROKİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri olarak batarya (pil, akü) ve yakıt hücreleri kullanılmaktadır. Bataryalar (piller); lityum iyon, sodyum sülfür, kurşun-asit, nikel kadmiyum, metal hava ve lityum metal Redox gibi farklı çeşitlerde üretilmektedir. Bu depolama teknolojileri, küçük ölçekli yenilenebilir enerji kaynaklarının ana enerji sistemi şebekesine entegrasyonu için önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, elektrik şebekesinin kararlı olmasına yardım edebilirler.

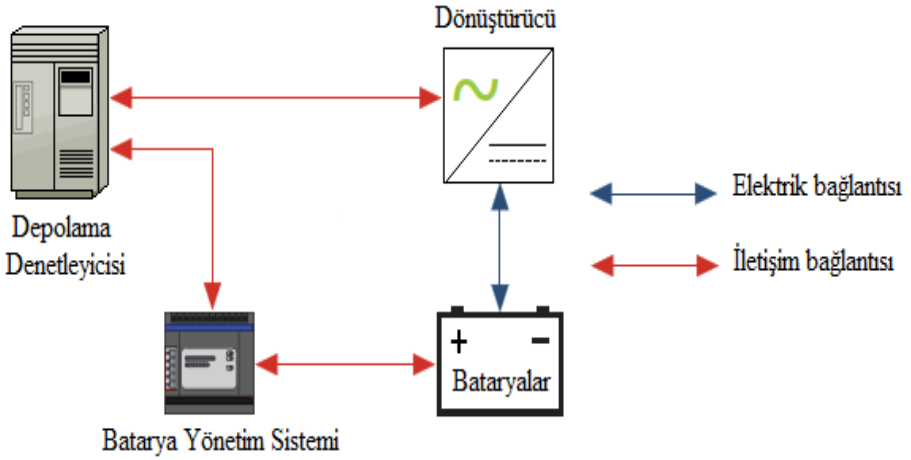
3.1. Batarya (Pil)

Bataryalar, iki elektrot arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleştirilmesi sonucu iyonların elektrolit içerisinde hareket etmesiyle elektrik akımının oluşması prensibi ile çalışır. Batarya, elektrik akımını zıt yönde doldurur ve iyonları ters yöne zorlayarak gönderip enerjii depolar. Bataryaların temel yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Bataryaların Temel Yapısı

Batarya depolama teknolojileri, küçük veya büyük boyutlarda, kısa veya uzun süreli kullanılabilir. Merkezi veya dağıtık enerji üretim yapılarında yer alabilmektedir. Teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte uygulamada giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bunların fotovoltaik güneş panellerinde ve konutlarda kullanımları yaygınlaşmaktadır. Ayrıca güç kaynağı olarak elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılanlar, sodyum sülfür ve lityum iyon bataryalardır. Akış bataryalarında gelişim olması durumunda piyasa daha farklı olabilir.



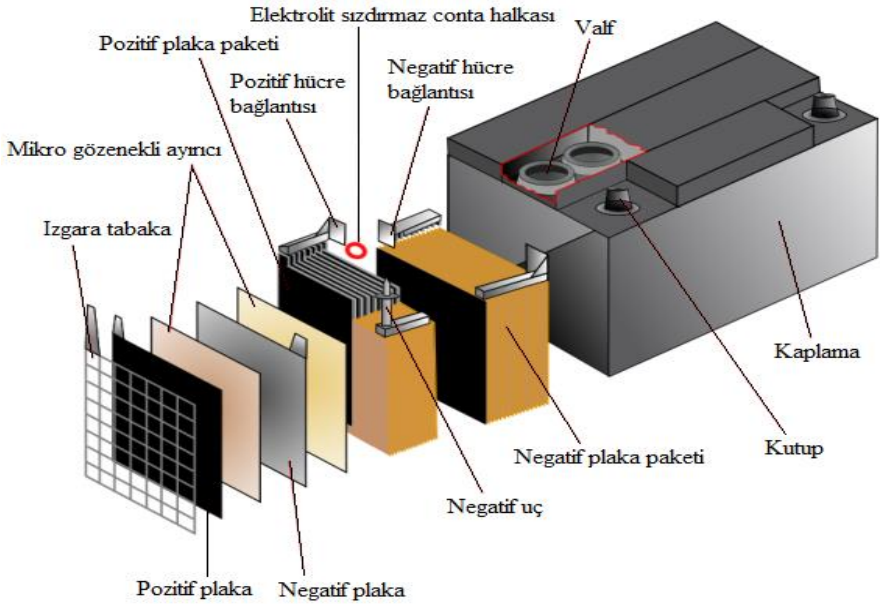
Şekil 3.2: Batarya Enerji Depolama Sistemi

Bataryanın enerji depolama kapasitesi alternatif enerji sistemlerinin boyutlandırılmasında önemli bir faktördür. Bataryanın boyutu, gerekli olan enerji miktarına göre belirlenir. Bataryanın işletme ömrü 20 °C ortam sıcaklığında işletildiği sürece 5 ile 10 yıl arasında değişmektedir.

3.1.1. Kurşun Asit Pil

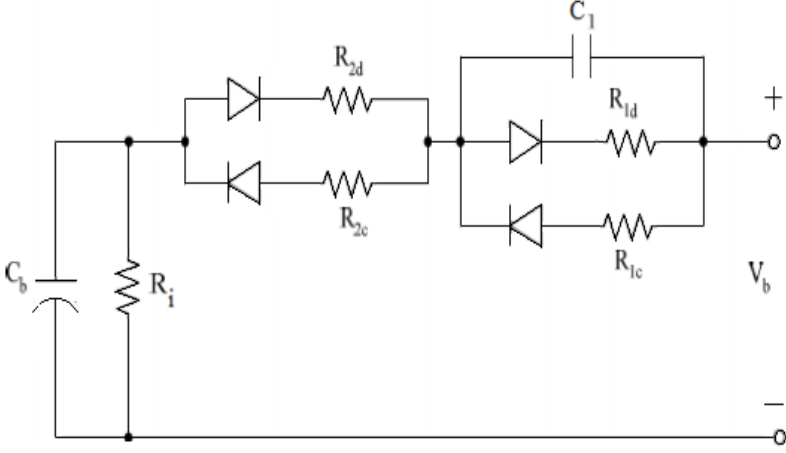
Kurşun asit pil, elektrikli araç motorlarını çalıştırmak için güç sağlayan uzun süreli olan (100 yıl) pillerin gelişmiş şekilleridir. Bu pillerde, anot olarak kurşun, katot olarak kurşun dioksit ve elektrolit olarak sülfürik asit kullanılmaktadır. Bunlar, sabit enerji depolama kullanımları için uygundur. Ayrıca ticari olarak piyasada bulunmaktadır. Fakat, faydalı şarj ve deşarj edilebilir durumları diğer hedefler arasında araştırılmaya devam edilmektedir.

Kurşun asit pilleri için kWh başına tahmini proje maliyeti 549 \$ iken lithium-iyon pillerin tahmini proje maliyeti kWh başına 469 \$'dır. Kurşun asit pil yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kurşun Asit Pil Yapısı

Kuşun asit pil için basitleştirilmiş model Şekil 3.4'te verilmiştir.



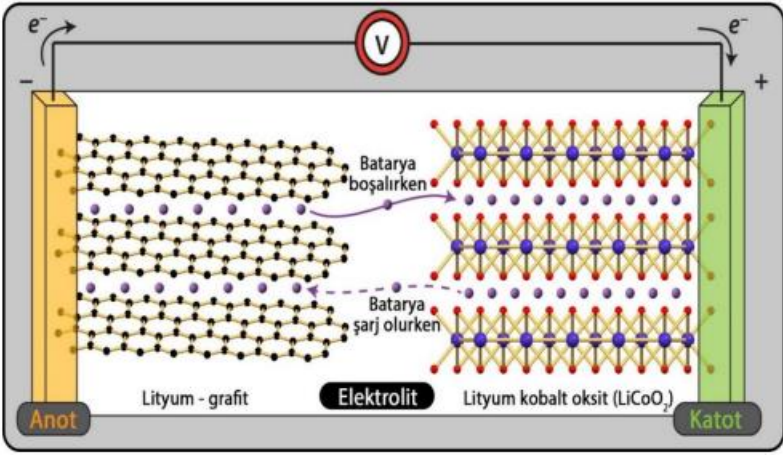
Şekil 3.4: Batarya için eşdeğer devre modeli (Wang, 2006)

- V_b : Batarya gerilimi (V)
 C_b : Batarya kapasitansı (μF)
 R_i : Kendi kendine deşarj veya izolasyon direnci (Ω)
 R_{2c} : Şarj için iç direnç (Ω)
 R_{2d} : Deşarj için iç direnç (Ω)
 R_{1c} : Şarj için aşırı gerilim direnci (Ω)
 R_{1d} : Deşarj için aşırı gerilim direnci (Ω)
 C_1 : Aşırı gerilim kapasitansı (μF)

3.1.2. Lityum İyon Pil

Lityum iyon piller; enerji depolama kapasitelerinin yüksek, iç dirençlerinin düşük ve verimleri %90'ın üzerinde olması nedeniyle uygulamada yaygın kullanılmaktadır. Teknik olarak, uygun sıcaklık ve maksimum kapasite değerleri göz önünde bulundurularak çalıştırılması gerekir. Aksi takdirde lityum iyon pillerin verimleri

azalmaktadır. 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. Bu piller, diğer kimyasal yöntemlerle hazırlanan eşdeğerlerine oranla sıklıkla en üst seviyede doldurulabilme yoğunlukları sebebiyle çok daha hafif ağırlıktadırlar. Sayılan avantajlarının yanında kullanım ömürlerinin üretim tarihlerinden itibaren başlaması bu pillerin en belirgin dezavantajı olarak görülmektedir. Ayrıca üretildikten sonra şarj edilip edilmemelerine bakılmaksızın ömürleri üretim tarihinden itibaren azalmaya başlamaktadır. Lityum iyonlarının değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

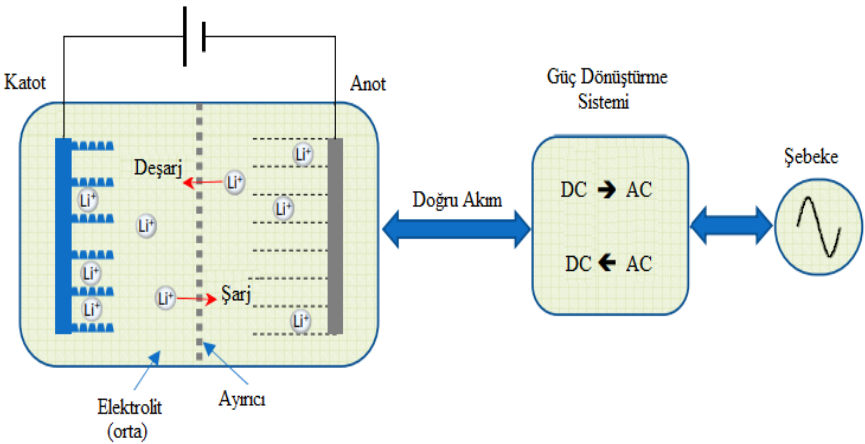


Şekil 3.5: Lityum İyonlarının Değişimi

Lityum iyon piller, farklı metal lityum bileşiklerinden oluşan pozitif elektrod ve genellikle grafitten yapılan negatif elektrodlardan

oluşmaktadır. Pil yapısında kullanılan elektrolit ise, organik grafitte çözülmüş olan lityum tuzundan meydana gelir. Elektrik açısından yalıtım sağlamak için bir ayırıcı kullanılmaktadır. Bu pillerin, uzun yaşam döngüsüne sahip olması, enerji yoğunluklarının ve verimlerinin yüksek olması nedeniyle çalışma performansları tatmin edici düzeydedir. Bununla birlikte lityum iyon pil, özel paketleme gereksinimleri, aşırı şarj koruma devresi ihtiyacı ve malzeme maliyetleri nedeniyle, diğer pil çeşitlerine göre nispeten daha pahalıdır. Lityum iyon pillerin tahmini proje maliyeti kWh başına 469 \$ olmaktadır.

Lityum iyon, 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 kullanılmaktadır. Ömürlerini uzatmak için, örneğin süper kapasitörler ve yenilenebilir enerji kaynakları ile paralel olarak bağlanır.



Şekil 3.6: Sabit Lityum İyon İle Enerji Depolamanın Örnek Yapılandırması

2028 yılına kadar, lityum iyon hücrelerin 1.2 TWh daha fazlasını küresel pazarda hesaba katacağı sabit enerji depolama için elektronikte 0.1 TWh iken elektrikli araçlarda pil kullanımınının 1TWh, 0.15 TWh olacağı tahmin edilmektedir. 2040 yılına kadar dünyada 600 milyona yakın elektrik araçların ortaya çıkması beklenmektedir. Ayrıca 2040 perspektifinde, hücreler % 30 kapasite kaybına ulaşıldıktan sonra 1,3 TWh'ye bile ulaşabilecek miktarda satış sonrası pazarda araçlarda kullanılan sabit depolarda tekrar kullanılacaktır.

3.1.3. Vanadyum Redox Akış Pili

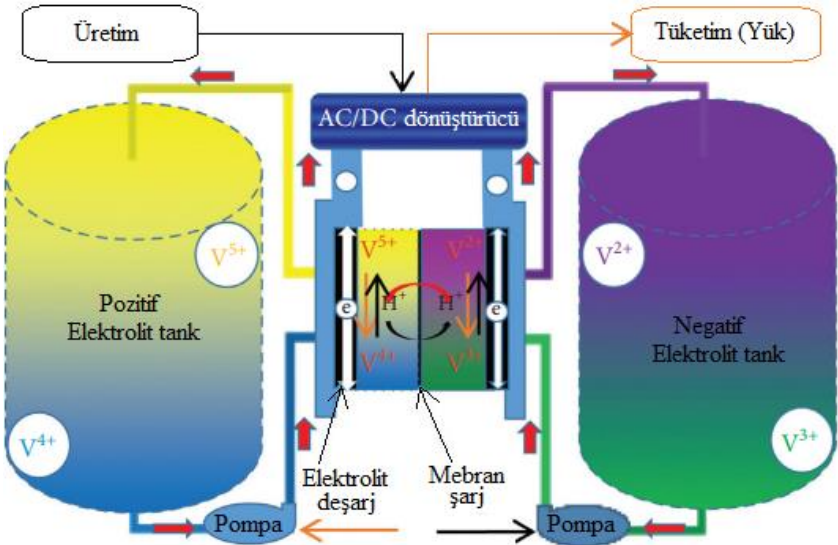
Vanadyum bazlı elektrolitin pozitif ve negatif akü bileşenlerinde akışı, tekrar tekrar şarj-deşarj olmasını sağlayan elektrokimyasal oksidasyon/redüksiyon işleminden geçer. Diğer pil türlerinden temel farkı, enerjinin doğrudan elektrolit içine depolandığı, elektrolitin dolaşımındaki akışı sırasında şarj-deşarjın gerçekleşmesidir.

Şarj etme ve boşaltma, elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yığın adı verilen bir bileşen aracılığıyla işlenir. Böylece enerjinin depolandığı tanklar (kW/s) ile enerjinin kullanıldığı yığın (kW) olmak kaydıyla iki farklı sistemin bir araya gelmesiyle çalışır. Vanadyum redoks akış pil hücresi yığını Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Vanadyum Redoks Akış Pil Hücresi Yığını

Vanadyum redoks akış pilinin uzun hizmet ömürleri ve yüksek güvenlikleri nedeniyle enerji depolama alanında kullanılmaktadır. Ancak en önemli dezavantajı düşük enerji yoğunluğudur. Vanadyum redoks akış pilinin şarj ve deşarj prensibi şeması Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Vanadyum Redoks Akış Pilinin Şarj ve Deşarj Prensibi Şeması (Zhongxu Tai ve diğ. 2021)

Altı veya oniki metre boyutlarında standart yük konteynerleri içinde modüler olarak bir araya gelen sistemler, kullanacakları tesislere kolaylıkla entegre edilebilir. Standart yük konteynerleri Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9: Vanadyum Redoks Akış Pili'nin Bütün Sistemi



Şekil 3.10: Standart Yük Konteynerleri

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.

Vanadyum redoks akış pili, lityum iyon piline göre, daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak tanklar, herhangi bir boyuta ölçeklendirilebildiğinden, çok daha fazla toplam enerji depolama özelliğine sahiptir.

Enerji depolama sistemlerinin entegre edildiği üretim ve dağıtım noktalarında kapasite artışı zamanla kaçınılmaz bir ihtiyaç olacaktır. Bu ihtiyaç, vanadyum redoks akış pil sistemlerinde tank boyutlarını büyütme suretiyle ekonomik olarak çözülebilmektedir.

Diğer depolama sistemleri derin deşarj yapıldıkça performanslarından ciddi seviyede vazgeçmektedirler. Ayrıca kimyasal dengesizlikler sonucu ciddi yangın ve patlama risklerini açığa çıkarmaktadırlar. Ancak vanadyum redoks akış pili sistemleri, depolanmış enerjinin %100 oranında tekrar boşaltılmasını mümkün kılan tek şebeke ölçekli teknolojidir. Vanadyum elektrolit geri dönüştürülebilir ve yaklaşık 25 yıldır. Tepki süresi 70 ms'den azdır. Örnek olarak 5 kW-30 kWh değerinde vanadyum redoks akış pilinin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. 5 kW-30 kWh Vanadyum Redoks Akış Pilinin Özellikleri

Nominal gerilim	48 V DC	Anma akımı	105 A
Nominal güç	5 kW	Anma zamanı	6 h
Anma gücü	30 kWh	Anma kapasitesi	630 Ah
Verimi	% 75	Maksimum güç	20 kW
Yığın ağırlığı	130 kg	Yığın boyutu	63x75x35 (cm)
Batarya ağırlığı	2.5 t	Batarya boyutu	2.0x1.2x2.0 (m)
Elektrolit ağırlığı	2.2 t	Elektrolit hacmi	1.6 m ³
Elektrolit	1.5 M V	Çalışma sıcaklığı	-30 °C ile 60 °C
Şarj gerilim sınırı	60 V DC	Deşarj gerilim sınırı	40 V DC
Döngü sayısı	20.000	Depolama ömrü	Sınırsız

Dolayısıyla vanadyum redoks akış pili sistemlerinin tamamen yanmaz ve patlamaz olmalarından dolayı kullanıldıkları alanlarda en büyük güvenlik tedbiri kendileri olmaktadır. Vanadyum redoks akış pili sistemlerinin tamamen sıfırlanabilmesi ve bundan zarar görmeyecek olmalarının bir diğer avantajı da sistem bakımının sıfır doğru akım gerilim seviyesinde yapılabilmesidir.

