



GELECEĞİN ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Edip TAŞKESEN^{1*}, Hamza ALAHMAD², Elif Nur BİLEN³

¹ Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü,
Merkez/Şırnak, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3052-9883>

² Şırnak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri, A.B.D,
Merkez/Şırnak, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3449>

³ Şırnak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri A.B.D,
Merkez/Şırnak ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7385-3704>

Anahtar kelimeler

Öz

Enerji, enerji depolama teknolojileri, piller, mekaniksel enerji depolama, elektrokimyasal enerji depolama

Ülkemizde petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, çevresel ve sosyal kısıtlamalar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Sanayi ve teknoloji geliştikçe modern yaşamın sürdürülebilirliğini ve üretimin sürekliliğini sağlamak için enerji sürekliliği çok önemli olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılırken, enerji üretim kesintilerinin en aza indirilmesinde ve bu sistemlerin dağıtımında depolama teknolojileri çok önemli bir rol oynamaktadır. Enerji, ısıma enerjisi, kimyasal enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, elektrik potansiyel enerjisi, elektrik enerjisi, termal enerji, gizli ısı enerjisi ve kinetik enerji dahil olmak üzere birçok biçimde görünmektedir. Enerji depolamanın amacı, istenildiği zaman ve istenildiği yerde kullanılmaya hazır olmasıdır. Enerji depolama, enerjiyi depolaması zor olan formlardan depolaması daha kolay veya daha ucuz olan formlara dönüştürmeyi içermektedir. Enerji depolama ile gün boyunca farklı enerji gereksinimlerine hızlı ve güvenilir bir şekilde tepki vermesi sağlanılmaktadır. Enerji depolama teknolojisi; güç sistemlerini iyileştirmesi, yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlaması ve petrol bazlı yakıtlara alternatif sunması nedeniyle büyük potansiyele sahip bir teknolojidir. Enerjinin bir çok farklı depolama yöntemleri bulunmaktadır. Enerji çok değişik formlarda depolama yöntemleri vardır. Örneğin biyolojik depolama, kimyasal depolama, ısı depolama, elektriksel depolama, potansiyel enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, kinetik enerji vb. bu çalışmada bunlardan başlıca enerji depolama yöntemleri olan kimyasal, mekaniksel, elektrokimyasal, ısı ve elektriksel enerji depolama yöntemleri ele alınmıştır. Bu çalışmanın daha önce yapılmış çalışmalar ve standartlar açısından, literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak yapılan araştırma neticesinde en yaygın olarak elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri kullanıldığı görülmüştür.

* edip.taskesen@sirnak.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1260357

FUTURE ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES, SUSTAINABILITY AND ENERGY CONVERSION

Keywords

Energy, energy storage technologies, batteries, mechanical energy storage, electrochemical energy storage

Abstract

In our country, the limited reserves of fossil fuels such as oil, coal and natural gas, and environmental and social restrictions have increased the orientation to renewable energy sources. As industry and technology develop, energy continuity becomes very important to ensure the sustainability of modern life and the continuity of production. When using renewable energy sources, storage technologies play a very important role in minimizing power generation interruptions and in the distribution of these systems. Energy appears in many forms, including radiative energy, chemical energy, gravitational potential energy, electrical potential energy, electrical energy, thermal energy, latent heat energy, and kinetic energy. The purpose of energy storage should be ready to be used whenever and wherever desired. Energy storage involves converting energy from forms that are difficult to store to forms that are easier or cheaper to store. Energy storage ensures that it responds quickly and reliably to different energy requirements throughout the day. Energy storage technology; It is a technology with great potential as it improves power systems, contributes to renewable energy production and offers an alternative to petroleum-based fuels. There are many different storage methods of energy. There are many different forms of energy storage methods. For example, biological storage, chemical storage, thermal storage, electrical storage, potential energy, gravitational potential energy, kinetic energy etc. In this study, chemical, mechanical, electrochemical, thermal and electrical energy storage methods, which are the main energy storage methods, are discussed. It is thought that this study will contribute to the literature in terms of previous studies and standards. As a result of the research, it has been seen that electrochemical energy storage technologies are most commonly used.

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 05.03.2023

Kabul Tarihi : 25.09.2023

Review Article

Submission Date : 05.03.2023

Accepted Date : 25.09.2023

Extended Abstract

Introduction/ Background

In this study, we provide an overview of current energy storage technologies. By classifying energy storage technologies, the working principles and features of each technology are explained. Verimli enerji depolama, mevcut enerji altyapısında büyük ölçekte uygulanırsa, enerji endüstrisinde on yıllardır görülen en büyük değişikliklerden bazılarını beraberinde getirebilir. By enabling intermittent sources of energy, wind and solar could make their debut en mass, filling fields with wind turbines and deserts with solar arrays. By adding more renewable energy sources to the power mix, there is greater potential for decreases in harmful emissions. Additionally, energy storage would improve the reliability and dynamic stability of the power system by providing stable, abundant energy reserves that require little ramp time and are less susceptible to varying fuel prices or shortages. Energy storage can shift the higher peak load to off-peak hours in order to level the generation requirement, allowing generators to run more efficiently at a stable power level, potentially decreasing the average cost of electricity. Additionally, increased energy storage capacity can defer or avoid generation capacity increases, decrease transmission congestion (and thereby transmission losses), and help enable distributed generation such as residential solar and wind systems. Energy storage technology; It is a technology with great potential as it can improve electrical power systems, contribute to renewable energy production and offer an alternative to petroleum-derived fuels. In this study; chemical, electrical, electrochemical, mechanical and thermal energy storage systems were discussed and information was given about their structures and working principles.

Objectives/ Research Purpose

The aim of this study is to classify the types of energy storage technologies and to deal with these technologies. Providing a detailed overview of how each of the energy storage devices works so the reader can get a better idea of the potential benefits and drawbacks of each device.

Methods/ Methodology

In this section, energy storage technologies are introduced by classifying, and the working principles of these technologies are examined one by one by classifying them. Energy storage techniques can be used in a variety of applications. In energy storage systems, the form of energy converted largely determines the classification. Energy storage techniques can be divided into 5 main parts; chemical, electrochemical, electrical, mechanical and thermal storage. Energy storage systems have become more imperative than ever, due to supply-demand imbalance. But storage requires very difficult and costly equipment. The stored energy must be replaced before it is completely depleted. In order not to experience complete exhaustion, the probabilities must be calculated very well and an appropriate system must be designed by taking into account the interruption times, the instantaneous increase and decrease in demand. However, in this way, activities can be continued without interruption. Electrical energy can be stored in a variety of ways. These; chemical, electrochemical,

electrical, mechanical and thermal systems. Among these methods, thermal energy storage systems with mechanical pumps and hydro storage systems have emerged and it has been predicted that they can be extensively researched and easily applied.

Results/Findings

An energy storage system would enable smart grid concepts, one of the driving technologies of the future. Acquiring energy storage systems that eliminate fluctuations associated with energy productions can facilitate the growth of energy impacts. It can support the energy storage system systems reliability and additionally offer some auxiliary setup such as load monitoring, spin reserve, black start feature. Also, energy storage systems can be taken to eliminate peak loads, thereby throttling generator failures. The amount of energy stored can play an important role in compensating for the peak load. The capacity factor of base generation capacities can be increased in this way, also a positive factor for low-priced stored energy use. Energy storage systems seem to be locked in to adapt to the operation of new technologies, consumer services, operation and rotational systems of electricity generation and distribution systems over the past year. It can also provide many configurations such as display in network performance, fast response, upload matching capability. Important problems of energy houses such as sustainability and environmental protection lead us to diversify energy use and increase energy consumption in the future. Variations in energy/electricity generation quantities from renewable short-term sources and their long-term fluctuations require some critical measurements. Therefore, energy storage becomes significantly important for screens to which the electrical grid system responds because of easy manageability, controllability, predictability and execution. It is a research subject that cultivates batteries and energy storage systems that have taken their place in all areas of our lives, and is responsible for the areas most open to development.

Discussion and Conclusions

This study provides an overview of current energy storage technologies, categorizing them into chemical, electrochemical, electrical, mechanical, and thermal storage systems. These technologies have the potential to bring significant changes to the energy infrastructure and contribute to sustainable energy production. Energy storage systems, when integrated into the power grid, enable the concept of a smart grid, reducing energy fluctuations, facilitating the integration of renewable energy, and offering solutions for environmental sustainability.

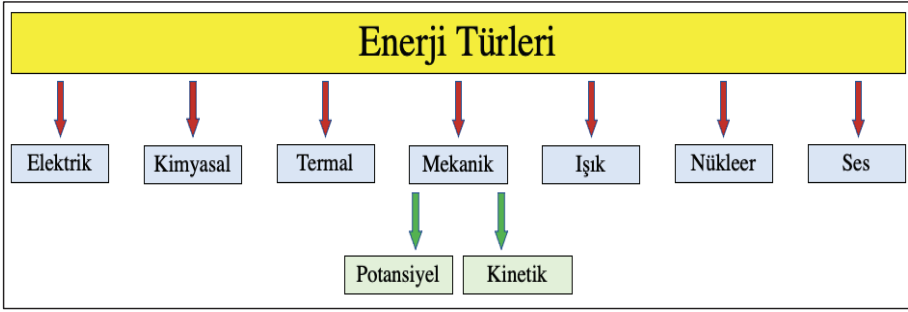
Among the various methods explored, electrochemical energy storage technologies emerged as the most commonly utilized in the research. These findings highlight the potential of energy storage technologies to play a crucial role in future energy transformation and sustainability efforts. The study suggests that these technologies can address challenges associated with energy reliability and environmental impact, positioning them as key players in the ongoing transition to a more sustainable energy landscape.

1. Giriş

Enerji, soyut bir varlık olarak kabul edilen ve yalnızca biçimlerini ve dönüşümlerini gözlemleyerek anlaşılabilen bir kavramdır. Bu kavramın çeşitli tanımları bulunmakta ve farklı perspektiflerden ele alınmaktadır (Karakoç ve diğ. 2012; Mehling, 2017). Bunlar;

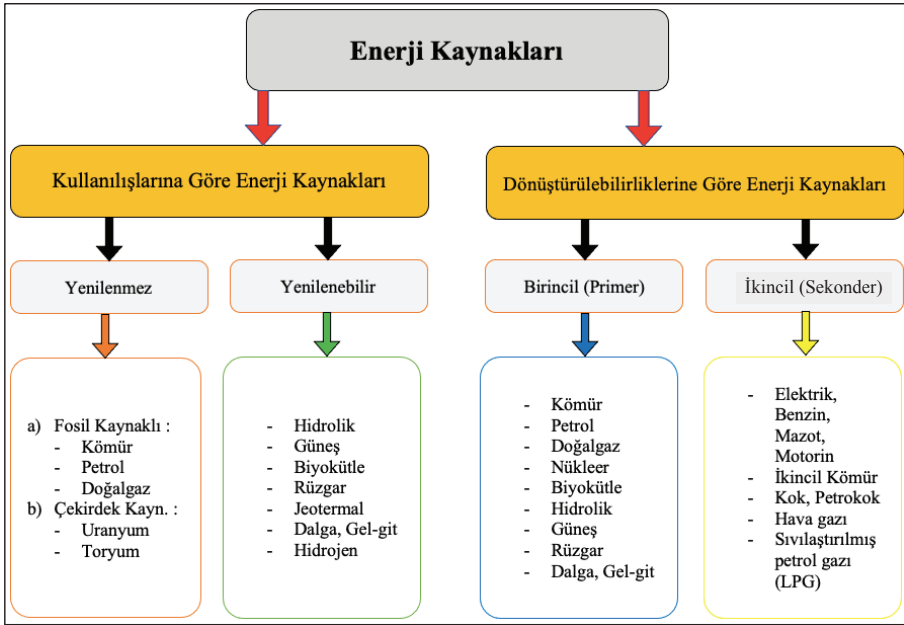
- Maddenin veya cismin iş yapabilme yeteneği,
- Bir sistemin harici bir aktivite veya aktivite üretme yeteneği (Max Planck),
- Bir atomun çekirdeğinde bir proton ve bir nötron arasında ısı, mekanik hareket veya bağlanma enerjisi şeklinde ortaya çıkan fiziksel niceliktir.