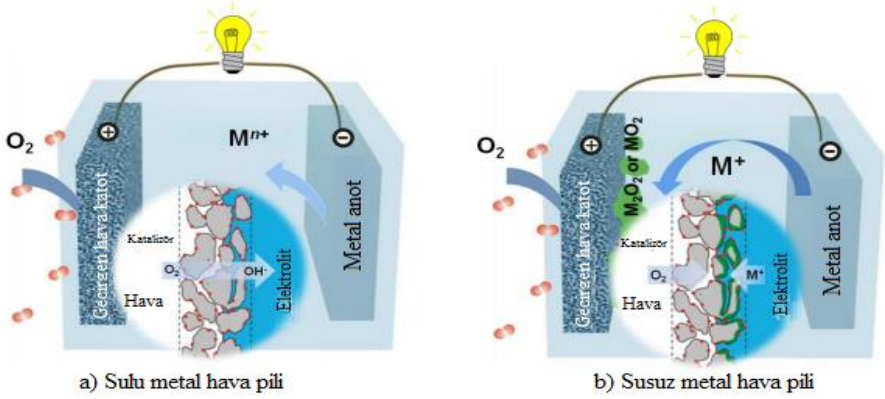
3.1.4. Metal Hava Pil

Metal hava pillerde, magnezyum, demir, aliminyum veya lityum gibi metaller anot olarak ve hava (oksijen) bir katot olarak kullanılmaktadır. Bu iki element bir elektrokimyasal hücrenin ana bileşenleridir. Metal-hava pilleri, yapımında kullanılan modern teknoloji nedeniyle düşük ağırlık ve fiyatla pazarlanmaktadır. Bu pilin önemli özelliğinin lityum iyon pillerle karşılaştırıldığında enerji yoğunluğunun daha yüksek (250 Wh/kg) ve maliyetin daha düşük

olmasıdır. Ayrıca, kurşun asit pillere göre 20 kat enerji üretimi yapılabilmektedir.

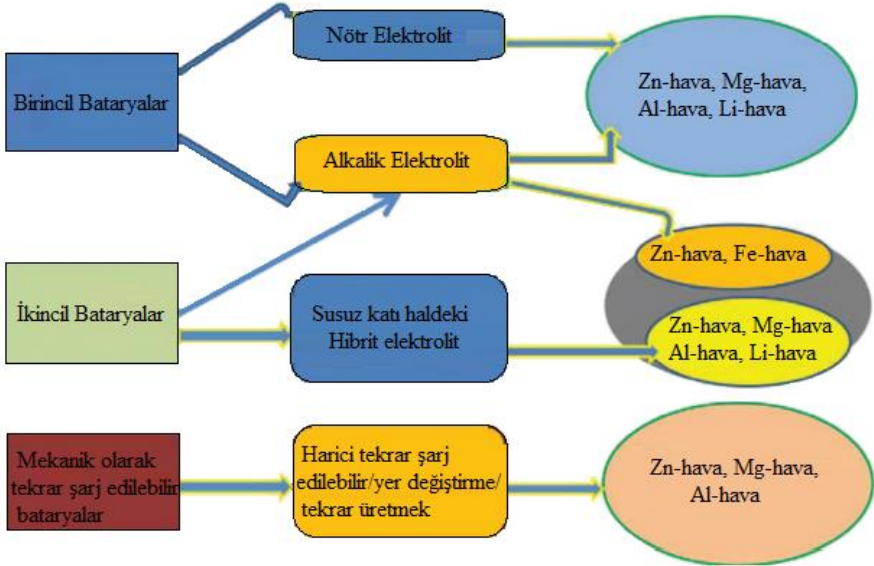
Metal hava piller, düşük hacim ve ağırlığa sahiptir. Çevre kirliliği yapmaması ve çevreden etkilenmemesi, nemli ortamda kullanılabilir olması ve güvenlik artırıcı olması da ayrı avantajlarıdır. Bu pil, elektrikli ve askeri araçlarda, yedek güç sistemlerinde, acil durum güç kaynağı olarak, modern tarım ekipmanlarında, çevre izleme araçlarında, oyuncak endüstrisinde ve deniz turizmindeki uygulamalarda olmak üzere farklı sektörlerde güç kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Metal hava pilleri, lityum iyon pillerden çok daha yüksek teorik enerji yoğunluğuna sahiptir. Elektrikli araçlar veya şebeke enerji depolama dahil uygulamalar için sıklıkla yeni nesil elektrokimyasal enerji depolamaya yönelik bir çözüm olarak savunulmaktadır.



Şekil 3.11: Metal Hava Pillerin Şematik Konfigurasyonu ve Çalışma Prensipleri (Li & Lu, 2017)

Kompakt ve potansiyel olarak daha ucuz metal-hava pilleri mevcuttur. Birçok üretici tüketilen metalin mekanik olarak değiştirildiği ve ayrı olarak işlendiği yakıt ikmal üniteler teklif etse de, pek çok geliştirici elektrikle şarj edilebilir bir pil sunmaz. Özellikle lityum-hava gibi şarj edilebilir metal-hava pilleri, geliştirilmekte olan piller olup sadece birkaç yüz devirlik bir ömre ve yaklaşık %50 enerji verimliliğine sahiptir. Çok çeşitli metal hava piller mevcuttur. Şekil 3.12’de metal hava pillerin çeşitleri verilmiştir.



Şekil 3.12: Metal Hava Pillerin Çeşitleri (Rahman.2013)

Şekil 3.12’de görüldüğü gibi çinko (Zn)- hava, magnezyum (Mg)-hava, aliminyum (Al)-hava, lityum (Li)-hava, demir (Fe)-hava gibi metal hava pil bulunmaktadır. Çeşitli metal hava pillerin enerji yoğunlukları Tablo 3.2’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.2. Metal hava enerji yoğunlukları

Metal hava	Hücre gerilimi (V)	Enerji Yoğunluğu (Ağırlık bazında) (Wh/kg)	Enerji Yoğunluğu (Hacim bazında) (Wh/L)
CaO	3.11	2972	9960
MgO	3.03	4032	14400
Li ₂ O ₂	2.98	3487	8050
Li ₂ O	2.93	5252	10600
Al ₂ O ₃	2.75	4332	17300
Na ₂ O	1.97	1703	3870
ZnO	1.68	1109	6220

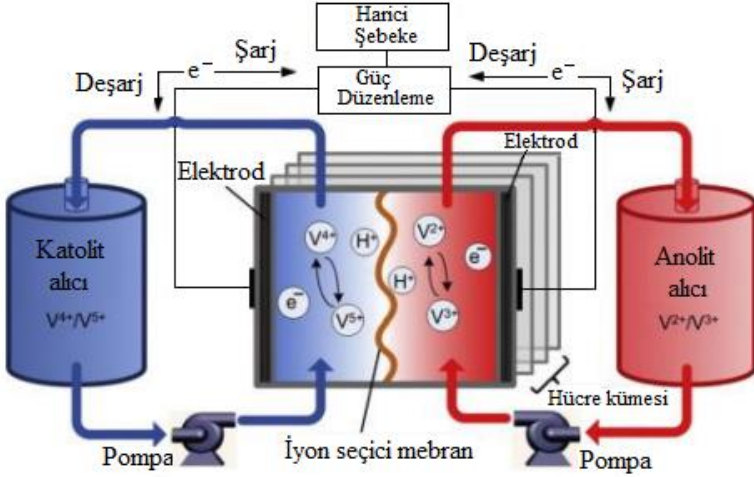
Tablo 3.3. Çeşitli Metal Hava Pillerinin Parametreleri ve Reaksiyonları

Piller	Gerilim (V)	Teorik özgül kapasite (Ah/kg)	Teorik enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Reaksiyon
Al-hava	2.71	1030	2791	$4Al + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3$
Mg-hava	3.09	920	2843	$Mg + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$
Zn-hava	1.65	658	1085	$Zn + 1/2O_2 \leftrightarrow ZnO$
Li-hava	2.96	1170	3463	$2Li + O_2 \leftrightarrow Li_2O_2$
Na-hava	2.27	487	1105	$Na + O_2 \leftrightarrow NaO_2$
	2.33	687	1600	$2Na + O_2 \leftrightarrow Na_2O_2$
K-hava	2.48	377	935	$K + O_2 \leftrightarrow KO_2$

3.1.5 Akış Piller

Akış pillerinin, ticari olarak 1 kWh – 10 MWh arası kapasitelerde sabit enerji depolama sistemlerinde kullanılmaya adaydır. Bu pillerin bir çok türü araştırılmaktadır. Kesintisiz güç kaynaklarında (UPS), bağımsız güç sistemlerinde, elektrikli araçlarda ve güç dönüşüm

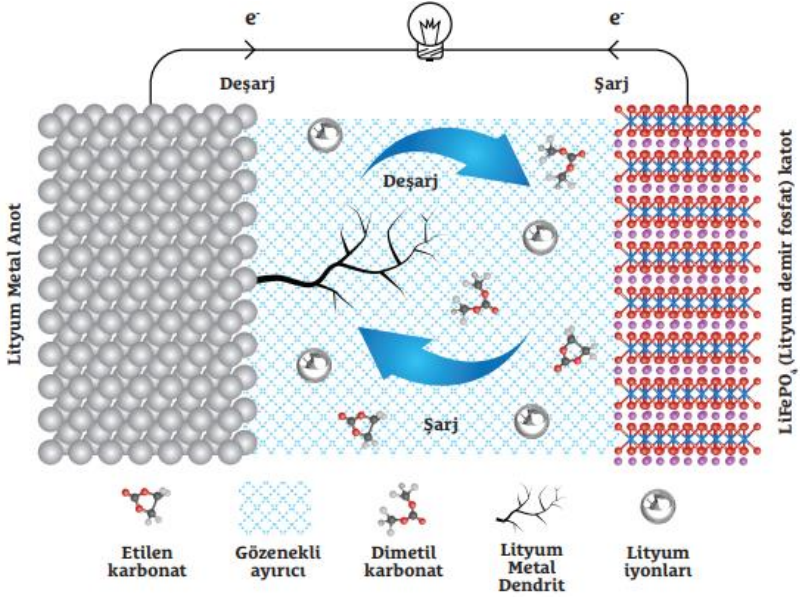
sistemlerinde (AC/DC, AC/AC veya DC/AC) uygulama alanı bulmuştur. Bir akış pilinin şematik diyagramı Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13: Bir Akış Pili'nin Şematik Diyagramı (Silvera ve diğ. 2018)

3.1.6. Lityum Metal Piller

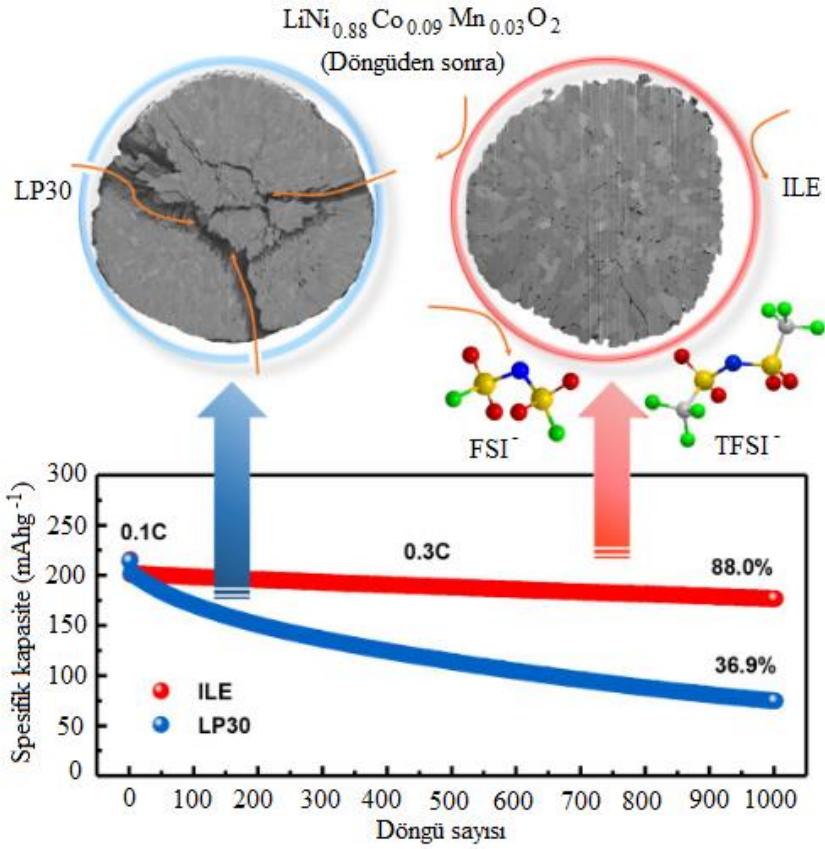
Lityum metal pillerde, lityum anot olarak kullanılmaktadır. Bu piller, günümüzde son derece gelişmiş teknoloji ile üretilen lityum iyon pillere oranla en az iki kattan daha fazla enerji yoğunluğu taşıyabilmektedir. Ayrıca daha yüksek enerji kapasitesi, daha geniş bir gerilim aralığında enerji depolayabilmektedir. Bu yüzden, lityum metal pillerin kullanımı için bulunan engeller bilim insanlarının araştırmalarıyla aşılmaya çalışılmaktadır. Lityum metal pil yapısı Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14: Lityum Metal Pil Yapısı (Wang,2018)

Lityum metal pillerin kullanımı ve yaygınlaşması için temel problemler, pilin şarj edilme sürecinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden şu ana kadar yapılan uygulamaları laboratuvar ortamından daha ileri bir noktaya gidemedi. Bu piller, öncelikle elektrikli araçlar için araştırılmaktadır. Ancak farklı potansiyel kullanımları da bulunmaktadır.

Lityum metal pil, etkin malzemelerin toplam ağırlığına göre kilogram başına 560 Wh ile son derece yüksek bir enerji yoğunluğuna ulaşmakta ve kayda değer bir istikrar sergilemektedir. Pilin başlangıçtaki depolama kapasitesi, katot malzemenin gramı başına 214 mAh/g olmakta ve 1000 döngüde sonra, kapasitenin % 88'i Lityum metal pilin kapasite durumu Şekil 3.15'te verilmiştir.

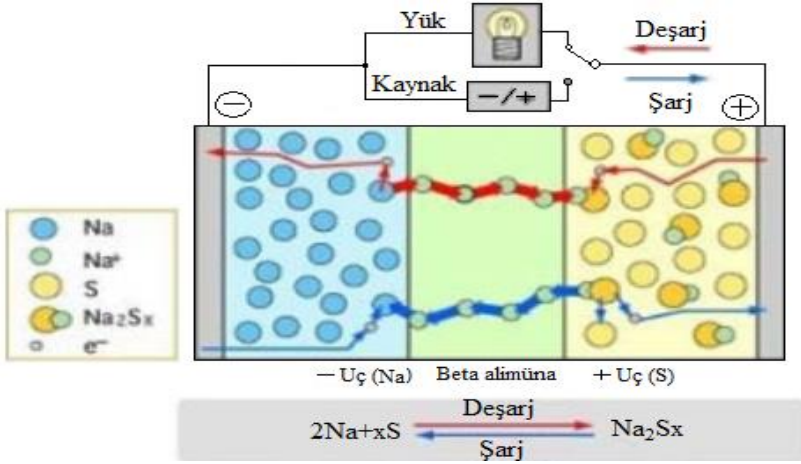


Şekil 3.15: Lityum Metal Pilin Kapasite Durumu (Karlsruher Institut für Technologie, KIT)

Geleneksel grafit anot bazlı lityum iyon pillerin sınırlı enerji yoğunluğu göz önüne alındığında, yeni nesil yüksek enerji yoğunluklu pil sistemleri için alternatif yüksek kapasiteli anotlara büyük ölçüde ihtiyaç vardır. Bu konuda lityum metal, ultra yüksek kapasiteye (3.860 mAh/g) ve çok düşük standart negatif elektrokimyasal potansiyele (-3.040 V) sahip olması nedeniyle en umut verici anotlardan biri olarak bilinmektedir.