Enerji farklı formlarda bulunur (kimyasal, mekanik, termal, elektrik vb.) Şekil 1, enerjinin genel türlerini göstermektedir (Elektrik Rehberiniz, 2013; Vikipedi, 2022).



Şekil 1. Enerji Türleri (Vikipedi, 2022)

Enerji kaynakları dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil (primer) enerji ve ikincil enerji kaynakları olarak iki türden oluşmaktadır. Birincil enerji, herhangi bir değişme ve dönüşüme uğramayan bir enerji şeklidir. Birincil enerji kavramı, yenilenemeyen enerji ve yenilenebilir enerjiyi içerir ve kaynakları şöyle sıralanabilir: kömür, petrol, doğal gaz, hidro, nükleer enerji, dalga enerjisi, biyokütle, güneş ve rüzgardır. İkincil enerji ise, enerjinin doğadaki halinin (Birincil enerji) çeşitli enerji santralleri veya teknolojilerle dönüştürülerek elde edilen enerjidir. İkincil enerji kaynakları ise; benzin, elektrik, motorin, kok kömürü, petrokok, ikincil kömür, hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi enerji kaynaklarıdır. Şekil 2’de enerji kaynaklarının genel sınıflandırması göstermektedir (Şenel ve Koç 2013; Yağlı ve diğ. 2018).

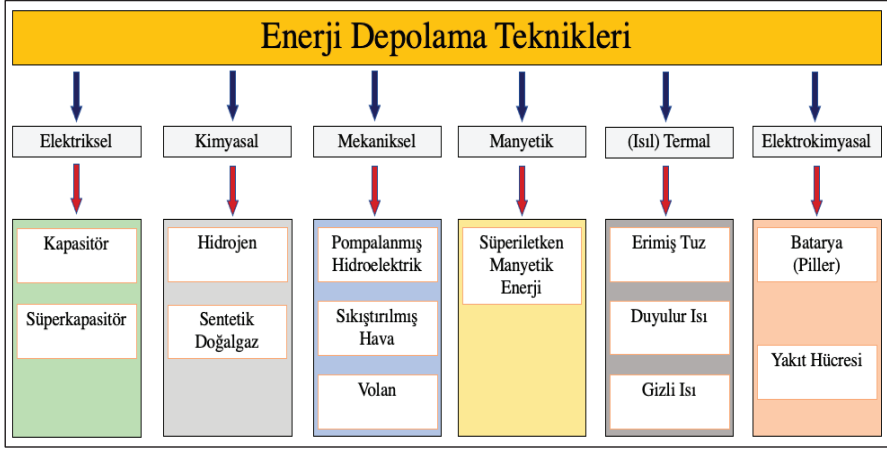


Şekil 2. Enerji Kaynaklarının Genel Sınıflandırması (Yağlı ve diğ. 2018)

Günümüzde insanlar gıda, temiz su, ulaşım, ısınma ve soğutma gibi temel ihtiyaçlarını karşılamak için farklı enerji türlerine ihtiyaç duymaktadır. Birleşmiş Milletler (BM) tahminlerine göre dünya nüfusu 2040 yılında 9,2 milyara ulaşacaktır. Bu durum, 1,9 milyar insana daha enerji sağlamamız gerektiği anlamına gelmektedir (İnan, Akbulut, ve Aslan, 2018; Worldometer, 2022).

Enerji depolama; bir tür enerjinin daha sonra yeniden kullanılmak üzere başka bir türe veya aynı türe depolanması olarak tanımlanan ve aşılması gereken önemli bir sorundur. Enerji depolama fikri uzun yıllara dayanmaktadır. Enerji depolama, maliyetli yükseltmelerden kaçınırken mevcut enerji üretim ve iletim altyapısını optimize etmektedir. Enerji depolama teknolojisinde kullanılan cihazlar, yenilenebilir enerji kaynaklarından meydana gelen büyük güç dalgalanmalarının şebeke üstündeki etkilerini önleyebilmektedir. Bu nedenle, enerji depolama teknolojisi güç kalitesini ve şebeke güvenilirliğini artırabilmektedir (Dānilā ve Lucache 2010; Emeksiz ve Kara 2022; Lott ve diğ. 2014; Özdoğan 2010; Reddy ve diğ. 2020).

Genel enerji depolama teknikleri. Kimyasal, elektrokimyasal, elektrik, mekanik, termal ve manyetik enerji depolama teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın detayları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Enerji Depolama Tekniklerinin Sınıflandırılması (Lott ve diğ. 2014)

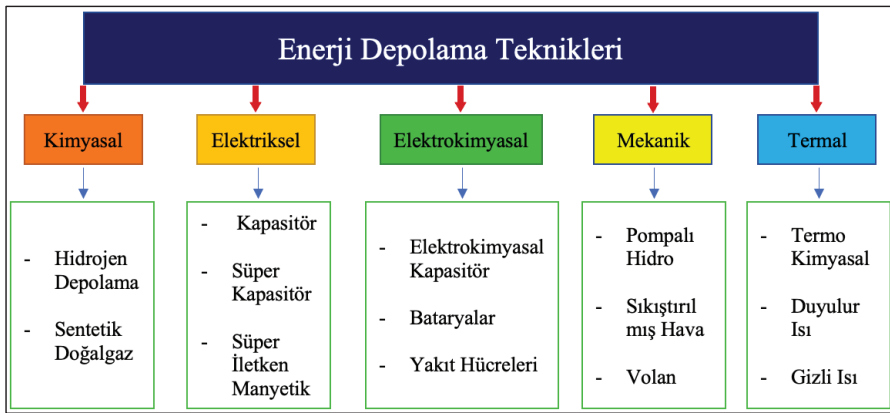
Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostudur, bu nedenle enerji üretiminde kullanımları sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Dolayısıyla, enerji depolama teknolojisine duyulan ihtiyaç tamamen yenilenebilir enerjiye geçiş, modern enerji sistemleri için arz güvenliği ve istikrarının sağlanması, üretim sırasında enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmak, maliyetlerin en aza indirilmesi ve enerjinin iletimi ve dağıtım sorunları azaltmasında enerji depolama teknolojisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, tüketicilerin enerji ihtiyaçlarını her koşulda başarılı bir şekilde karşılayabilmek için enerji depolama teknolojisi büyük önem taşımaktadır (Hadjipaschalis, Poullikkas, ve Efthimiou, 2009; Sarı, 2011; Whittingham, 2012).

Enerji depolama teknolojisinin avantajları ve hem de dezavantajları bulunmaktadır. Enerji depolaması, şarj/deşarj, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, maliyet, yanıt süresi ve kullanım ömrü gibi çeşitli sorunlar nedeniyle zorluklarla karşı karşıya bulunmaktadır (Lelebicioğlu, 2020). Bu çalışmanın amacı, temel enerji depolama sistemlerini incelemek ve bu teknolojilerin çalışma prensipleri incelenmiştir.

2. Enerji Depolama Teknolojileri (EDT)

Enerji tüketildiğinde, bir enerji türünden diğer bir enerji türüne dönüşmektedir. Enerji depolama teknolojileri, enerjinin daha sonra kullanılabilmesi için depolandığı ve sistemlerdir. Bu teknolojiler, enerjinin çeşitli kaynaklardan üretildiği farklı zamanlarda kullanılabilmesini sağlar. Enerji depolamasında, enerjiyi herhangi bir zamanda kullanılabilir şekilde hazırda olması beklenmektedir (Çaliker ve Özdemir, 2013).

Enerji birçok farklı biçimde depolanabilmektedir; mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve termal depolanma çeşitleridir. Şekil 4'te yaygın olarak kullanılan enerji depolama teknolojileri enerji formuna göre gruplandırılmıştır. Burada verilen sınıflandırmalardan farklı olarak enerji girdisi (elektrik, mekanik veya termik), enerji çıkışı (ısı enerjisi, sıvı-yakıt veya gaz-yakıt) veya enerji dönüşüm süreci (güç-güç, güç-gaza, güç-sıvı ve güç-ısı) tip sınıflandırması da mümkündür. Uygulama şekline, gerekli gereksinimlere ve ekonomik koşullara bağlı olarak farklı depolama alternatifleri bulunmaktadır (Mazman, 2018; Mazman ve Yılmaz, 2019; Sara Enerji, 2021; TÜBA, 2020). Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Şekil 4. Kullanılan Enerji Depolama Teknolojileri (Mazman ve Yılmaz, 2019)

2.1 Mekaniksel EDT

Bir malzeme sistemine kuvvet uygulamak ve bu kuvvet tarafından üretilen enerjiyi depolamak için kullanılabilir iki temel sistem vardır. Birincisi potansiyel enerjideki değişimlerle, ikincisi ise kinetik enerji olarak bilinen bir kütlenin hareketiyle üretilen enerjiyle ilgilidir. Bu iki enerji birbirine veya ısıya veya elektriğe dönüştürülebilir (Falk, Herrmann, ve Schmid, 1983; Landry ve Gagnon, 2015).

2.1.1 Volan

Basit bir volan kullanımı, yüzyıllardır uygulanan kinetik enerjiyi depolamanın bilinen en eski yöntemlerindedir. Bir volan, yükü dengelemek için yük talebinin arttığı dönemlerde bu enerjiyi yüke aktarmakta ve yükün titreştiği yüksek tahrik kuvveti dönemlerinde mekanik bir sistemdeki fazla enerjiyi yakalamaktadır. Bu, özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine dönüştürüldüğü mekanik tahrik sistemleri için ideal çözümdür. Bir volan, mekanik bir pil görevi görmektedir.

Yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin ve düşük kayıplı yatakların geliştirilmesi nedeniyle günümüzde önemli bir teknoloji haline gelmiştir (Bolund, Bernhoff, ve Leijon, 2007; Yavuz, 2011).

Volan çalışma sistemi, hızlı dönen bir rotorun ataletini depolamaktadır. Sistemden enerji çekildikçe, enerjinin korunumu yasasına göre yavaşlamaktadır. Tersine, sistem uyarıldığında hız artmaktadır. Dönme hızı yaklaşık 75.000 rpm'ye ulaşmaktadır (Willis ve Scott, 2018).

Volan çarkı çelikten ziyade kompozitten, kompozit dönme kuvvetlerinde karşı daha dirençlidir. Volan, hava direncini indirmek için boşaltılmış bir vakum ortamında kapalı bir alanda bulunmaktadır. Volana gömülü mıknatıslar, dönüş sırasında bobin üzerinde uçmaktadır. Volan üzerindeki bu mıknatıslar, dönerken bobinde bir voltaj indüklemektedir. Bu, volanın dönme enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Bryan ve Andrews, 2004). Tablo 1'de Volan enerji depolama yöntemlerinin teknik özellikleri gösterilmiştir.

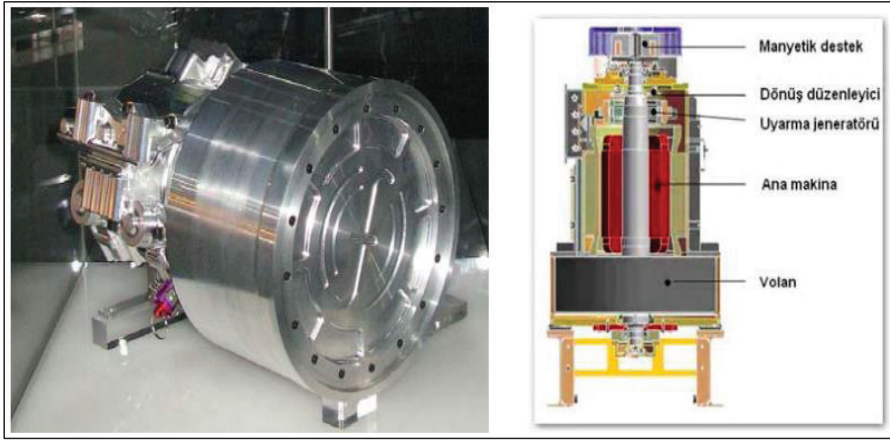
Tablo 1. Volanın Depolama Teknik Özellikleri (Açıkgöz, 2019)

Birim Hacimdeki Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	20 –80
Güç Kapasitesi (MW)	0.1 – 20
Kalıcı Enerji Depolama Süresi*	saniye – dakika
Ömrü (Yıl)	15 – 20
Deşarj Süresi*	1 saniye – 15 dakika
Döngü Sayısı (Döngü)	~20000 – 10000000
Verimliliği (%)	~89 – 95
Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Yeni Ticarileşmiş/Uygulanamaz

Volanda depolanan enerji denklem (1) ile ifade edilir.