3.1.7. Sodyum Sülfür Piller

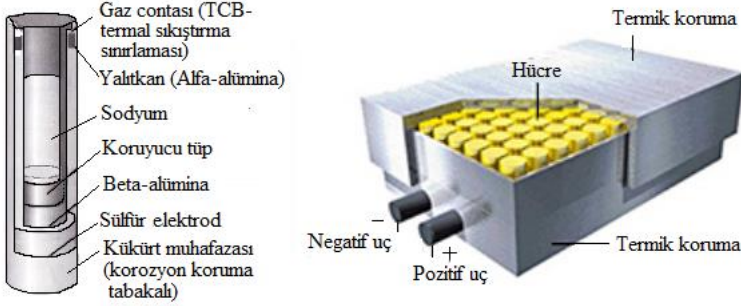
Sodyum sülfür piller, erimiş sodyum negatif elektrot içeren silindirik bir elektrokimyasal hücreden ve erimiş kükürt pozitif elektrottan oluşur. Bunlar, kurşun asit pillerin üç katı enerji yoğunluğuna, daha uzun bir ömre ve daha az bakım ihtiyacına sahiptir. Öncelikli olarak sabit enerji depolama sistemleri için uygun kabul edilmektedir. Bir sodyum sülfür pilindeki aktif maddeler, pozitif elektrot olarak erimiş kükürt ve negatif olarak erimiş sodyumdur. Elektrotlar, elektrolit görevi gören katı bir seramik, sodyum alümina ile ayrılır. Sodyum sülfür pil yapısı Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16: Sodyum Sülfür İç Yapısı (Kaynak: NGK İnsulators)

Sodyum sülfür piller, uzun süre (saatlerce) büyük değerde (megawatt seviyesinde) enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu pil sistemi, diğer batarya teknolojileri ile karşılaştırıldığında daha büyük kapasite, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha uzun ömür gibi bir çok üstün

özelliğe sahip pillerdir. Sodyum sülfür pil yapısı ise Şekil 3.17’de verilmiştir.



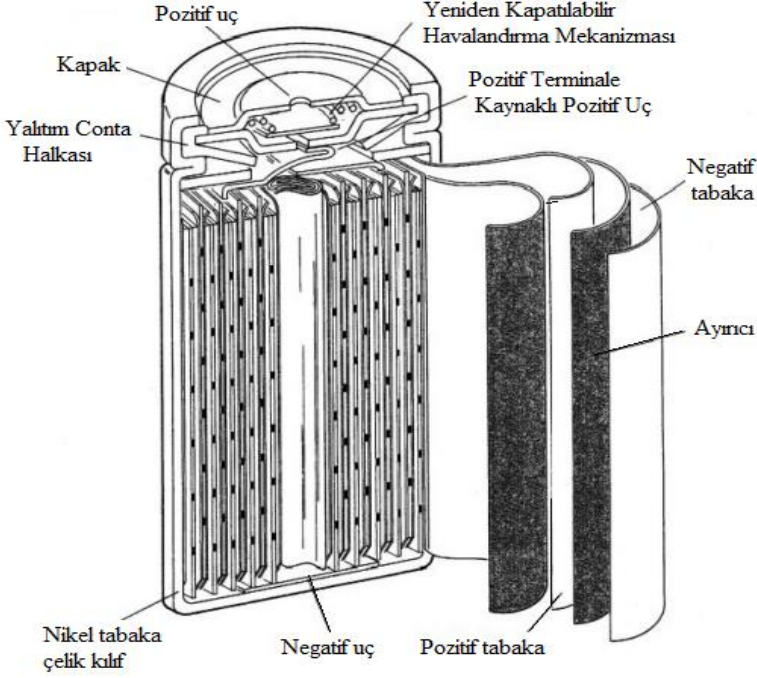
Şekil 3.17: Sodyum Sülfür Pil Yapısı (IEC, Geneva, 2011)

Sodyum sülfür pillerin özelliklerinden dolayı sabit uygulamalar için yararlıdır. Lityum iyon pilleri ise kısa sürelerde yüksek güç sağlamak için uygundur. Sodyum sülfür pil sistemi, güneş ve rüzgar gibi kesikli olan yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu desteklemektedir. Bununla birlikte bu piller, sanayi alanında ve mikro şebekelerde ihtiyaç olan elektrik ihtiyacını karşılamak ve acil durum güç kaynağının dengelenmesinde kullanılmaktadır. Böylece, enerji maliyetlerini ve çevre yükünü azaltmaya yardımcı olmaktadır.

3.1.8. Nikel Kadmiyum Piller

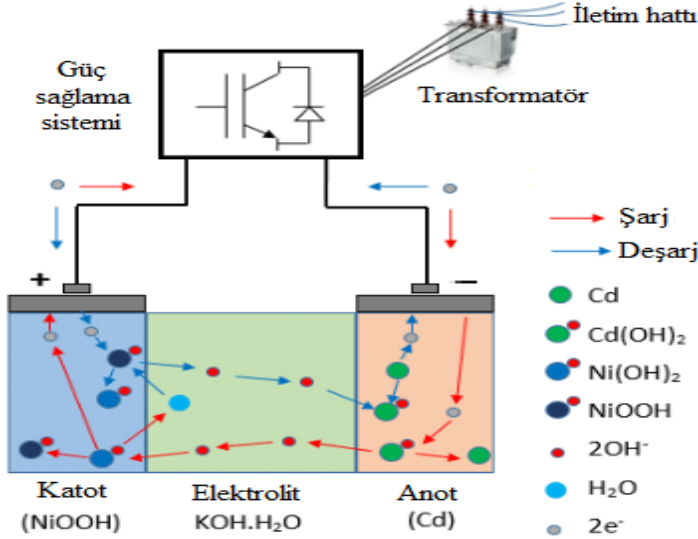
Nikel kadmiyum piller, sulu potasyum hidroksit elektrolit içinde biri nikel ve biri kadmiyum olmak üzere iki elektroda sahiptir. Bu piller, acil aydınlatmalarda, telekomünikasyon sistemlerinde, güneş enerji istasyonlarında ve uzay araçlarında olmak üzere farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bunların yaklaşık olarak verimliliği %75’tir. Kurşun asit pillerinden maliyet olarak daha pahalı olmasına rağmen,

bunlara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna ve kullanım ömrüne sahiptirler. Nikel kadmiyum pil yapısı Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18: Nikel Kadmiyum Pil Yapısı (RadioShack. 2004)

Havalandırılmalı Nikel kadmiyum (NiCd) piller, ağırlık ve hacim başına büyük enerjinin kritik olduğu uçaklarda ve dizel motor marşlarında kullanılır. Sızdırmaz NiCd piller, hafiflik, taşınabilirlik ve şarj edilebilir gücün önemli olduğu uzaktan kumanda gibi ticari elektronik ürünlerde yaygın olarak kullanılır. NiCd piller, güç kalitesini voltaj düşmelerine karşı korumak ve zorlu koşullarda yedek güç sağlamak için idealdir. Nikel kadmiyum pilin enerji üretim şeması Şekil 3.19’de verilmiştir.



Şekil 3.19: Nikel Kadmiyum Pilin Enerji Üretim Şeması (Nikolaidisa & Poullikkasb. 2017)

Son zamanlarda, NiCd piller, yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri için güneş enerjisi üretimi için depolama olarak popüler hale gelmiştir. Ancak puant yük uygulamaları sırasında iyi performans göstermediklerinden enerji yönetim sistemleri için genellikle bundan kaçınılırlar. NiCd pillerin, maliyetleri (600\$/kW) kurşun asit pillerin maliyetlerinden (549 \$/kW) daha pahalıdır. Ancak, biraz daha yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen, NiCd piller, çevresel toleransları nedeniyle çok daha düşük bakım maliyetlerine sahiptir. Kurşun asit piller gibi, deşarj derinliği ve hızlı şarj/deşarj nedeniyle NiCd pillerin ömrü büyük ölçüde azaltılabilir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında kendi kendine deşarj (standby) sırasında şarjlarının tahmini olarak ayda %2 ila %5'i kaybolur. Bu durum kurşun asit piller için %1'dir.

NiCd pillerin mevcut pazar alanlarında popüler olmaya devam edeceği tahmin edilmektedir. Ancak kurşun asit piller gibi gelecekteki büyük ölçekli projeler için kullanılmaları mümkün gözükmemektedir. Nikel Kadmiyum PİL Şekil 3.20’de ve farklı güçlerde nikel kadmiyum pil Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Nikel Kadmiyum PİL



Şekil 3.21. Farklı Güçlerde Nikel Kadmiyum PİL

PİL çeşitlerinin parametreleri Tablo 3.4’te ve karşılaştırmaları Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.4: Pil Çeşitlerinin Parametreleri

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-Kadmium (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-lyon (Li-lyon)	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 3.5: Pil Çeşitlerinin Karşılaştırılması

Pil Türü	Üstün Yönleri	Zayıf Yönleri
Kurşun Asit (Pb-Asit)	-Düşük fiyat -Yüksek özgül güç	-Düşük özgül enerji -Kısa yaşam ömrü -Yüksek bakım maliyeti
Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Geri dönüşüm maliyeti yüksek -Pahalı kadmium -Kadmiumun 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-lyon (Li-lyon)	-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

3.2. Yakıt Hücresi

Yakıt hücresi, dışarıdan sağlanan yakıtın enerjisini elektrokimyasal reaksiyon yardımıyla direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bunlar, gerekli yakıt (anot tarafı) ve oksitleyici (katot tarafı) akışı sağlandığı müddetçe sonsuza kadar çalışabilmektedir. Yakıt hücrelerinde, elektro kimyasal reaksiyona girecek olan maddeler, daima tüketilmektedir. Ancak pillerde, elektrik enerjisi kimyasal olarak kapalı bir sistem içinde depolanmaktadır. Bunun dışında pillerdeki elektrotlar, pil dolup boşaldığında reaksiyona girmeleri sonucunda değişmelerine rağmen, yakıt hücrelerinin elektrotları katalitik olup genellikle kararlıdır.

Yakıt hücreleri, özgül enerji değeri bakımından pillerden daha yüksek bir enerji değerine sahip iken, özgül güç açısından daha düşük bir değere sahip olmaktadır. Bunların dışında, yakıt hücreleri oldukça pahalıdır ve yük değişimlerine kısa sürede uyum sağlayamamaktadırlar.

Birbirinden biraz farklı özelliklere sahip yakıt hücreleri bulunmaktadır. Piyasada bulunan 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 bulunmaktadır. Yakıt hücreleri arasında bulunan esas belirgin fark elektrolittir. Elektrolit, yakıt hücresinin tasarım ve çalışma özellikleri üzerinde çok

kapsamlı etkisi bulunmaktadır. Doğru akım (DC) ve hücre gerilimine sahip tüm yakıt hücreleri, içinde bulundukları seri hücre sayısına bağlı olacak şekilde gerilim meydana getirir. Ayrıca üretilen gerilim, yük ve yakıt hücresinin zamanla yıpranmasıyla değişmektedir. Alternatif gerilim (AC) elde etmek için güç düzenleyici; DC/AC dönüşüm, gerilim, akım ve frekans kontrolüne sahip olması gerekir. Yakıt hücresi, dış ortama güç sağlamasının yanında, sistemde bulunan fanlar, pompalar ve kontrol sisteminin enerji ihtiyacını da karşılamaktadır.

Tüm yakıt hücrelerinin maliyeti, 500 €/kW ile 8,000 €/kW arasında olup çok yüksektir. Ancak teknolojinin gelişmesi ve ticarileştirme artıca bu maliyetlerin düşmesi beklenmektedir. Farklı yakıt hücre teknolojilerinin çalışma sıcaklığı ve elektrik verimliliğinin karşılaştırmaları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Önemli Yakıt Hücre Teknolojileri

Elektrolit	PEMFC (PEFC)	PAFC	MCFC	SOFC
Çalışma Sıcaklığı (°C)	80	200	650	800- 1000
Elektrik verimliliği (%)	30-35	35-40	45-55	45-55

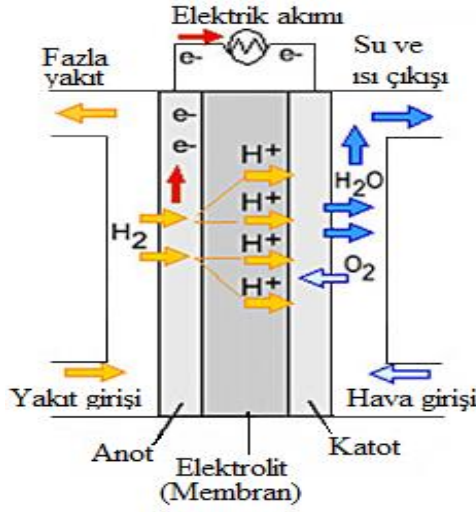
Tablo 3.14'te görüldüğü gibi PEM yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı 80 °C olup en düşük seviyededir. Katı oksit yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı ise 800-1000 °C ile en yüksek seviyededir. PEM yakıt hücresinin doğalgaz tabanlı elektrik verimliliği % 30-35 ile en düşük

seviyede ve erimiş karbonat ve katı oksit yakıt hücrelerinin verimleri ise % 45-55 arasındadır.

3.2.1. Proton Değişimli Membran Yakıt Hücresi

Proton değişimli membran (PEM) yakıt hücresinin temel bileşeninde anot ve katot olmak üzere iki adet elektrot bulunmaktadır. Bu elektrotlar, birbirlerinden polimer membran elektrot ile ayrılmışlardır. Kullanılan her iki elektrot, bir kenarından ince platinyum katalizör tabakası ile kaplanmıştır. Elektrotlar, katalizör ve membran ile birlikte membran elektrotunu oluşturmaktadır.

PEM yakıt hücresi, hareketli parça içermediğinden aşınmazlar, oldukça sessiz çalışır ve herhangi atık meydana getirmemektedir. Bunların verimliliği yaklaşık 50% olup yüksek bir değerdedir. Hassas çalışma şartlarında (90°C'ye ve 600 kPa basınca kadar) çalışmaktadır. Otomobillerde tercih edilmekle beraber cep te-lefonu ve diz üstü bilgisayarlar da kullanılmaktadır. PEM yakıt hücresi şematik diyagramı Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22: PEM Yakıt Hücresi Şematik Diyagramı

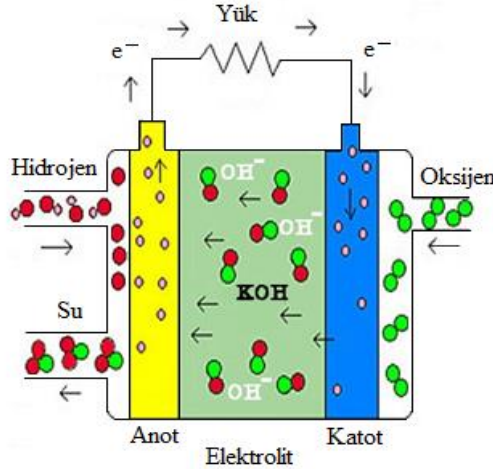
PEM yakıt hücresi, maksimum verimliliğe düşük güç seviyelerinde ulaşabilmektedir. Ayrıca gücün artırılmasıyla verimliliği, lineer olarak azalmaktadır. Bu yakıt hücreleri, özellikle yüksek verimli polimerlerin bulunması sonrasında, uzay çalışmaları ve özel askeri sistemler için uygulanması suretiyle geliştirilmiştir. PEM yakıt hücresi, düşük çalışma sıcaklığı ile yüksek verim elde edilmekte, sessiz çalışmakta ve saf su dışında başka bir atık ortaya çıkarmaması nedeniyle en çok ilgi uyandıran yakıt hücresi çeşididir.

3.2.2. Alkali Yakıt Hücresi

Alkali Yakıt Hücresi (AFC, Alkaline Fuel Cell), en yüksek verimle en gelişmiş yakıt hücresi teknolojilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA, National Aeronautics and Space Administration) tarafından üzerinde

en fazla durulan bir yakıt hücresi çeşididir. Bu yakıt hücresinde elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmaktadır.

Alkali yakıt hücresini ekonomik yapan, alkali elektrolitlerde oksijen indirgeme kinetiği asit elektrolitlerden daha hızlı olması ve soy metal olmayan elektro katalizörlerin kullanılabilmesidir. Alkali sistemler, oda sıcaklığında çok iyi çalışmakta ve diğer bütün yakıt sistemleri arasında en yüksek gerilim verimliliğine sahiptir. Ayrıca birçok malzeme ile iyi uyum sağlayabildiği için uzun işletme ömrüne sahip olan güvenilir sistemler olarak değerlendirilmektedir. Küçük boyutlara oranla yüksek güçler elde edebilmekte ve güç yoğunlukları 100-200 mW/cm² arasında değişebilmektedir. Çalışma sıcaklıkları 120-250°C arasında olup verimleri %70'e kadardır. Maliyetleri ise ulaşım sektörü için 50/100 \$/kW değerine çıkarılmaya çalışılmaktadır. Şekil 3.23'da alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.23: Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi

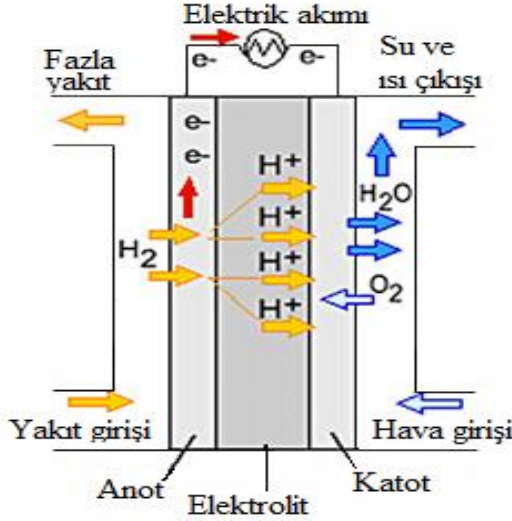
Elektrolitte iletkenliği sağlamak için hidroksil iyonları kullanılmaktadır. Yakıt hücresindeki anot kısmında önemli oranda su meydana gelmektedir. Katot kısmına doğru olan su hareketi, elektrolit kısmını seyreltebilmektedir. Bu durum, hücre iletkenliğini azaltıp verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Bu sorunu iki farklı yöntemle çözmek mümkündür. Bu yöntemlerden biri, su buharlaştırılarak ısının uzaklaştırılması sağlanıp elektrolitin sirküle edilmesidir. Diğer yöntem ise su buharının taşınabilmesini sağlayacak şekilde hidrojen gazının sirküle edilmesidir.

3.2.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi

Fosforik asit yakıt hücresinde (PAFC, Phosphoric acid fuel cells), elektrolit olarak fosforik asit kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresinde bağıl olarak doğalgaz ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG, Liquefied Petroleum Gas) gibi temiz yakıtlar veya gazlaştırıcıdan alınan temizlenmiş kömür gazı kullanılmaktadır. Uygulamaya en yakın olarak güç santralleri ve kojenarasyon ünitelerinde kullanılması önerilmektedir. PAFC’inde soy metal elektro katalizör kullanılması gerekir. Bu olumsuzluğu olmasına rağmen fosforik asit, bir elektrolit olarak mükemmel ısıl, kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık şeklinde faydalar sağlamaktadır. Bunun yanında PAFC’ler atık ısıdan faydalanabilme bakımından çok avantajlı görülmektedir.

Yeryüzünde bulunan uygulamalarda en çok gelişme gösteren PAFC sistemlerdir. Düşük miktarda karbon monoksit gazı açığa çıkarmaktadır. Bu yakıt hücreleri daha çok apartman, alışveriş

merkezi gibi alanlarda elektrik üretim maksadıyla kullanılmaktadır. PAFC'ler 250 W'dan 200 kW'a güce kadar ve 24 Voltluk elektrik jeneratörü olarak ticari açılarından piyasaya sunulacak aşamasında olduğu bilinmektedir. Bu yakıt hücresi, ağır yük taşıtları veya lokomotiflerde kullanılması en güzel uygulamalardır. Yakıt olarak doğalgaz kullanması durumunda 200 kW'lık bir fosforik asit yakıt hücresi yatırım maliyeti 287 \$/kW'dır. Fosforik asit yakıt hücresinin yapısı Şekil 3.24'te görülmektedir.



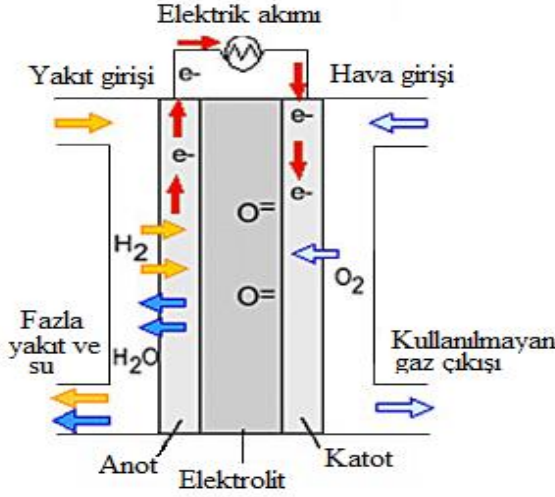
Şekil 3.24: Fosforik asit yakıt hücresinin yapısı

Bu yakıt hücresinin üstünlükleri olarak, konsantre edilmiş fosforik asit yardımıyla su yönetimini kolaylaştırmak ve yakıt kaynağı olarak günümüz şartlarında temiz kabul edilebilen yakıtların kullanılması görülmektedir. Kusurları ise; elektrotun kararsızlığı yüzünden daha fazla karbon monoksit (CO) zehirlenmesi gözlenmesidir. Yapısal olarak diğer yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında basit bir yapıya

sahip olması ve düşük maliyeti nedeniyle piyasadaki yeri daha fazla olmaktadır.

3.2.4. Katı Oksitli Yakıt Hücresi

Katı oksitli yakıt hücresi (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) katı halde bulunan yakıt hücreleridir. Hücre için kullanılan malzemelerin çoğu nikel ve özel seramikten meydana gelmektedir. Bunların çalışma sıcaklığı 1000 °C civarında olmaktadır. Yakıt olarak CO ile birleşmiş halde olan hidrojen kullanılmaktadır. Tepkime sonucunda su buharı ve karbondioksit (CO₂) çıkmaktadır. Katı oksit yakıt hücresi şematik gösterimi Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25: Katı oksit yakıt hücresi şematik gösterimi

SOFC'ler kojenerasyon birimi olarak elektrik ve ısının birlikte kullanılabileceği yerlerdir. Elde edilen 1000 °C buhar yardımıyla bir buhar türbini çevrimi sayesinde elektrik üretilerek kombine olarak birleştirebilir. Bundan dolayı sistemin toplam verimi, %50-55

seviyesine ulaşabilmektedir. Günümüzde yapılan hesaplamalarda yatırım maliyetleri 1500 \$/kW mertebelerinde olmaktadır.

3.2.5. Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücresi

Erimiş karbonatlı yakıt hücreleri, son dönemlerde geliştirilen ikinci jenerasyon yakıt hücrelerinden biri olup 600-650 °C sıcaklıkta çalışmaktadır. Anot kısmında karbondioksit açısından zengin gaz ürün ve su üretimi sağlanmaktadır. Karbondioksit katoda giren hava ile karıştırılmak üzere gönderilmektedir. Erimiş karbonatlı yakıt hücresinin işletme sıcaklığı yüksek olması sebebiyle atık ısı, proses ısı ve kojenerasyon amaçlı olarak kullanılabilir. Bu yakıt hücresinin en önemli üstünlükleri, hücre içinde bulunan kendi atık ısı desülfürizasyon sisteminden geçmiş metanın anot odasında hidrojene dönüştürülmesi için direkt olarak kullanılabilir. Erimiş karbonatlı yakıt hücreler için ortaya konulan yatırım maliyeti 1000 \$/kW civarındadır.

Erimiş karbonatlı yakıt hücrelerinin üstünlükleri şunlardır:

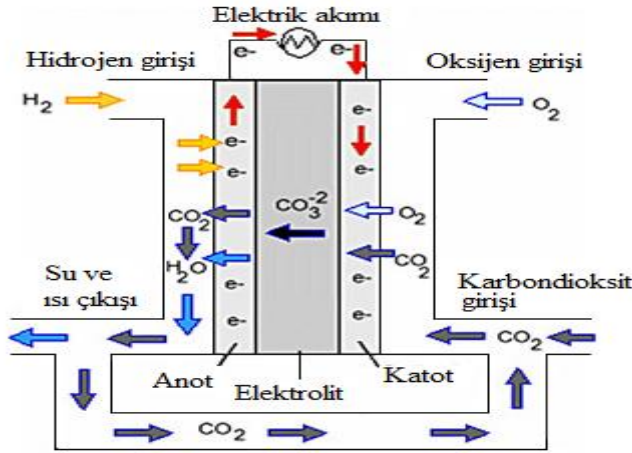
- Hücre, metal levhalardan baskı tekniği ile üretilebilir. Çünkü metal levhalar yaygın olarak bulunabilmektedir,
- Hücre reaksiyonları için pahalı olan değerli metal katalizör yerine nikel ve nikel oksit katalizör yeterli olabilmektedir,
- Karbon monoksit direkt olarak kullanılabilen bir yakıt çeşididir,
- Hücrede buhar türbinlerinde veya kojenerasyon uygulamalarında kullanılacak kadar yüksek olan ısı açığa çıkmaktadır,

- Biyoyakıtlardan elde edilen gaz yakıtlar gibi karbondioksit içeren yakıtlar ile de verimli olarak işletilebilmektedir.

Erimiş karbonatlı yakıt hücresinin kusurları şunlardır:

- Hücre bileşenlerinin ömrünün azalmasına yüksek sıcaklık yol açmaktadır,
- İşletmede hücre için destek malzemesi olarak metalik malzemelerin kullanılmasının gereklidir.

Erimiş karbonatlı yakıt hücresi şematik gösterimi Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26: Ermiş Karbonatlı Yakıt Hücresi Şematik Gösterimi

Yakıt hücrelerinin kullandıkları elektrolit, ürettikleri ısı ve ürettikleri güç gibi veriler ile karşılaştırılabilirler. Tablo 3.7'de farklı 5 adet yakıt hücresinin özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.7: Farklı Yakıt Hücrelerinin Karşılaştırılması

	Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)	Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)	Erimiş karbonat yakıt hücresi(MCFC)	Polimer elektrolit yakıt hücresi(PEMFC)	Alkali yakıt hücresi (AFC)
Elektrolit	Fosforik asit	Çinko üzerine tutturulmuş yitria (YSZ)	Karbonat	Polimer iyon değişim filmi	Potasyum hidroksit
Elektrolitteki taşıyıcı	H ⁺	O ₂ ⁻²	CO ₃ ⁻²	H ⁺	OH
Hücre metaryali	Karbon	Seramik vb.	Nikel, paslanmaz çelik vb.	Karbon	Karbon
Güç yoğunluğu (W/kg)	120-180	15-20	30-40	350-1500	35-105
Yakıt türü	H ₂ , Hidrokarbonlar, fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂
Sıcaklık (°C)	200	1000	600-700	80	80
Güç üretim verimi (%)	37-42	60-70	45-60	60	42-73
Uygulama alanları	Ticari uygulamalar (oteller, hastaneler vb.)	Ticari uygulamalar, sanayi uygulamaları, elektrik santralleri	Elektrik santralleri	Ulaşım araçları, askeri sistemler	Uzay çalışmaları

4. ELEKTRİKSEL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Elektriksel enerji depolama teknolojileri, güç kalitesinin iyileştirilmesi, elektrikli araçlar ve akıllı şebekeler için önemli bir depolama teknolojisidir. Elektriksel enerji depolama teknolojileri başlığı altında kapasitörler ve süper kapasitör (ultra kapasitörler) teknolojileri anlatılacaktır.

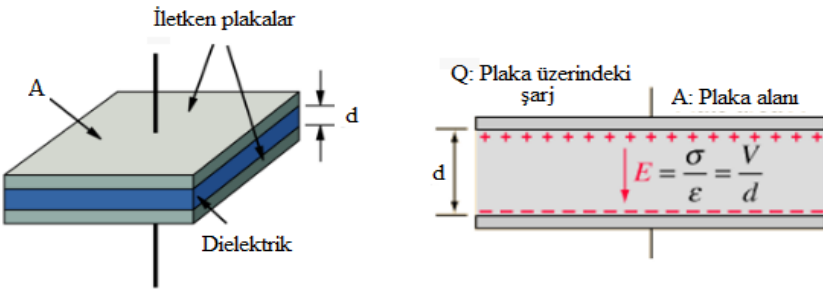
4.1. Kapasitörler

Kapasitörler, her türlü elektrik sisteminde yaygın olarak kullanılan enerji depolama teknolojisidir. Bunlar, enerjiyi elektrostatik formda depolar ve daha sonra elektrik enerjisi olarak açığa çıkarır. Bu işlem gerçekleştirilirken herhangi bir bozulma olmadan yüz binlerce defa

şarj deşarj döngüsü yapabilmektedir. Kapasitörlerin elektrik enerjisi depolama kapasiteleri; enerji depolama, filtreleme ve darbe üretme gibi amaçlar için doğru ve alternatif akım devrelerinde kullanılmalarına olanak sağlar.

Kapasitör, öncelikle tüketicilerin kullanmış oldukları küçük elektronik cihazlar için kullanılmıştır. Ancak gün geçtikçe silah ve ticari elektrikli araçlarına güç sağlamak için geliştirilmektedir. Günümüzde araştırmacıların hedefleri arasında kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırma çalışmaları da vardır. Kapasitörler, kondansatör olarak da bilinir. Kondansatör, iki tane zıt yüklü paralel iletken plakalar ile bunları birbirinden ayıran ve dielektrik olarak isimlendirilen yalıtkandan meydana gelmektedir. Kondansatörde sığa (kapasitans, C) Denklem (4.1)'de ifade edilmiştir. Sığa, iletken plakalarda depolanan yükün (q), plakalar arasındaki potansiyele (V) bölünmesi ile ifade edilir. Kapasitör yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir.

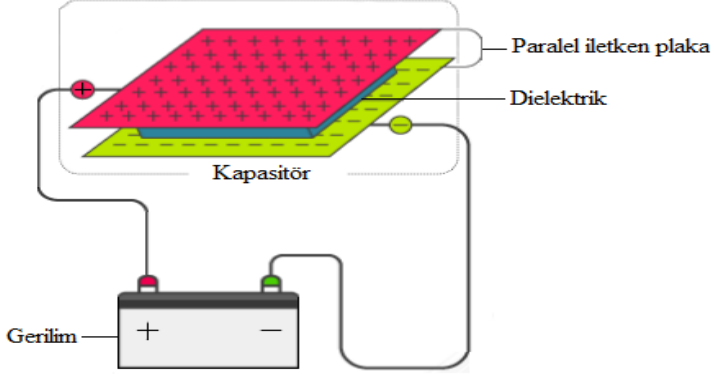
$$C=q/V \quad (4.1)$$



Şekil 4.1: Kapasitör yapısı

Yalıtkan malzeme, iki iletken plaka arasında elektriksel ark meydana gelmesini önler. Böylece daha fazla şarj yapılması sağlanır.

Kondansatör, elektrik yükünü ve enerjiyi, negatif ve pozitif elektrostatik yüklerin ayrışması ile depo etmektedir.



Şekil 4.2: Kapasitörde Enerji Depolama Prensi Şeması

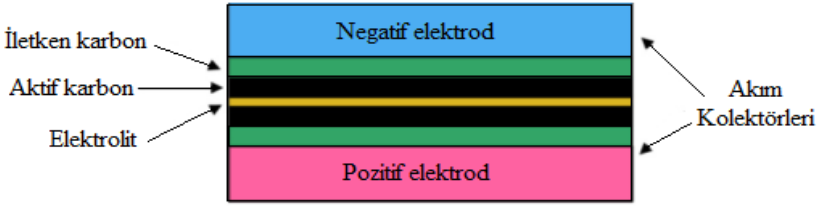
Klasik kapasitörler için güç yoğunluğu yaklaşık olarak 10^{12} W/m³ olup yüksek bir değerdedir. Ancak enerji yoğunlukları yaklaşık olarak 5 Wh/m³ olup çok düşük değerdedir. Kapasitörler, geleneksel bataryalara göre çok daha hızlı şarj olmakta ve onbinlerce defa yüksek verimlilikte şarj/deşarj olabilmektedir.

Bir kapasitörün depolayabileceği enerji miktarı birkaç faktöre bağlıdır. Bunlar; her iletkenin yüzeyinin büyüklüğüne bağlı olarak daha fazla yük depolayabilir. Ayrıca, iki iletken arasındaki boşlukta yalıtkan ne kadar iyi olursa, o kadar fazla yük depolanabilir.

4.2. Ultra Kapasitörler/Süper Kapasitörler

Ultra kapasitör veya süper kapasitör olarak isimlendirilen enerji depolama teknolojisi, volanlardaki mekanik enerji veya pillerdeki kimyasal enerji gibi başka bir forma dönüştürmek yerine, doğrudan iki

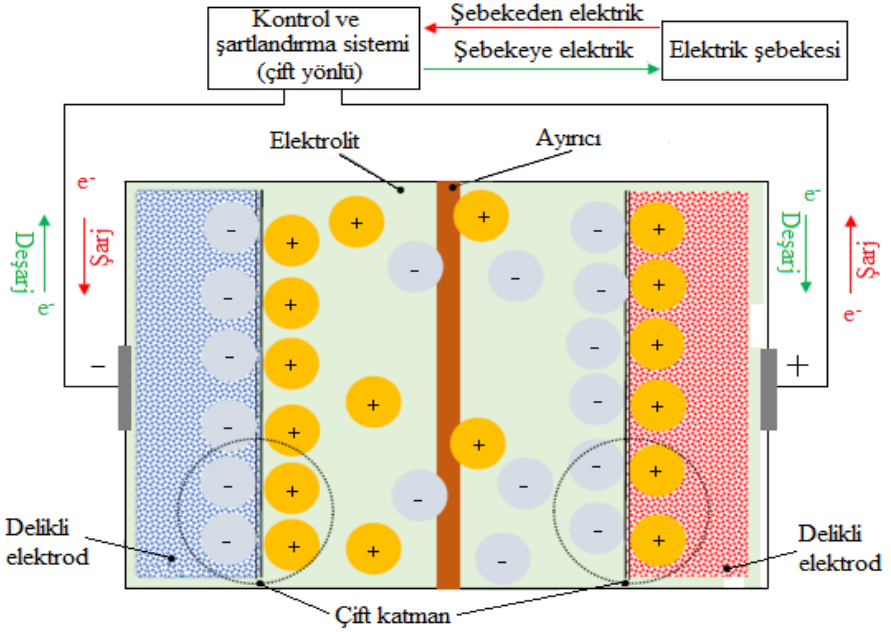
elektrot arasında elektrik enerjisini depolar. Dolayısıyla, şarj ve deşarj süreçleri çok hızlı ve verimlidir. Çift katmanlı kapasitörler olarak da bilinen süper kapasitörler, elektriksel iletken bir karbon ve bir elektrolit arasındaki arayüzde oluşan çift tabaka boyunca enerji depolar. Süper kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmak için, aktif karbon gibi yüzey alanı yüksek malzemeleri kullanılır.



Şekil 4.3: Süper Kapasitör Yapısı

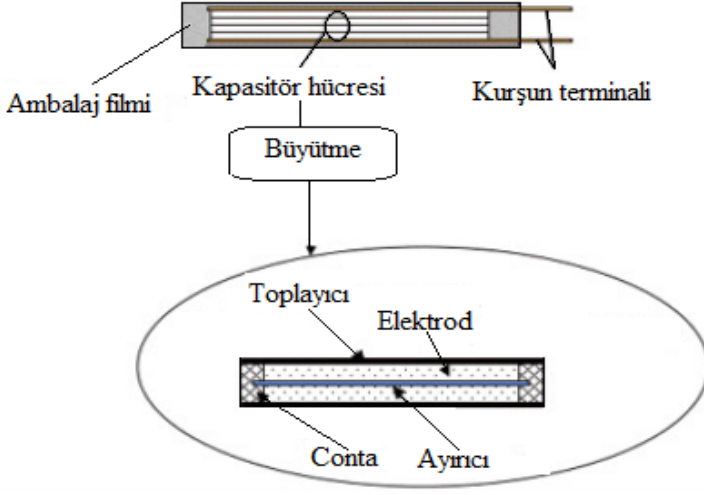
Süper kapasitörler, genellikle iki elektrot ve bir ayırıcıdan oluşur. Çift katmanlı süper kapasitör şeması Şekil 4.4'te verilmiştir. Elektrolit içinde, anyonlar ve katyonlardan oluşan iyon yükleri birbirini dengeler, yani iyonlar hacim içinde eşit olarak dağılır. Ancak bir elektrik alanı uyguladıktan sonra uygun elektrotlara yayılırlar.