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

Denklemde J: Enerji (J veya Wh), I: Atalet momenti (kg.m²) ve ω : Açısal hız (rad/s)'dir (Sahay & Dwivedi, 2009). Gelişmiş yüksek hızlı volan sistemi Şekil 5'te gösterilmektedir.

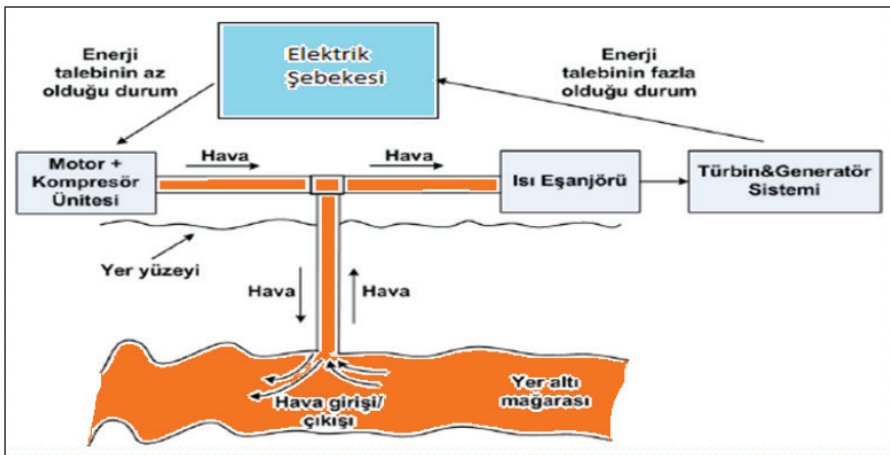


Şekil 5. Gelişmiş yüksek hızlı volan sistemi (Özdemir ve Hadra, 2016)

2.1.2 Pompalı Hidroelektrik Depolama (PHD)

19. yüzyıldan beri, hava enerjisi maden motorlu lokomotiflere ve bir zamanlar savaş gemisi torpidolarına güç sağlamaktadır. Hava enerjisi ve bu enerjiden yararlanma yeni bir fikir değildir (Schaber, Mazza, ve Hammerschlag, 2004).

Basıncı hava sistemleri, yüksek basınçta bir tanka hava zorlamak ve bir kompresör yardımıyla enerji sağlamak amacıyla elektrik enerjisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Daha sonra, bu basınçlı hava, ihtiyaç duyulduğunda bir piston veya türbin vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülerek güç üretilmektedir. Bu süreç, havanın enerji depolama ve dönüşümü için kullanılan bir sistemdir ve birçok endüstriyel ve uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6. PHD akış diyagramı (Kocaman, 2013)

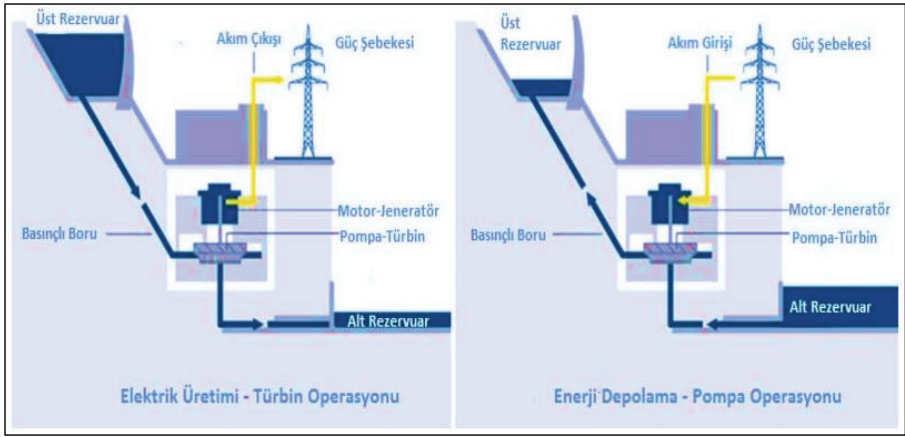
(PHD) sistemleri, basınçlı havayı yer altı su katmanları, terkedilmiş tuz ve diğer maden yatakları gibi jeolojik yapılarında depolamaktadır (Şekil 6). Bu sistemler oldukça maliyetlidir. PHD sistemlerinde pratik olarak en düşük güç 10 MW ve en yüksek enerji depolama kapasitesi 100 MW/saat olarak ifade edilmektedir. PHD teknolojisi, basınçlı su depolama teknolojilerine kıyasla daha yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptir (Parrilla, Gonzalez, ve Aguado, 2023; Sahay ve Dwivedi, 2009).

Hidro enerji depolama sistemleri, potansiyel enerji kullanımı kavramına dayanmaktadır. Yoğun saatler dışında elektrik, suyu yüksek tepelere ve dağ rezervuarlarına pompalamak için kullanılmaktadır (Şekil 7 ve 8). Yoğun zamanlarda, su borulardan hidro jeneratöre yönlendirilmektedir. Bu tür bir depolama tipik olarak yoğun talebi karşılamak için kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerin en büyük dezavantajı, ekosisteme zarar veren büyük bir rezervuar oluşturmalarıdır. Diğer bir dezavantaj, en az iki su deposuna ihtiyaç duyulmasıdır (Sahay ve Dwivedi, 2009).