En yüksek güç talebi olan puant yük durumunda, süper kapasitörler çok kısa bir zaman periyodunda şebekeye birkaç kiloampere kadar yüksek akım sağlayabilir.



Şekil 4.4: Çift Katmanlı Süper Kapasitör Şeması (Chmielewski.2020)

Süper kapasitörler, modüler tasarımları sayesinde kolayca geliştirilebilir ve bunun hiçbir teknolojik engel yoktur. Şu anda süper kapasitörler, kısa vadeli enerji depolama için olgun ve ileriye dönük bir teknoloji olarak görülmektedir. Süper kapasitör Enerji Depolama Cihazı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Süper Kapasitör Enerji Depolama Cihazı (NEC-TOKIN.2004)

Toplayıcı olarak iletken kauçuk ve elektrod olarak aktifleştirilmiş karbon kullanılmaktadır. Farklı değerlere sahip süper kapasitör Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6: Farklı Değerlerde Süper Kapasitör

Küresel pazardaki ultra kapasitörlerin kapasitesinin 2026 yılına kadar 0,5GW'a yükselmesi beklenmektedir. Günümüzde şebeke hizmetlerini destekleyen uygulamalarda, acil durum gücü sistemlerinde, ulaştırma sektörlerinde, yenilenebilir enerji bağlantılarında artış sağlamak ve yerel mikro şebekelerde olası sıfır emisyon için pil-süper kapasitör (araç çalıştırma), volan-süper kapasitör (mikro şebekelerde gerilim kararlılığında) gibi hibrit enerji depolama yoğun bir geliştirme aşamasındadır. Süper kapasitör teknolojisinin teknik karakteristikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Süper Kapasitör Teknolojisinin Teknik Karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	2 - 6
Güç kapasitesi (MW)	~0-0.5
Kalıcı enerji depolama süresi*	s- h
Ömrü (Yıl)	5-15
Deşarj süresi *	ms - 1h
Döngü sayısı (döngü)	50 000- 1 000 000
Verimliliği (%)	~ 84-97
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Ticarileşmiş/ Uygulanamaz

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi süper kapasitörler, %97'ye varan yüksek verimliliğe sahiptir. Şunu vurgulamak gerekir ki, bu verimlilik değerlerine geleneksel kapasitör teknolojilerinin ulaşması mümkün değildir. Çünkü süper kapasitörlerin kapasite ve enerji yoğunluğu, geleneksel elektrolitik kapasitörlere göre bin kat daha büyüktür.

Süper kapasitör teknolojisinin maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 25-450 \$/kW, enerji için sermaye maliyetleri 3000-14 000 \$/kWh, bakım maliyetleri <0.001 \$/kWh ve onarım maliyetleri < 0.01 \$/kW/yıl olmaktadır. Süper kapasitör ve pilerin yük döngüsü açısından karşılaştırılması Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7: Süper Kapasitör ve Pilerin Yük Döngüsü Açısından Karşılaştırılması

5. MEKANİKSEL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Mekaniksel enerji depolama teknolojileri; potansiyel ve kinetik enerji olarak enerji depolamaktadırlar. Bu teknolojiler; pompalanmış hidroelektrik enerji depolama, sıkıştırılmış hava ve volan enerji depolama ve teknolojileridir.

5.1. Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama

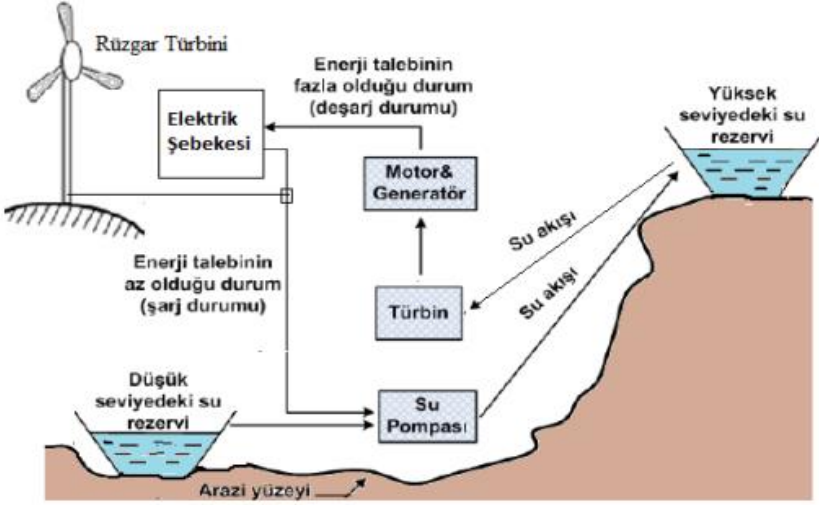
Mekanik depolama sistemleri arasında yer alan ve en eski elektrik enerjisi depolama sistemi olan pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisi, uygun bir coğrafya olması durumunda en ucuz büyük ölçekli (nominal kapasitesi 100 ila 2000 MW) ve en gelişmiş ticari depolama teknolojisidir. Bu teknoloji, dünyanın enerji depolama kapasitesinin yaklaşık %94'ünü oluşturmaktadır.

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisinin ekonomik ömürleri uzundur. İşletme ve bakım giderleri düşüktür. Sera gazı emisyonu oluşturmadığından çevre kirliliğine yol açmazlar. Enerji maliyetleri yakıt giderleri olmadığından çok düşüktür. yoktur), sera gazı emisyonuna yaratmazlar ve çevre ile uyumludurlar. Dünyada en büyük kurulu kapasiteye sahip pompalanmış hidroelektrik enerji depolamaya sahip on ülke ve kurulu kapasitesi Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Dünyada En Yüksek Kurulu Kapasitesine Sahip Ülkeler

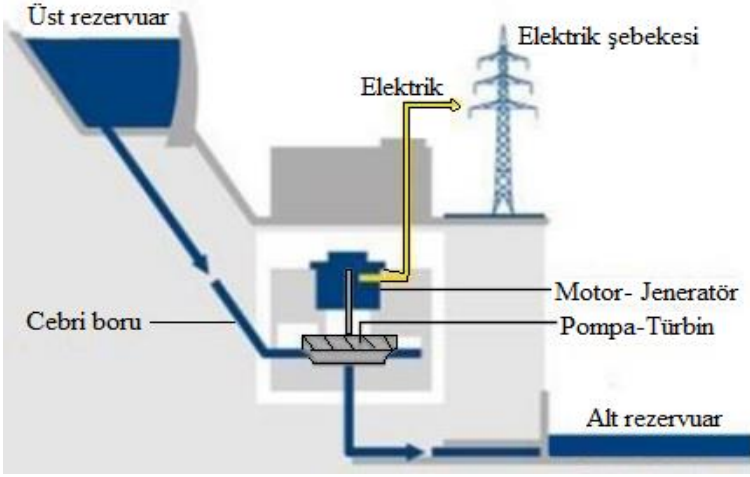
Ülke	Kurulu Pompalı Hidroelektrik Depolama Kapasitesi (MW)
Japonya	27,438
Çin	21,545
Amerika Birleşik Devletleri	20,858
İtalya	7,071
İspanya	6,889
Almanya	6,388
Fransa	5,894
Hindistan	5,072
Avusturya	4,808
Güney Kore	4,700

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisinde, suyun alt seviyede bulunan bir rezervuardan daha yüksek bir seviyede bulunan rezervuara pompalanarak potansiyel enerjinin depolanması yapılır. Bu durum; enerji tüketimin az olduğu dönemlerde şebekeden alınan elektrik enerjisinin su pompalarını çalıştırmak üzere kullanılması suretiyle yapılır. Pompalanarak üst rezervuarda depolanan su, elektrik enerjisi ihtiyacının fazla olduğu dönemlerde su türbinine gönderilerek mekanik enerji elde edilir. Elde edilen mekanik enerji, jeneratör yardımıyla elektrik enerjine dönüştürülüp elektrik şebekesine aktarılır. Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama akış diyagramı Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama akış diyagramı
(Kocaman.2013)

Üst rezervuarda bulunan suyun cebri borularla su türbinine gelmesi durumunda türbin dönerek mekanik enerji oluşturacaktır. Oluşan mekanik enerji, jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek elektrik şebekesine verilir. Pompalanmış hidroelektrik enerji depolamada enerji üretimine ilişkin prensip bağlantı şeması Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2: Pompalanmış hidroelektrik üretim gösterimi (Crampes. 2009)

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemi için yapılacak inşaat ve işletilmesi maliyetleri birçok parametreye bağlıdır. Sistemin yapılacağı alanın coğrafi özellikleri, alt ve üst rezervuar arasındaki seviye farkıyla doğrudan ilişkili olan boru hatlarının uzunluğu, pompa/ türbin kapasitesine bağlı olarak yatırım kapasitesi değişmektedir.

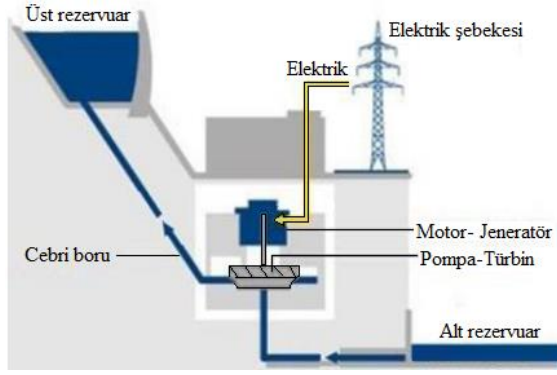
Bu tesislerin temelleri için doğru kurulumun tasarımı için jeolojik koşullar çok önemlidir. Depolama yapılacak kısmın tipi ve şekli doğrudan arazi koşulları ve su kaynaklarının durumuna göre değişecektir. Bu nedenle Belirli bir alanı değerlendirmeden yatırım maliyetlerini tahmin etmek imkansızdır.

Son zamanlarda pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemlerinin çoğunda su boru hatları, kuyular ve tüneller şeklinde ve yeraltı üretim istasyonlarının yapılması düşünülmektedir. Burada

bulunan jeolojik koşullar, maliyeti artırmaktadır. Sistemin doğal koruma ve kültürel miras alanlarına kurulmaması için gerekli izinler alınmalıdır. Nehir barajları için taşma riskinin barajın ve beraberindeki yapıların ek maliyetlerine doğrudan etkisi olacaktır.

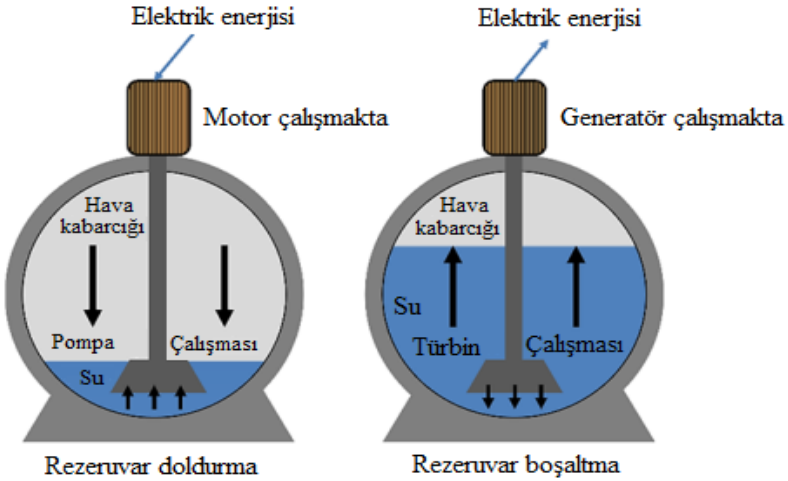
Pompalanmış hidroelektrik depolama teknolojilerinin maliyetleri; santral boyutu, konumu ve şebekeye olan bağlantısına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 1000 MW kurulu kapasiteye sahip bir pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sisteminin sermaye yatırım maliyetleri, arazi edinimi ve büyük ölçüde değişebilen elektrik şebekesine bağlantı maliyetlerini dahil olmamak şartıyla yaklaşık 1700 \$/kW ile 2500 \$/kW arasında değişebilir. Daha düşük kapasiteli bir santral için, birim yatırım maliyeti daha yüksek olmaktadır.

Elektrik şebekesinden alınan enerji ile çalıştırılan pompa yardımıyla alt rezervuarda bulunan su, cebri borularla üst rezervuara aktararak potansiyel enerji depolanmaktadır. Pompalanmış hidroelektrik enerji depolamada teknolojisinde enerji depolamaya ilişkin prensip bağlantı şeması Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Pompalanmış hidroelektrik depolama gösterimi (Crampes. 2009)

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisi kullanılarak denizde enerji depolanmasını sağlayan geleneksel olmayan bir enerji depolama yöntemi geliştirilmiştir. Projede, deniz tabanında pompalarla donatılmış küresel tankların kurulmasını üstlenmektedir. Sistemin şarj edilmesi tanklardan suyun aktif olarak pompalanmasından oluşmaktadır. Sistemin basitleştirilmiş şeması Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4: Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama basit şeması (Slocum.2013)

Şekil 5.4'ten de görüleceği gibi rezervuarda su depolamak için şebekeden alınan enerji alınarak motor çalıştırılarak rezervuara pompa yardımıyla su depolanır. Depolanan su ihtiyaç olduğunda türbinin çalıştırılmasıyla hareket enerjisi elde edilerek generatör yardımıyla elektrik üretilir.

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemleri, temel olarak günlük enerji depolama, mevsimsel enerji depolama, enerji talebindeki ani değişikliklere hızlı cevap verme, daha yüksek rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları payı ile şebeke işletimini kararlı hale getirme yeteneği ve konvansiyonel güç rezervlerinin sınırlandırılması gibi şebeke işletimini iyileştiren hizmetlerde uygulanmaktadır.

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisinin üstünlükleri aşağıdaki sıralanabilir.

- Uygun arazi sağlanmasıyla elektrik şebekesi ile bağlantılı olarak 100 MW'ın üzerinde büyük ölçekli elektrik enerjisi depolaması yapılabilir.
- Uzun (20 yıldan fazla) kullanım ömrüne sahip,
- Yüksek güç yoğunluğu,
- Birkaç saatten birkaç güne kadar enerji verebilme özelliği,
- Diğer teknolojilerinin yanı sıra, elektrik şebekesi işletimi üzerinde frekans, gerilim ve sistemdeki reaktif güç regülasyonu üzerinde faydalı etkisi vardır.

Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojisinin kusurları aşağıdaki sıralanabilir.

- Enerji yoğunluğu, su seviyesinin yüksekliğine bağlı olduğundan büyük hacimli su depolarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Peyzaj parkları gibi alanların yapılması durumunda, su rezervuarlarının seviyesini değiştirme ihtiyacı ortaya çıkması nedeniyle sınırlı kullanım olmaktadır.
- Enerji depolama sırasında düşük işletme frekansı oluşmaktadır.

Piyasada bulunan pompalanmış hidroelektrik enerji depolama teknolojilerinin 2030 yılına kadar 10 kattan fazla artışla 2.34TGWh'ye yükselmesi beklenmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA, International Renewable Energy Agency) verilerine göre, 2030'da pompalanmış hidroelektrik enerji depolama, küresel enerji depolama pazarında yaklaşık %45 ila %51 pay oluşturacağı tahmin edilmektedir.

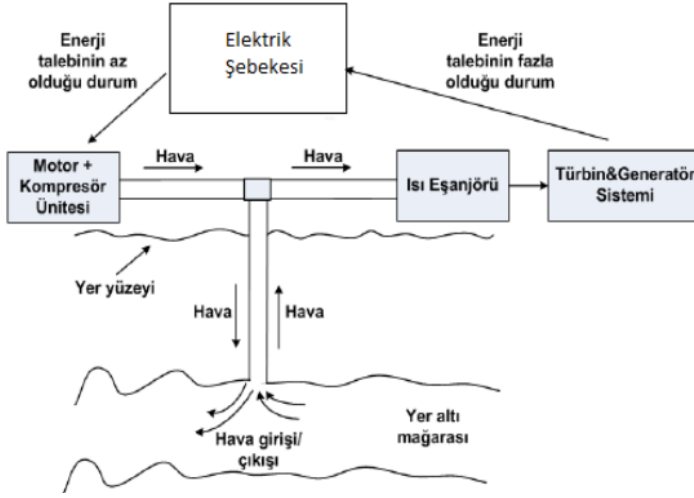
5.2. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Teknolojisi

Sıkıştırılmış hava, coğrafi koşulların uygunluğuna bağlı olarak yer altındaki oyuklarda havanın depolanmasıdır. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (CAES, Compressed Air Energy Storage) teknolojisi, farklı olası enerji depolama teknolojiler için karşılaştırıldığında, uzun vadeli büyük ölçekli enerji depolamada en etkili ve ekonomik teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda büyük kapasiteli depolama teknolojisinde, pompalı enerji depolamadan sonra ikinci sıradadır. Bu açıdan, Sıkıştırılmış hava enerji depolama

rezervuarlar inşaatı için, yeraltı oluşumlarının seçimi açısından tuz kaya oluşumları inşa etmek için en uygun mağaralardır.

Sıkıştırılmış hava enerji depolaması, büyük kapasiteli depolama teknolojisinde pompalı depolamadan sonra ikinci sıradadır. Sıkıştırılmış hava enerji depolama teknolojilerinin verimliliği yaklaşık olarak %75 civarındadır.