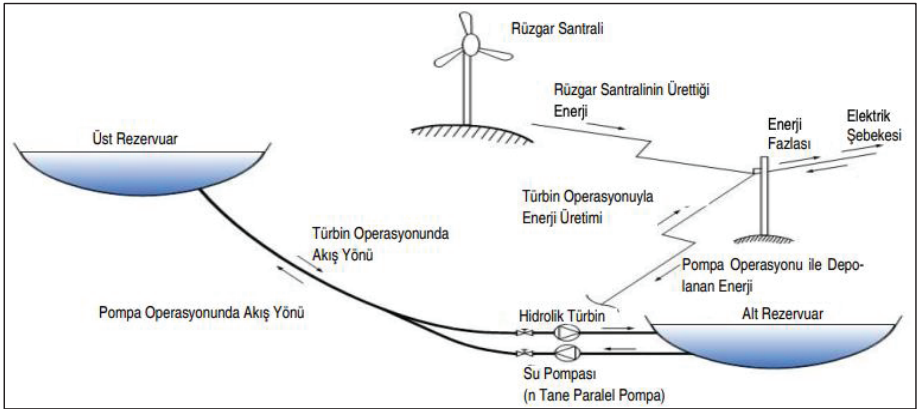
Şekil 7. Basınçlı su depolama şeması (Parrilla ve diğ., 2023)

Pompajlı depolamalı enerji santrallerinde pompa ve türbin elemanlarının tersinir olarak kullanılması büyük avantajlar sunmaktadır. Tersinir pompa-türbin ile sistem, yoğun zamanlarda bir türbin gibi çalışmakta ve bir üst rezervuara su pompalayarak depolanabilecek enerjiyi üretmektedir. Şekil 8'de, pompa çalışması sırasında şebekeden güç çekerek ve suyu alt rezervuardan üst rezervuara depolayarak ve türbin çalışması sırasında suyu üst rezervuardan alt rezervuara indirerek enerji dönüşümünü göstermektedir (Aras, 2017; Özarslan, 2012).

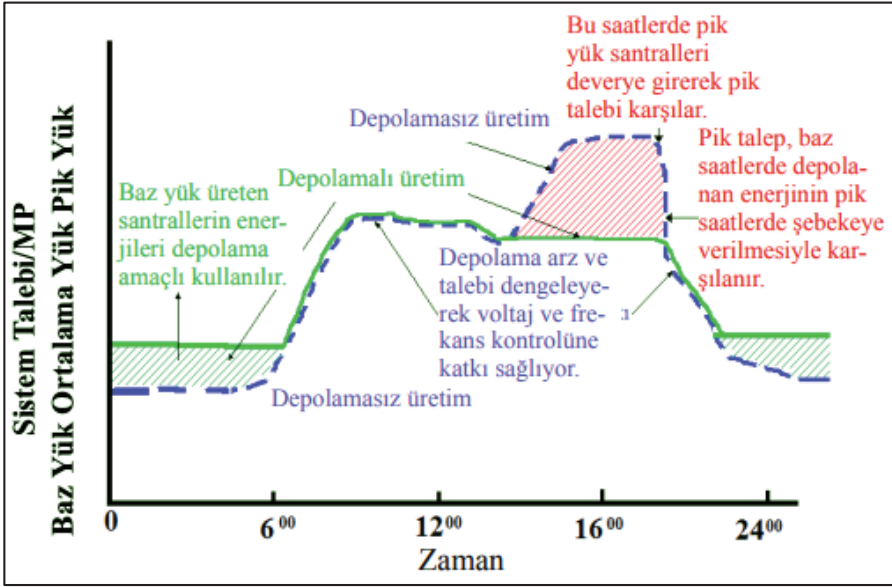


Şekil 8. Pompaj Depolamalı HES Şematığı (Aras, 2017)

Pompaj depolamalı enerji santralleri, yenilenebilir enerji santrallerine entegre edilebilmektedir. Rüzgar enerjisi ve pompalı depolama sistemlerinin entegrasyonunun dünya çapında örnekleri bulunmaktadır. Şekil 9'da bir rüzgar çiftliği ve bir pompalı depolama sisteminin entegre çalışma prensibi gösterilmektedir (San Martín ve diğ. 2011). PHD sistemler için yük profili Şekil 10'da verilmiştir



Şekil 9. Rüzgar-Pompaj Depolamalı HES Şematığı (San Martín ve diğ., 2011)



Şekil 10. PHD Sistemler İçin Yük Profili .(Tanrıöven, 2013)

2.2 Kimyasal EDT

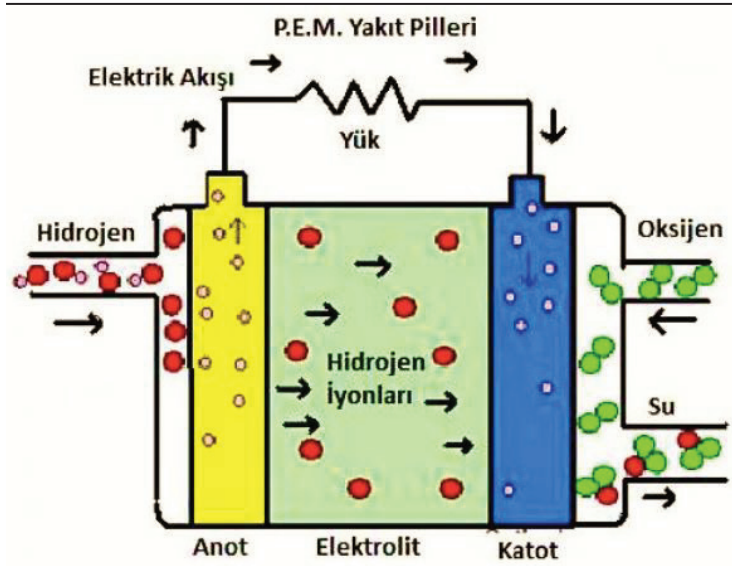
Atomların kimyasal bağlarında depolanan ve yalnızca kimyasal bir ortamda serbest bırakıldığında görülebilen moleküler reaksiyonlara kimyasal enerji denilmektedir. Kimyasal enerji açığa çıktığında madde tamamen farklı bir maddeye dönüşmektedir (Miller ve diğ. 2021). Kimyasal yakıtlar yaygın olarak enerji üretimi, enerji taşıma ve enerji depolama için kullanılmaktadır. En çok kullanılan kimyasal yakıtlar; motorin, işlenmiş kömür, doğal gaz, benzin, LPG, hidrojen, etanol, bütan, propan, biyodizeldir. Bu kimyasallar, ısı motorları tarafından itme gücü olarak kullanıldığında, sıvıya dönüşmekte ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Elektrik üretimi için depolanan bu kimyasal enerji doğrudan elektronlar transfer reaksiyonları ile serbest bırakılmaktadır (Schlögl, 2017).