Elektrik sistemindeki yükün düşük olduğu ve elektrik enerjisi fiyatının ucuz olduğu saatlerde (gece tarifesinin uygulandığı 22:00-06:00 saatleri arasında), kompresör çalıştırılması durumunda ortamda bulunan hava, yeraltındaki geçirimi olmayan mağaralarda sıkıştırılarak depolanmaktadır. Enerji ihtiyacının olduğu zamanlarda ise basınçlı hava yardımıyla türbinler çalıştırılıp elektrik enerjisi üretilmesi sağlanır. Bu enerji depolama yönteminde, havanın sıkıştırılması sonucunda depolanması için geçirimsiz ve izolasyonlu bir özelliğe ihtiyaç bulunmaktadır. Doğal olarak oluşan boşluklar, terk edilmiş madenler ve tuz mağaraları kullanılabilir. Ayrıca, yapay boşluklar da oluşturulabilmektedir. Havanın sıkıştırılması için suni tanklar üzerinde çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Şekil 5.5'te sıkıştırılmış hava ile enerji depolamaya ait akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.5: Sıkıştırılmış hava ile enerji depolamanın akış diyagramı (Erdoğan, 2011)

Şekil 5.5'te görüldüğü üzere yerin alt katmanlarında bulunan tabakalara hava gönderilmesi ve yeniden yer yüzeyine çıkartılması işlemi, taşıyıcı boru sistemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Sıkıştırılmış hava enerji depolaması, depolanan yüksek basınçlı havanın döngüsel işlemler altında kaçmasını önleyecek kadar sıkı olan coğrafi oluşumları bulmaktır. Ayrıca, oluşumlar talep edilen hava basıncı altında operasyonları güvenli bir şekilde yürütmek için yeterince derin olmalıdır. Bu açıdan bakıldığında, şimdiye kadar tuz mağaraları, sert kaya mağaraları, tuzlu akiferler ve yeraltı gözenekli oluşumları umut verici seçeneklerdir.

Tuz mağaraları, enerji depolamak için en iyi seçeneklerden biri olarak kabul edilmektedir. Tuz suda kolayca çözülür, bu da bir tuz mağarasının çözüm madenciliği tarafından geliştirilebilir ve mağaranın şekli kontrol edilebilir anlamına gelir.

Sert kaya oluşumları; doğal gaz gibi hidrokarbon depolaması yapmak için, mükemmel hava sızdırmazlığı ve ticari olarak temin edilebilen kazı teknolojilerinden dolayı, on yıllardır kullanılmaktadır.

Yıllardan beri, akifer oluşumları gibi gözenekli oluşumlar, doğal gaz depolama yapmak için kullanılmıştır. Şu anda, doğal gaz depolama sistemlerinde doğalgazın %95'inden daha fazlası gözenekli oluşumda depolanmakta ve gaz depolama teknolojisinde gözenekli oluşumlar tamamen gelişmiştir. Farklı sıkıştırılmış hava enerji depolama ortamları için maliyet değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Farklı Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Ortamları İçin Maliyet (Mahlia et al., 2014).

Rezervuar	Boyut (MW)	Güçle ilgili tesis bileşenleri maliyeti (\$/kW)	Enerji depolama bileşenleri maliyeti (\$/kWh)	Tipik depolama saatleri (h)	Toplam Maliyet (\$/kW)
Tuz	200	350	1	10	360
Sert kaya	200	350	30	10	650
Gözenekli oluşum	200	350	0.1	10	351

Sıkıştırılmış hava enerji depolama teknolojilerine ait teknik karakteristikler Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Teknik Karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	2 - 6
Güç kapasitesi (MW)	≥ 300
Kalıcı enerji depolama süresi*	h- a
Ömrü (Yıl)	20-40
Deşarj süresi *	1-24+h
Döngü sayısı (döngü)	8 000- 17 000
Verimliliği (%)	~ 42-54
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Ticarileşmiş/ Uygulandı

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

Sıkıştırılmış hava enerji depolama teknolojilerin maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 400-880 \$/kW, arazi şekline bağlı olarak (doğal rezervuarlar, yapaydan çok daha ucuz) enerji için sermaye maliyetleri 2-120 \$/kWh, bakım maliyetleri yaklaşık 0.003-0.004 \$/kWh ve onarım maliyetleri 3-15 \$/kW/yıl olmaktadır.

5.3. Volan Enerji Depolama Teknolojisi

Volan, en eski mekanik enerji depolama sistemlerinden biri olarak binlerce yıldır var olmuş ve günümüzde büyük ilgi uyandıran bir enerji depolama teknolojisidir. Bu teknoloji, alternatifler üzerine bir enerji depolama çözümü olarak birçok avantaj sunabilir. Çünkü volanlar, yüksek çevrim ömrü, uzun işletme ömrü, yüksek gidiş-dönüş verimliliği, yüksek güç yoğunluğu, düşük çevresel etki özelliklerine

sahiptir. Ayrıca, yığınarlarda yapılandırıldığında üst sınır olmaksızın mega joule (MJ) seviyelerinde enerji depolanabilir.

Volan; döner bir kütle içinde kinetik enerjiyi depolayan mekanik bir cihaz olup en eski enerji depolama teknolojilerinden biridir. Volan, elektrik enerjisine talebin yoğun olmadığı zamanlarda, yüksek devir sayısı ile dönen motor sayesinde enerjiyi kinetik enerji şeklinde depolar. Sonradan elektrik enerjisine talebin yoğun olduğu zamanlarda, kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Sistemden enerji alındığı zaman, enerjinin korunumu kanunu gereği devir sayısı azalır. Benzer şekilde sisteme enerji verildiği zaman devir sayısı artar. Bu işlemler sırasında devir sayısı yaklaşık olarak 75.000 devir/dakika'yı bulabilir. Volan, kontrollü bir güç sağlamak ve büyük güç etkileri oluşturmak için; ulaşım, uzay, telekomünikasyon ve nükleer araştırma endüstrilerindeki güç sistemlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca şebekeden uzak olan uygulama alanlarında, frekansı düzenlemek ve güç dalgalanmalarını azaltmak için kullanılmıştır. Bu enerji depolama teknolojisi, yüksek güçlü sistemler için uygun olmasına rağmen yüksek enerjili sistemler için uygun değildir. Volan enerji depolama teknolojisinin teknik karakteristikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3: Volan teknolojisinin teknik karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	20 - 80
Güç kapasitesi (MW)	0.1-20
Kalıcı enerji depolama süresi*	s- dk
Ömrü (Yıl)	15-20

Deşarj süresi *	1 s -15 dk
Döngü sayısı (döngü)	~ 20 000- 10 000 000
Verimliliği (%)	~ 89-95
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Yeni Ticarileşmiş/ Uygulanamaz

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

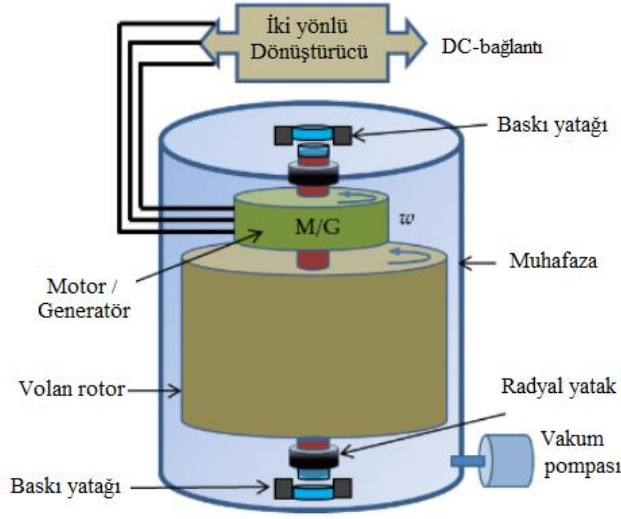
Volan enerji depolama teknolojisinin maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 250-650 \$/kW, enerji için sermaye maliyetleri 1000-10 000 \$/kWh, bakım maliyetleri yaklaşık 0.0015-0.004 \$/kWh ve onarım maliyetleri yaklaşık 6.5-20 \$/kW/yıl olmaktadır.

Volanlarda depolanan enerji Denklem (5.1) verilmiştir.

$$J = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de J: enerji (Joule veya Wh), I: atalet momenti (kg.m²) ve ω : açısal hız (rad/s)'dir.

Mekaniksel enerji depolama teknolojilerinde biri olan volan enerji depolama ünitesinin kesit şeması Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Volanın yapısı ve bileşenleri (Amiyar. 2017)

Volan uygulamaları, elektrik şebekesi seviyesindeki büyük ölçekten, müşteri seviyesindeki küçük ölçeğe kadar uzanır.

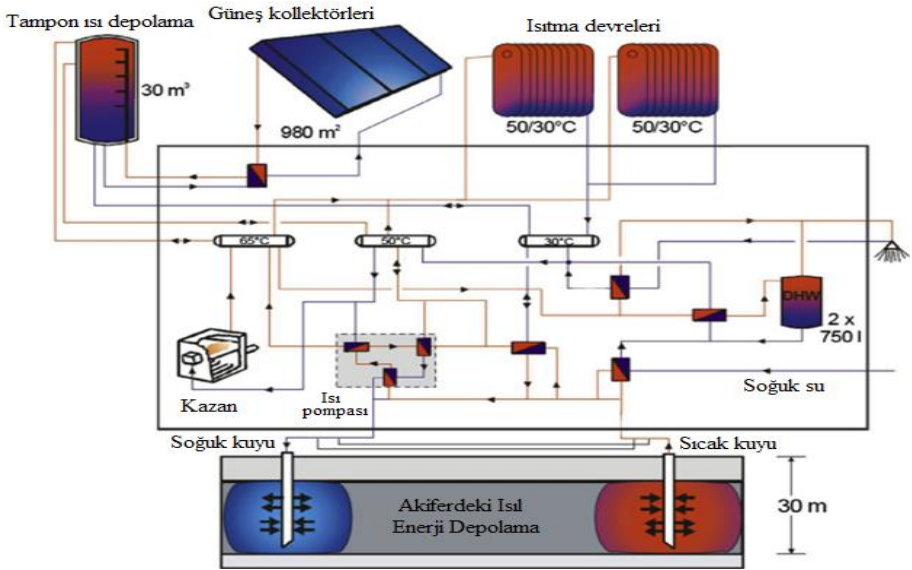
Volanların en iyi ve en uygun uygulamaları, sık şarj-deşarj döngüleri söz konusu olduğunda kısa bir süre için yüksek güçlü (örneğin, kW'ın 100 s/ saniyenin 10 s) alanlardır.

Volanlar, rüzgar ve güneş enerjisinin güç sistemlerine dahil edilmesinde sistem kararlılığını iyileştirerek yardımcı olabilir. Volanların hızlı tepki verme özellikleri onları, rüzgar enerjisi dahil uygulamalarda şebeke frekansı dengelemesi için uygun hale getirir.

6. TERMAL (ISIL) ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

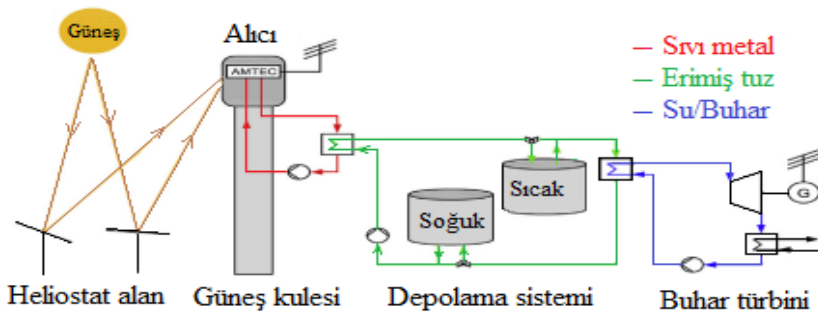
Termal (ısı) enerji depolama teknolojisi, depo edilen enerjinin daha sonra soğutma ve ısıtma uygulamaları ile güç üretiminde kullanılabilmesi için ısı enerjisi bir depolama ortamında ısıtarak veya soğutarak depolayan bir teknolojidir. Dolayısıyla, bu teknoloji enerji elde edilmesi sonucunda, arz talep arasındaki fark ile zaman arasındaki uyumsuzluk ortadan kaldırılacaktır. Isı enerji depolama teknolojisi özellikle binalarda, endüstriyel tesislerde, tarım ve ulaşım sektörlerinde ısıtma - soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bu teknolojinin enerji sisteminde kullanılmasıyla, doğal gaz, kömür, petrol gibi fosil yakıt kullanımından tasarruf elde edilerek genel verimlilikte bir artış, daha iyi güvenilirlik, enerji birim fiyatının ucuz olduğu saatlerde (22:00-06:00 saatleri arası) depolanan enerjinin enerji birim fiyatının pahalı olduğu saatlerde (17:00-22:00 saatleri arası) kullanılmasıyla daha iyi bir ekonomiye, yatırım ve işletme maliyetlerinde azalmaya ve daha az çevre kirliliğine (daha az karbondioksit (CO₂) emisyonu) yol açabilmesi gibi avantajları vardır. Örnek bir ısı enerji depolama yapısı Şekil 6.1'de verilmiştir.

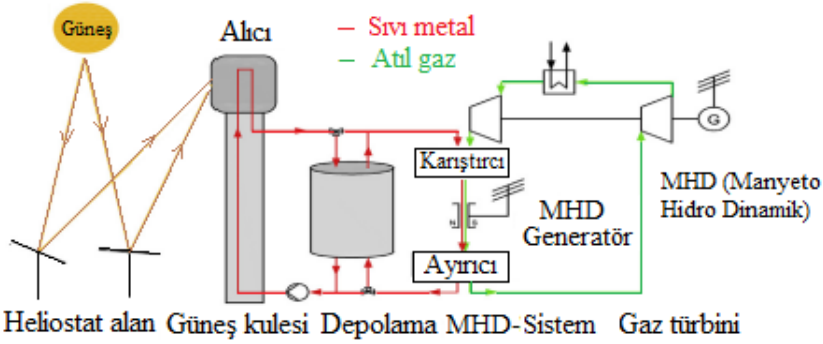


Şekil 6.2: Akifer Tipi Isıl Enerji Depolama Sistemi (Wang, 2014)

Isıl enerji depolamada güneş alıcılı sistemler de kullanılmaktadır. Güneş alıcı tüp duvar sıcaklığı düşük olacak ve tüplerdeki sıcaklık derece derece azalacaktır. Daha düşük tüp duvar sıcaklıkları ayrıca çevreye daha az ısı kaybı sağlar. Bu nedenle sıvı metaller alıcı verimliliğini artırır. Ancak sıvı metaller çok pahalıdır ve korozyona eğilimlidir. Sıvı metal kullanılarak konsantre güneş enerji ile ısıl enerji depolamaya ilişkin şematik gösterim Şekil 6.3(a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 6.3: (a) Sıvı metal alıcı olarak tuzlu ısıl enerji depolama (Fritsch, 2015)



Şekil 6.3: (b) Sıvı metal kullanılarak doğrudan ısı depolama (Fritsch. 2015)

Isıl enerji depolama teknolojisinin teknik karakteristikleri, Tablo 6.1’de verilmiştir.

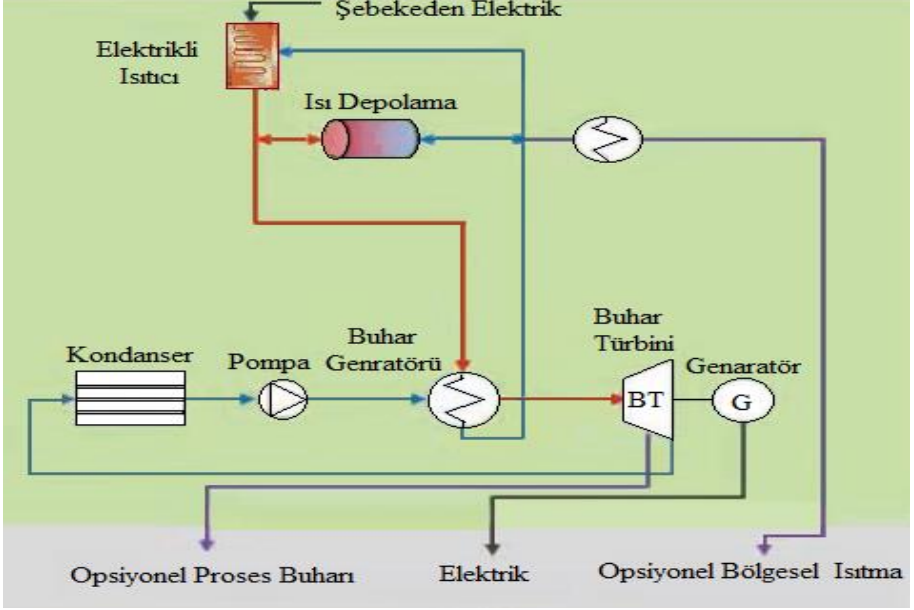
Tablo 6.1: Isıl enerji depolama teknolojisinin teknik karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	10 - 50
Güç kapasitesi (MW)	0.1-300
Kalıcı enerji depolama süresi*	dk-günler
Ömrü (Yıl)	5-30
Deşarj süresi *	1-24h+
Döngü sayısı (döngü)	-
Verimliliği (%)	50-90
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Ticarileşmiş/ Uygulanamaz

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

Isıl enerji depolama teknolojisinin maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 100-400 \$/kW, enerji için sermaye maliyetleri kullanılan teknolojiye bağlı olarak (doğal rezervuarlar, yapay rezervuarlardan daha ucuzdur) 3-130 \$/kWh, bakım ve onarım maliyetleri 120 \$/kW/yıl (toplam sabit ve çeşitli maliyetler)

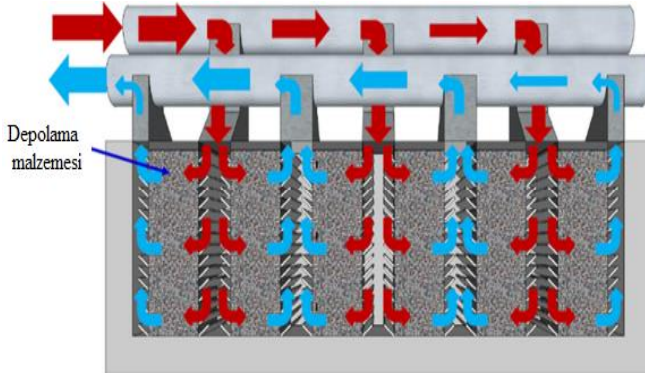
olmaktadır. Elektrik ve ısı enerji depolama bileşenleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4: Elektrik ve Isıl Enerji Depolama Bileşenleri

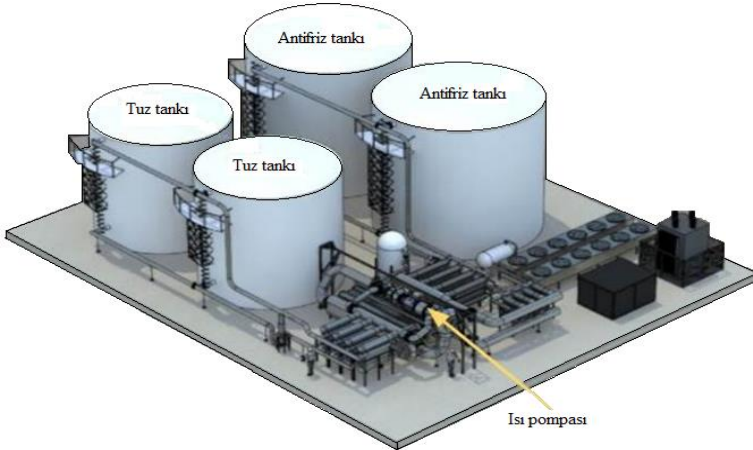
6.1. Erimiş Tuz Enerji Depolama

Erimiş tuz enerji depolama teknolojisinde, rüzgar türbini ve güneş paneli gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinde güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi elde edilip bu enerji ısı enerjisine çevrilmektedir. Erimiş tuz enerji depolama teknolojisinin çalışma prensibi Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5: Erimiş tuz enerji depolama teknolojisinin çalışma prensibi ((*STORASOL 2019*)

Elde edilen enerji, tuz sistemi sayesinde tesislerde depolanabilmektedir. Enerjiye ihtiyaç olduğunda, işlemlerin tersi uygulanarak elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Böylece özellikle rüzgar türbini ve güneş paneli gibi yenilenebilir enerji teknolojileri ile üretilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin depolanması sağlanmış olur. Bu sistemde bir kısımda tuz tankı diğer kısımda ise antifriz tankları bulunmaktadır. Buna uygun şematik gösterim Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6: Tuz ve Antrifriz Tanklarında Isıl Depolama

Yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen enerji ile buzdolaplarında bulunan soğutma sistemine benzer olarak; sistemde bulunan antifriz tankı akışkanı soğutmayı, tuz tankı ise akışkanı ısıtmayı sağlamaktadır. Enerji geri kullanılmak istendiği zaman ise sıcak (tuz tankı) ve soğuk tank (antifriz tankı) arasında oluşan kuvvetli rüzgarların türbinleri çalıştırması sonucunda elektrik enerjisi üretilmektedir. Erimiş tuz teknolojisinin teknik karakteristikleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Erimiş tuz teknolojisinin teknik karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	147.7 - 200
Güç kapasitesi	50 MW’a kadar
Kalıcı enerji depolama süresi*	h
Ömrü (Yıl)	25 yıl kadar
Deşarj süresi *	h
Döngü sayısı (döngü)	> 1 000 000
Verimliliği (%)	60-97
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Yeni Ticarileşmiş/ THS – 9, Gelişmekte

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

Erimiş tuz teknolojisinin maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 1000-3800 \$/kW, enerji için sermaye maliyetleri 16-220 \$/kWh, bakım ve onarım maliyetleri 112 \$/kW/yıl (toplam sabit ve çeşitli maliyetler) olmaktadır.

6.2. Duyulur Isı Enerji Depolama

Duyulur ısı ile yapılan enerji depolama sistemlerinde enerji; hava, su, yağ, tuğla, kayaç, kum ve toprak gibi malzemelerde depolanabilir. Bu sistemlerde depolanan enerji; depolama elemanı miktarı, sıcaklık farkı ve ısı kapasitesi ile orantılı olmaktadır. Eğer çalışmanın sıcaklık aralığı yüksekse, duyulur ısı depolama faydalıdır.

Duyulur ısı enerji depolama sisteminde, maddenin ısı kapasitesinin büyük olmasının yanında, alevlenme ve yanma özelliğinin olmaması, maddenin 10-15 yıl gibi uzun sürede özelliklerini koruması, korozif ve zehirli olmaması istenmektedir. Bununla birlikte depolama malzemesinin kolay bulunabilir ve ucuz olması gerekmektedir. Duyulur ısı enerji depolama uygulamaları içinde en yaygın kullanılan, su maddesidir. Duyulur ısı depolamada su kullanılmasının birçok üstünlüğü vardır:

- Ucuz ve kolay elde edilir.
- Yanıcı ve zehirleyici özelliği yoktur.
- Kimyasal, fiziksel ve termodinamik karakteristikleri çok iyi bilinmektedir.
- Enerji depolaması olarak faydalanılırken aynı zamanda enerji toplayıcı akışkan olarak da kullanılabilir.
- Isı kapasite değeri büyüktür.
- Soğutma ve ısıtma sistemlerinde gerekli sıcaklık aralığında kararlı bir sıvı buhar dengesi bulunmaktadır.
- Akışkan dinamiği ve ısı transferi iyi bilinmektedir.

- Paslanma (korozyon) etkisini azaltmak için bir çok teknoloji geliştirilmiştir.

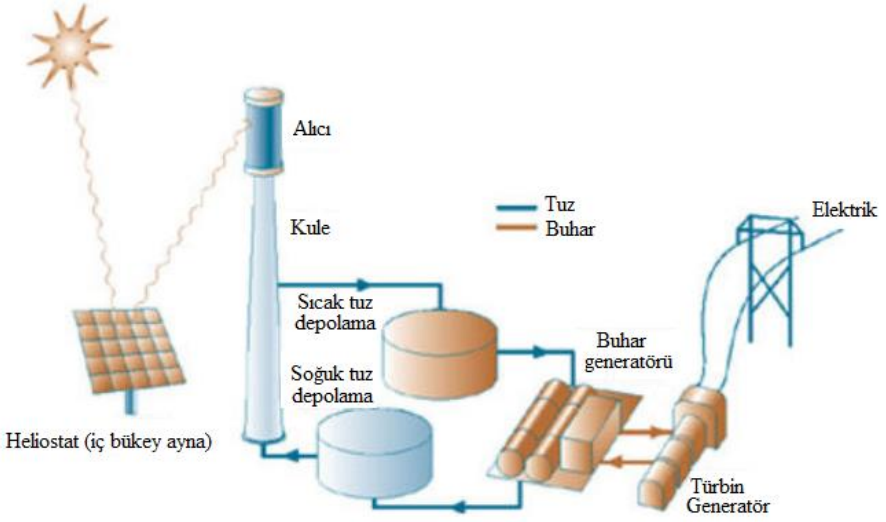
Suyun sayılan üstünlükleri yanında bazı kusurları da bulunmaktadır:

- Donduğunda genişlemektedir. O nedenle, donmaya karşı önlem alınması gerekir.
- Korozyon yapabilme özelliği nedeniyle depo içine korozyonu önleyen madde ilave edilmelidir.
- Suyun erime ve kaynama noktaları arasında küçük fark bulunmaktadır.
- Yüksek sıcaklık olması durumunda enerjiyi depolamak güçtür. Genellikle sıcak su depoları; alüminyum, galvanizli sac, beton veya fiberglastan yapılmaktadır. Kullanılan depoların dış kısmı 4-6 cm kalınlığında cam yünü, strofor veya eşdeğer kalınlıkta diğer ısı yalıtım malzemesi kullanılarak yalıtılması sonucunda çevreye olan ısı kaybı azaltılır.

Tablo 6.3: Bazı Depolama Malzemelerinin 300 K Sıcaklığındaki Özellikleri [Dinçer, 2002; Çengel, 2003]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı iletim kat. (W/mK)	Özgül ısı (J/kgK)	Isı yayılım kat. (10 ⁻⁶ m ² /s)	Isı kapasitesi (10 ³ J/m ³ K)
Ođun	721	0.159	1260	0.17	0.91
Beton	1600	0.790	840	0.59	1.34
Ateş Tuğlası	1920	0.900	790	0.59	1.52
Cam	2710	0.760	837	0.33	2.27
Alüminyum	2702	237.000	903	97.13	2.44
Karbon Çeliđi (Mn≤%1, Si<%0.1)	7854	60.500	434	17.75	3.41
Saf Demir	7870	80.200	447	22.80	3.52
Çakıl taşı	2050	1.730	1840	0.46	3.77
Su	996	0.615	4178	0.15	4.16

Bir duyulur ısı enerji depolama sisteminde depolama elemanı olarak kullanılan tank, depolama elemanını ve ısıyı tutmak için kullanılmaktadır¹. Katı depolama elemanları için ısı kontrolü, sıvı depolama elemanlarına göre daha kolaydır. Depolamada kullanılan elemanın depolama yeteneği, özgül ısı değeri ile bağıntılıdır. Çift tanklı enerji depolama sistemi Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7: Çift tanklı enerji depolama sistemi (EnergyBlog 2005)

Duyulur ısı depolama sistemleri, yalnızca depolama ortamının termal iletkenliğine ve ısı kapasitesine bağlıdır. Günümüzde kullanımda olan ısı depolama sistemlerinin büyük çoğunluğu, duyulur ısı depolaması kullanmaktadır.

Duyulur ısı depolaması, enerjinin depolama malzemelerinin çeşitli sıcaklıkta depolanabileceği anlamına gelir. Depolanan ısının miktarı, depolama malzemelerinin yoğunluğu, özgül ısı, hacim ve yoğunluğu

ile orantılıdır. Temel olarak, belirli ısı, yoğunluk ve termal iletkenliği, duyulur ısı depolama malzemelerinin temel termal özellikleridir.

Duyulur ısı depolaması birçok büyük ölçekli konut uygulaması arasında uygulanmış ve değerlendirilen nispeten olgun bir teknolojidir.

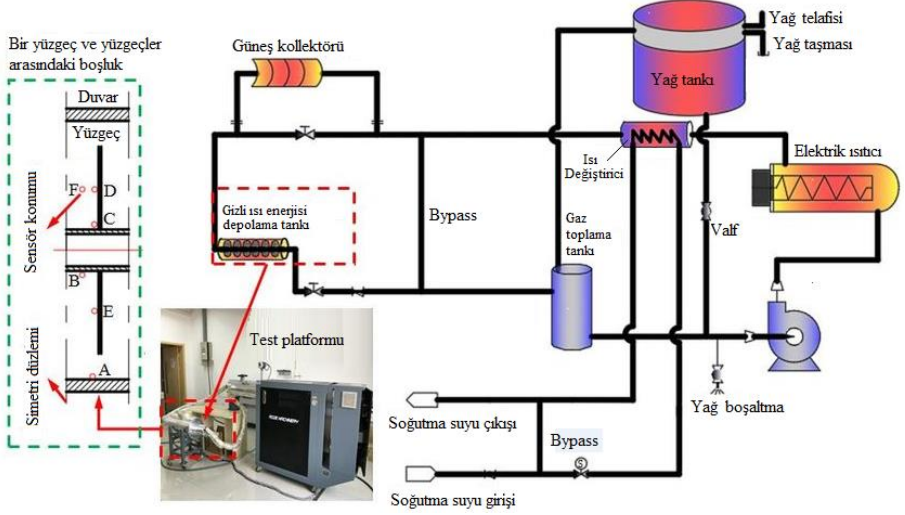
6.3. Gizli Isı Enerji Depolama

Gizli ısı depolama, maddelerin faz değişimleri sırasında iç enerjilerinde meydana gelen artışla beraber sabit sıcaklıkta faz değiştirmek suretiyle enerjinin depolanmasıdır. Gizli ısı ile enerji depolamanın olduğu sistemlerde; faz değişimine uğrayan bir faz değişim maddesi olan sabit sıcaklık aralığında eriyen veya buharlaşan maddesi kullanılmaktadır.

Gizli ısı depolamada, bir materyalin faz değişimi gerçekleşinceye kadar ısıtma yöntemi ile yapılmaktadır. Madde, katı halden sıvı hale veya sıvı halden gaz haline geçerken ısıyı depolamaktadır.

Gizli ısı depolama yöntemi, duyulur ısı depolama yöntemiyle karşılaştırıldığında bazı üstün özelliklere sahip olduğunu söylemek mümkündür. Bu üstünlüklerin en önemlisi, faz değişim maddesinde belli miktarda ısının depolanmasında ihtiyaç duyulan hacmin, aynı miktar ısının duyulur ısı olarak depolanmasında ihtiyaç duyulan hacimden daha küçük olmasıdır. Başka bir diğer üstünlüğü ise, ısı deposundan ısının çekilmesi sırasında depo sıcaklığının yaklaşık olarak sabit kalmasıdır. Ancak duyulur ısı depolama yöntemine göre

daha maliyetlidir. Gizli ısı termal enerji depolama deney platformunun yapı diyagramı Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8: Gizli Isı Enerji Depolama Deney Platformunun Yapı Diyagramı (Bie, Li, Malekian.2018)

Erime aşaması sırasında, sıcaklığı $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında sabit bir ısı kaynağı olarak, sadece yukarı akıştaki konsantre güneş alanı kazancı olabileceğinden ısı transfer akışkanın sıcaklığının $250 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında olması gerekir. Sıcaklık yeterli olmadığında bu sıcaklık elektrikli ısıtıcı ile ayarlanabilir. Gizli ısı enerji depolamada, tüm izlenene kadar termal enerjiyi sürekli olarak depolamak gerekmektedir. Sıcaklıklar erime noktasının üzerindedir ve katılaşma aşaması sırasında, termal yük yapmak için kullanılmaktadır.

7. MANYETİK ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

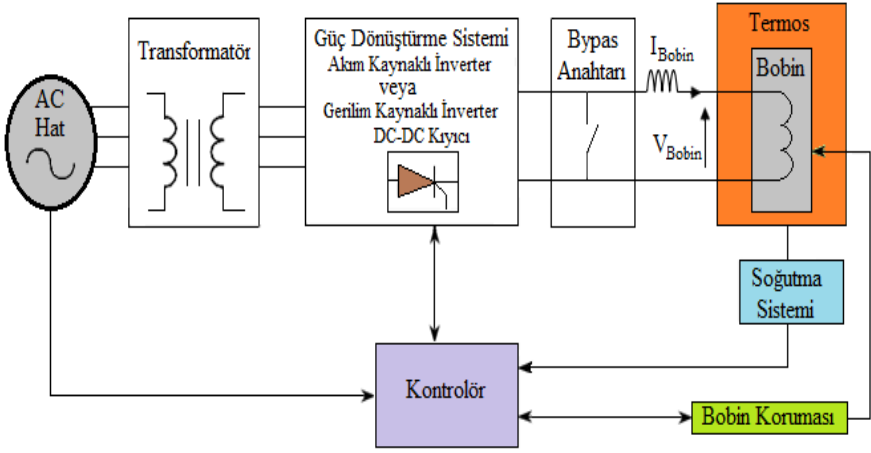
7.1. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)

Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage), çok az sayıdaki doğrudan elektrik enerjisi enerji depolama teknolojilerinden en önemlilerinden biridir. Bu enerji depolama teknolojisinde depolanan enerji, halka şeklinde sarılmış süperiletken tellerden meydana gelen bobinden oluşmaktadır. Üretilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi, yapılan bu bobine uygulanır. Elde edilen enerji, her an kullanıma hazır olacak şekilde manyetik alan şeklinde depolanır. Bu depolama teknolojisinin enerji yoğunluğu, mekanik kaygılarla 10 kJ/kg mertebesinde olup oldukça düşük bir değerle sınırlıdır. Ancak güç yoğunluğu son derece yüksek olabilir.

Süperiletken manyetik enerji depolama, enerjiye ihtiyaç duymayan durumlarda sistem şebeke gücünü doğrudan manyetik alana aktarır.

Bu depolama sistemi, zamana dayanıklı ekipman, yüksek yoğunluk, hızlı tepki hızı, düşük kayıp ve pahalılık basit teknikler gibi basit tekniklerle karakterize edilir. Bu sistem şimdiye kadar dağıtılmış güç sistemleri tarafından uyarlanmamıştır.

Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisinin verimi, %90 veya daha fazladır. Ayrıca cevap süresi, milli saniye mertebesinde olup çok kısa bir süredir. Süperiletken manyetik enerji depolama sisteminin bileşenleri Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1: Tipik bir SMES sistemi bileşenleri (Arsoy.2000)

Bobinde manyetik alan şeklinde depolanan enerji, bobin endüktans değerine ve akıma bağlıdır. Ayrıca depolanan enerji deşarj edilerek sisteme her an geri verilebilme imkanı vardır. Çıkış tarafında bir DC-AC dönüştürücü ile tekrar alternatif güç elde edilir. Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisinin uygulama alanları; yük akışı, frekans kontrolü, sistem kararlılığı, enerji yönetimi gibi oldukça geniştir. Depolama teknolojisinin yüksek verimliliği ile sayılan alanlarda kullanılması ekolojik dengeye olumlu etki oluşturmaktadır. Ayrıca gelecekte enterkonnekte sistem içerisinde uygulama alanı bulabilecek önemli bir enerji üretim birimi olduğunu söylemek mümkündür. Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisine ait teknik karakteristikler Tablo 7.1'de verilmiştir.