2.3 Hidrojen Depolama

Hidrojen yenilenebilir bir yakıt olup bol bulunan, temiz ve enerji taşıyan bir maddedir. Hidrojen, ancak yanma reaksiyonundan sonra su buharı salmaktadır, diğer hidrokarbonlardan daha yüksek olan 142 kJ/kg enerjiye sahiptir (Niaz, Manzoor, ve Pandith, 2015).

Hidrojen depolama yöntemleri; fiziksel (gaz ve sıvı) depolama ve malzeme depolama olarak iki türe ayrılmaktadır. Gaz depolama genellikle 350 ile 700 bar arası yüksek basınçlı tanklarda yapılabilmektedir. Sıvı hidrojenin depolanması,

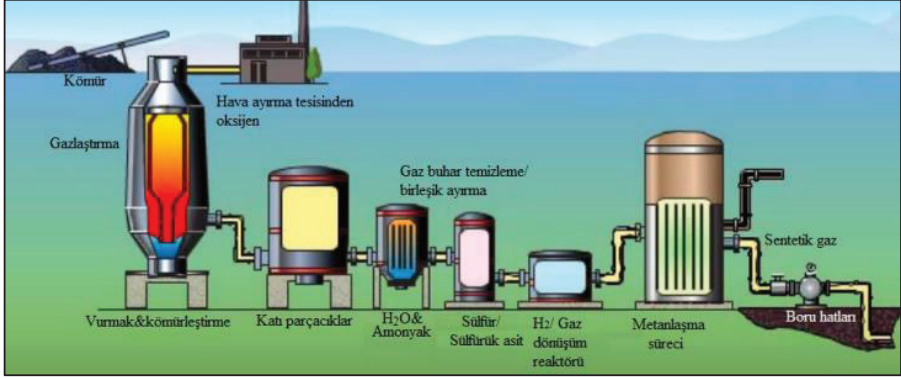
kaynama sıcaklığından (1 atm) -252.8°C dolayla kriyojenik bir soğutma işlemi gerektirmektedir. Enerji depolama sisteminde hidrojen kapasitesi çok yüksektir. Yapılan hesaplamalara göre, 1 kilogram hidrojenin yaklaşık 33 kWh enerji içerdiğini göstermektedir. Şekil 11'de hidrojen hücresinin yapısını göstermektedir. Hidrojen; petrol ithalatını azaltarak enerji güvenliğini iyileştirerek şehirleri, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak sürdürülebilirliği sağlamak, kirliliği azaltmak ve kullanım noktasında sıfıra yakın karbon, hidrokarbon vb. üreterek hava kalitesini iyileştirmek gibi birçok avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrojen dünya çapında tanınan bir temiz enerji kaynağıdır (Niaz ve diğ. 2015; Nowotny ve Veziroglu 2011).



Şekil 11. Hidrojen pil yapısı (Deneysan, 2020)

2.3.1 Sentez Gazı Depolama

En yaygın fosil kaynaklı yakıt doğal gazdır ve esas olarak Metan'dan (CH_4) oluşmaktadır. Biyogaz, sentez gazı, biyosentetik doğal gazı, çöp gazı ve diğer gaz yakıtlardır. Biyogaz, ayrılmış organik maddeden oluşmakta ve metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) içermektedir. Düzenli depolama alanlarının biyogazın bileşimine benzemektedir. Katı besinlerin gazlaştırma yoluyla kısmen dönüştürülmesi sentetik doğal gazı ifade etmektedir. Üretilen sentetik doğal gaz basınçlı tanklarda, yer altında depolanabilmekte veya doğrudan gaz şebekesine verilebilmektedir. Sentez gazı hem karbondioksit (CO_2) açısından zengin hem de elektrik açısından zengin yerlerde tercih edilmektedir (Chandel ve Williams, 2009; Zwart, Boerrigter, Deurwaarder, Van der Meijden, ve Van Paasen, 2006). Sentetik doğal gazın üretim prensibi Şekil 12'de verilmiştir.



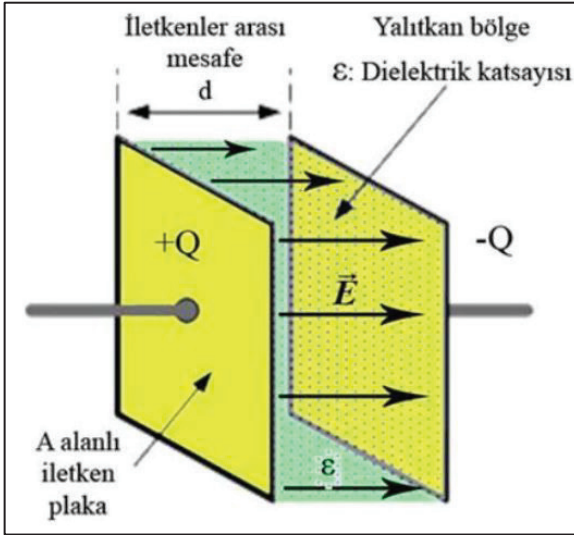
Şekil 12. Sentetik Doğal Gazın Üretimi (Kocaman, 2021)

2.3 Elektrik EDT

Elektrik enerjisi depolama teknolojisi; kapasitörler, süper kapasitörler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Kapasitörler genel olarak yüksek akım koşullarında kullanılabilirler ancak çok az kapasite üretirler, bu nedenle yalnızca çok kısa süreler için kullanılabilirler (Kocaman, 2021).