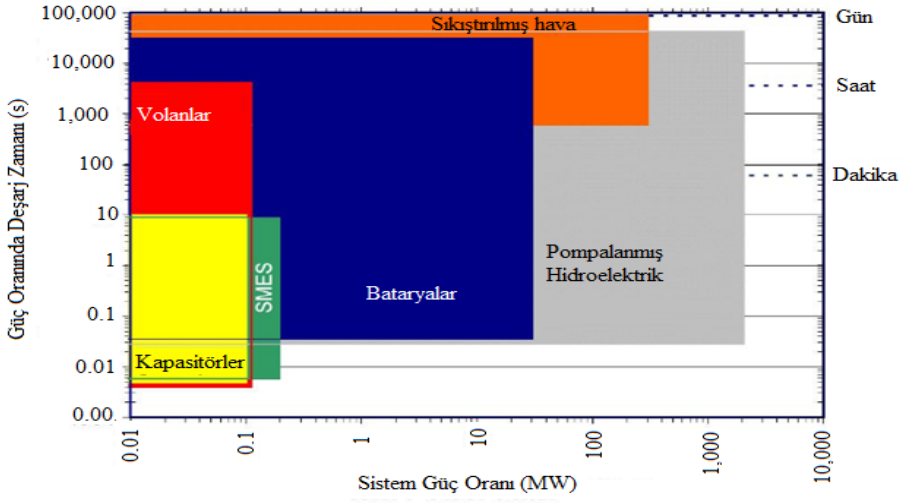
Tablo 7.1: Süperiletken manyetik enerji depolama teknik karakteristikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu (Wh/L)	0.2 - 6
Güç kapasitesi (MW)	0.1 - 10
Kalıcı enerji depolama süresi*	ms-h
Ömrü (Yıl)	20-30
Deşarj süresi *	≥ 30 dk
Döngü sayısı (döngü)	~10 000- ~ ∞
Verimliliği (%)	~ 95-97
Teknoloji olgunluğu / Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Geliştirilmekte/ THS-9

* ms – mili saniye, s – saniye, dk – dakika, h – saat, g – günler, a – aylar

Süperiletken manyetik enerji depolamanın maliyetlerine bakıldığında; güç için sermaye maliyetleri 200-489 \$/kW, enerji için sermaye maliyetleri 5 000-72 000 \$/kWh, bakım maliyetleri yaklaşık 0.001\$/kWh ve onarım maliyetleri 16-18.5 \$/kW/yıl olmaktadır.

Sonuç olarak, enerji depolama teknolojilerinin gerekliliği ve önemi nedeniyle bu teknolojiler, elektrik üretimi, ulaşım sektörü, mobil uygulamalarında ve sanayi gibi hayatın her alanında giderek artacaktır. Çeşitli enerji depolama teknolojilerinin güç oranındaki deşarj zamanı Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2: Çeşitli enerji depolama teknolojilerinin güç oranındaki deşarj zamanı

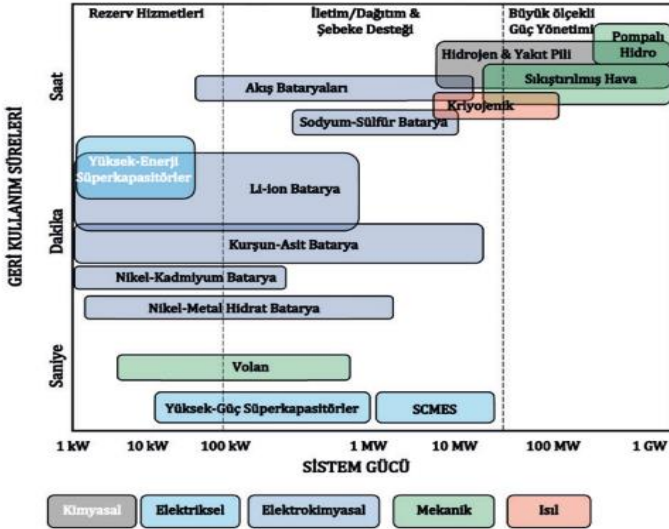
Enerji depolama sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1: Enerji depolama sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

Enerji Depolama Tekniği	Güç Kapasitesi (MW)	Çevrim Sayısı veya Süresi	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Verimlilik (%)	Tepki Süresi
Süper kapasitör	0,01 – 1	10000 – 100000	10 – 20	80 – 98	10 – 20 ms
Pompalanmış hidroelektrik	100 – 1000	30 – 60 yıl	0,2 – 2	70 – 85	saniye – dakika
Sıkıştırılmış hava	10 – 1000	20 – 40 yıl	2 – 6	40 – 75	saniye – dakika
Volan	0,001 – 1	20000 – 100000	20 – 80	70 – 95	10 – 20 ms
Kurşun asidik batarya	0,001 – 100	6 – 40 yıl	50 – 80	80 – 90	< saniye

NaS batarya	10 – 100	2500 – 4400	150 – 300	70 – 90	10 – 20 ms
Li-ion batarya	0,1 – 100	1000 – 10000	200 – 400	85 – 98	10 – 20 ms
Akış bataryası	1 – 100	12000 – 14000	20 – 70	60 – 85	10 – 20 ms
Hidrojen	0,01 – 1000	5 – 30 yıl	600 (@200 bar)	25 – 45	saniye – dakika
Sentetik doğal gaz	50 – 1000	30 yıl	1800	25 – 50	saniye – dakika
Erimiş tuz (ısıl)	1 – 150	30 yıl	70 – 210	80 – 90	dakika

Çeşitli tipteki enerji depolama teknolojileri için depolama süreleri ve kapasiteleri Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3: Çeşitli tipteki enerji depolama teknolojileri için depolama süreleri ve kapasiteleri

Bloomberg New Energy Finance tarafından yayınlanan "Uzun Dönemli Enerji Depolama Görünümü" adlı çalışmada; küresel ölçekteki enerji depolama kapasitesinin 2040 yılında 620 milyar dolarlık yatırım ile 942 GW/2,857 GWh seviyesine yükselmesi ve toplam elektrik enerjisi üretim kapasitesinin %7'lik kısmını oluşturacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca Lityum iyon pillerinin 2018-2030 arasındaki dönem için %52 oranında azalacak maliyetlerinin de etkisiyle 2040 yılı içerisinde elektrikli araçlarda toplam talep edilen enerjinin % 93'lük bölümünü oluşturacağı tahmin edilmektedir. Enerji iletimi, enerjiyi ihtiyaç duyulan yere ulaştırırken enerji depolama, enerjiyi gereksinim olduğu anda sağlar.

Enerji depolama teknolojileri, birbirinden çok farklı özelliklere sahip olmasına rağmen hiç biri mevcut özellikleriyle enerji depolamadaki tüm ihtiyaçları karşılayacak özellikte olmadığı bir gerçektir. Enerji depolamada kullanılan uygulamaların bazılarının ticari olarak olgunlaşmaya ihtiyacı bulunmaktadır. Enerji depolama teknolojilerin çevresel etkileri, depolama kapasite büyüklükleri, bakım ve geri besleme özellikleriyle birbirlerinden farklı özellikler göstermektedir. Enerji depolama teknolojisi için seçim yapılırken, depolamanın neden yapılacağı, istenilen amaca uygun depolama biçimleri ve depolama çeşidinin tüm özellikleri dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Ayrıca daha önce uygulanmış ve denenmiş olan, benzer uygulama sonuçları dikkatli incelenmesi ve sorgulanması çok önemlidir.

Teknoloji açısından özellikle batarya ve diğer depolama teknoloji çeşitleri için yapılan uygulamalarda sürekli büyüme ve teknolojik gelişmeler yaşanmaktadır. O nedenle ülke olarak enerji depolama teknolojilerinde yaşanan gelişmelerden uzak kalınmaması, kamu ve özel araştırma geliştirme çabalarının desteklenmesi oldukça önemlidir. Son yıllarda özellikle elektrikli araç teknolojilerinde ve kullanımında yaşanan hızlı gelişmeler ile yenilenebilir enerji kaynakları alanındaki zorunlu gelişme öngörülerinin artması, enerjinin depolamasını ve teknolojik kural ölçüsünde standartlar belirlemeyi zorunlu hale getirmektedir.

KAYNAKLAR

- Açıkgoz, İ.C. (2019). Volan ve Lityum-İyon Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Kıyaslanması ve Hibrit Enerji Depolama Sisteminin Farklı Yük Profilleri Üzerinde Performans Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341–378.
- Amiryar, M., & Pullen, K. (2017). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*, 7(3), 286. doi:10.3390/app7030286
- Arsoy A. B. (2000). Electromagnetic Transient and Dynamic Modeling and Simulation of a StatCom-SMES Compensator in Power Systems, Virginia Polytechnic Institute and State University, Doktora Tezi, Virginia.
- Bie, Y., Li, M., Malekian, R., Chen, F., Feng, Z., & Li, Z. (2018). Effect of phase transition temperature and thermal conductivity on the performance of Latent Heat Storage System. *Applied Thermal Engineering*, 135, 218–227.
- Bolt, A., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2020). A critical review of synthetic natural gas production techniques and technologies. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84, 103670. doi:10.1016/j.jngse.2020.103670
- Chmielewski A., Kupecki J., Szablowski Ł., Fijałkowski K.J., Zawieska J., Bogdziński K., Kulik O. and Adamczewski T. (2020). Currently available and future methods of energy storage, WWF Poland, ISBN: 978-83-60757-56-7.
- Cho, J., Jeong, S., & Kim, Y. (2015). Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 48, 84–101. doi:10.1016/j.pecs.2015.01.002
- Crampes, C., & Moreaux, M. (2009). Pumped storage and energy saving.
- Çengel, Y.A. (2013). *Heat Transfer A Practical Approach (Second Edition)*, McGraw-Hill.

- Dinçer, D. (2002). Thermal energy storage and phase-change materials, Course on Porous Media, 17-21 June 2002, Evora, Portugal.
- DOE Global Energy Storage Database. Available: [Accessed July 03 2018]
- Erdoğan O., Uzunoğlu M., Vural B. 2011. Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ
- EU JRC science for policy report, (2018). Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications.
- Fang S., Wang Y. (2021) The Role of Energy Storage Systems in Microgrids Operation. In: Anvari-Moghaddam A., Abdi H., Mohammadi-Ivatloo B., Hatziargyriou N. (eds) Microgrids. Power Systems. Springer, Cham. pp:127-149, https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4_5
- Fritsch A, Flesch J, Geza V, Singer Cs, Uhlig R, Hoffschmidt B. (2015). Conceptual study of central receiver systems with liquid metals as efficient heat transfer fluids. Energy Procedia, 69:644e53.
- Glavin M. (2012). Optimisation of a hybrid energy storage system for autonomous Photovoltaic Applications, PhD Dissertation, National University of Ireland.
- Günerhan, H. (2004). Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı, Mühendis ve Makine - Cilt: 45, Sayı: 530, Sayfa:12-17.
- Güney, M.S., Tepe, Y. (2017). Classification and assessment of energy storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews ,Volume 75, Pages 1187-1197.
- IEC. Electrical Energy Storage Executive Summary; IEC: Geneva, Switzerland, 2011.
- Istvan Taczi, I. (2016). Pumped Storage Hydroelectric Power Plants: Issues and Applications, in Energy Regulators Regional Association.
- Kocaman, B. (2013). Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2 (1), 119-127.
- Li, G. (2016). Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 897–923.

- Li, Y., Lu, J. (2017). Metal–Air Batteries: Will They Be the Future Electrochemical Energy Storage Device of Choice? *ACS Energy Lett.* 2017, 2, 6, 1370–1377, <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00119>
- Li, L., Liang, W., Lian, H., Yang, J., Dusseault, M. (2018). Compressed air energy storage: Characteristics, basic principles, and geological considerations, *Advances in Geo-Energy Research*, Vol. 2, No. 2, p. 135-147.
- Mahlia, T.M.I., Saktisahdan, T.J., Jannifar, A., et al. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 33: 532-545
- Nikolaidisa, P., Poullikkasb A. (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability, *Journal of Power Technologies*, 97 (3), 220–245.
- NEC-TOKIN. (2004). Realizing Low ESR (Equivalent series resistance). <http://www.nec-tokin.com/english/product/supercapacitor/feature.html>
- Olabi, A. G., bahri, A. saleh, Abdelghafar, A. A., Baroutaji, A., Sayed, E. T., Alami, A. H., Abdelkareem, M. A. (2021). Large-vsacle hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 46, Issue 45, 1 July 2021, Pages 23498-23528. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.10.110
- Özcan, Ö.F., Karadağ, T. Altuğ, M., Ömerül Faruk Özgüven, Ö.F. (2021), A Review Study on the Characteristics and Advantages of Battery Chemicals Used in Electric Vehicles, *GU J Sci, Part A*, 8(2): 276-298.
- Periodic Graphics: Metal-air batteries, present and future, (2019). *C&EN Global Enterprise*, 97(42), 25–25. doi:10.1021/cen-09742-feature3
- Pollet, B. G. (2011). Overview on Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC). In 1st Joint European Summer School on Fuel Cell and Hydrogen Technology, 56. Viterbo, Italy.
- Puchta M., Bard J., Dick C., Hau D., Krautkremer B., Thalemann F., Hahn H. (2017). Development and testing of a novel offshore pumped storage concept for storing energy at sea – Stensea, *Journal of Energy Storage*, 14, 271-275.

- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C. (2013). High Energy Density Metal-Air Batteries: A Review. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(10), A1759–A1771. doi:10.1149/2.062310jes
- Rahman, M.M., Oni, A.O, Gemechu, E., Amit Kumar, A. (2020). Assessment of energy storage technologies: A review, *Energy Conversion and Management*, Volume 223,113295.
- RadioShack , (2004). Nickel-Metal Hydride Batteries. http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nimh-main.htm.
- Sahay, K. ve Dwivedi, B. (2009). “Energy Storage Technology for Performance Enhancement of Power Systems”, *Electrical Power Quality & Utilization Magazine*, Volume 4, Issue 1: 2-6.
- Silvera , V. , Cantane, D. A. , Reginatto, R. , Ledesma, J. J. G. , Schimdt, M. H. and Ando Junior, O. H. (2018). Energy Storage Technologies towards Brazilian Electrical System, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18) Salamanca (Spain)*, 21th to 23th March.
- Slocum A.H., Fennell G.E., Dunder G., Hodder B.G., Meredith J.D., Sager M.A. (2013). Ocean renewable energy storage (ORES) system: Analysis of an undersea energy storage concept, *Proceedings of the IEEE*, 101(4), 906–924.
- Tai, Z., Hanawa, K., Ju , D., Luo, W., Lyu, R., Kousuke Ishikawa, K., and Susumu Sato, S. (2021). Effects of Carbon Fiber Compression Ratio and Electrolyte Flow Rate on the Electrochemical Performance of Vanadium Redox Batteries, *Hindawi Journal of Chemistry*, Volume 2021, Article ID 6646256, 10 pages <https://doi.org/10.1155/2021/6646256>
- Torasol. (2019). High Temperature Thermal Energy Storage (HTTES) Technology Introduction Technology for the Future and Today. 74321 Bietigheim Bissingen Germany.
- U.S. Department of Energy, (2020). “CCUS: Carbon Capture, Utilization, and Storage,” *H2@Scale*, Washington, D.C., Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>

- Wang, C. (2006). Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems, PhD Dissertation, Montana State University, Montana.
- Wang, T., Yan, X., Yang, H., et al. (2013). A new shape design method of salt cavern used as underground gas storage. *Appl. Energy* 2013, 104(2): 50-61.
- Wang, L., Zhou, Z., et al. (2018). Engineering of lithium-metal anodes towards a safe and stable battery, *Energy Storage Materials*, 14, 22-48.
- Whittingham, M.S. (2012). Metal-Air Batteries: A Reality Check, in PRiME, Honolulu, USA, Electrochem. Soc.
- Xiao, J., Li, Q., Bi, Y., Cai, M., Dunn, B., Glossmann, T., Whittingham, M. S. (2020). Understanding and applying coulombic efficiency in lithium metal batteries. *Nature Energy*, 5(8), 561–568. doi:10.1038/s41560-020-0648-z
- Xu, J., Wang, R.Z., Li Y. (2014). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Sol Energy* 2014;103:610e38.
- Yang, Z., Zhang, J., Kintner Meyer, M. C. W., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J. P., & Liu, J. (2011). Electrochemical Energy Storage for Green Grid. *Chemical Reviews*, 111(5), 3577–3613. doi:10.1021/cr100290v
- Zhang, X., Wang, X.G., Xie, Z., Zhen Zhou, Z. (2016). Recent progress in rechargeable alkali metal air batteries, *Green Energy & Environment*, Volume 1, Issue 1, April 2016, Pages 4-17.
- <https://www.pv-magazine.com/2021/08/13/lithium-metal-battery-with-capacity-retention-of-88-over-1000-cycles/>
- <https://electrochemicalblog.wordpress.com/2016/02/01/sodium-sulfur-pil/>
- NEC-TOKIN (2004). Realizing Low ESR (Equivalent series resistance). NEC-TOKIN, <http://www.nec-tokin.com/english/product/supercapacitor/feature.html>
- https://www.researchgate.net/publication/350084004_The_Role_of_Energy_Storage_Systems_in_Microgrids_Operation

IEA, International Energy Agency

[http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-\(1\).aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx)

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/10/f79/Electricity%20Storage%20Technologies%20Report.pdf>

<https://www.man-es.com/discover/decarbonization-glossary---man-energy-solutions/synthetic-natural-gas>

<https://tr.irna.ir/news/84429972/%C4%B0ran-yeni-nesil-metal-hava-pilleri-%C3%BCretme-teknolojisini-elde>.

<https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1373737>

<https://www.pv-magazine.com/2021/08/13/lithium-metal-battery-with-capacity-retention-of-88-over-1000-cycles/>

<https://electrochemicalblog.wordpress.com/2016/02/01/sodyum-sulfur-pil/>

<https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-batteries-capacitors>

<http://www.eseslab.com/ESsensePages/PHS-page>



IKSAD
Publishing House



ISBN: 978-625-8007-97-8