2.3.1 Kapasitör (Kondansatör)

Kondansatörler elektriği depolamanın en doğru yoludur. Şekil 13'te bir kapasitörün iç yapısı gösterilmiştir. Genel olarak yapısı, dielektrik adı verilen iletken

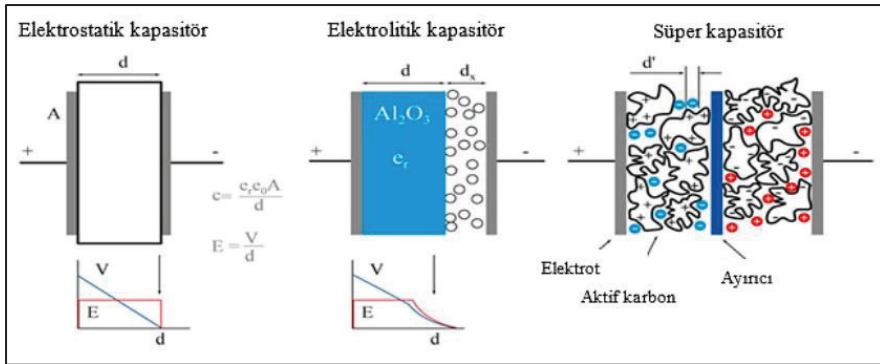


Şekil 13. Kapasitör yapısı (Kocaman, 2021)

olmayan bir katmanla ayrılmış iki metal plakadan oluşmaktadır. Bu plakalar DC kaynağından gelen akımla yüklendiğinde, diğer plakada zıt işaretli bir yük indüklenmektedir. Metalize veya metalize elektronların yüzeyinde enerji depolamaktadırlar. Kondansatörler, çok düşük enerji yoğunlukları nedeniyle büyük akımları taşıyabilirler, ancak bu sadece çok kısa süreler için kullanılmaktadır (Kocaman, 2021; Zakeri ve Syri, 2015).

2.3.2 Süper Kapasitör

Çift katmanlı kapasitörler, geleneksel kapasitörler ile elektronikte kullanılan genel amaçlı piller arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Şekil 14'te bir süper kapasitörün iç yapısı gösterilmiştir. Süper kapasitörler, ince bir moleküler yapıya sahip elektrolit tabakası kullanılmakta ve çok geniş bir yüzey alanına sahip aktif karbon yapısına sahiptir. Pillere göre çok daha verimli şarj ve deşarj edilebilirler. Bu tür kapasitörler enerji depolama kapasitesi, geleneksel kapasitörlerin kapasitesinden önemli ölçüde daha yüksektir (Chen ve diğ. 2009; STM ThinkTech 2022).



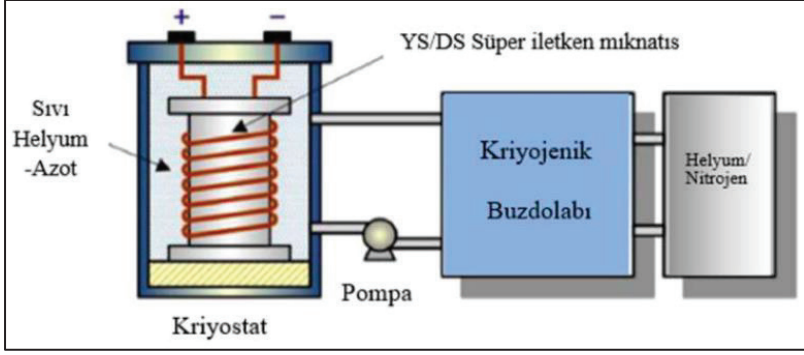
Şekil 14. Kapasitörlerin yapıları (Arslan, 2012)

Elektrostatik elektrokimyasal pil sistemlerinden farklılık gösteren süper kapasitör enerji depolamasıdır. Grafen süper kapasitörlerin çok daha hafif ve kullanımlarının daha kolay olduğuna inanılmaktadır. Lityum-iyon piller aynı enerji depolama kapasitesine sahiptir ancak on binlerce kez yeniden şarj edilebilmektedir (Petrovan, 2022).

2.3.3 Süper İletken Manyetik (SİM)

Süper iletken manyetik (SİM) enerji depolama sistemleri elektrodinamik ilkesine göre çalışmaktadır. Enerji, süper iletkenliğin kritik sıcaklığının altında tutulan doğru akım tarafından oluşturulan bir manyetik alanda süper iletken bir bobinde depolanmaktadır. Kriyojenik olarak soğutulmuş süper iletken malzeme ve depolanan enerji, bobini kırarak şebekeye geri salınabilmektedir (Root, 2011; Zake-

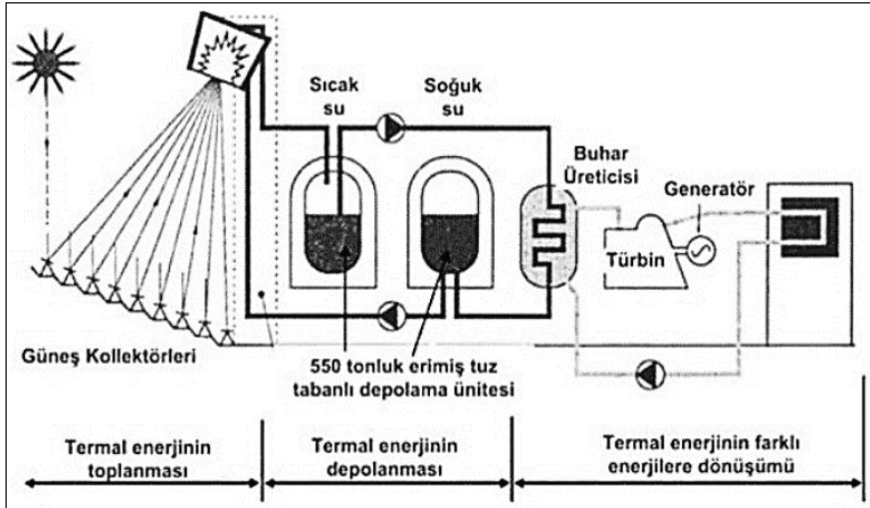
ri ve Syri, 2015). Süper iletken manyetik enerji depolama sisteminin yapısal bir resmi Şekil 15'ta gösterilmektedir.



Şekil 15. SİM enerji depolama sistemi ayrıntılı yapısal görünüm (Molina, 2010)

2.4 Termal EDT

Sıcaklık, konum veya güç gibi diğer koşullar altında daha fazla kullanım için bir sıcaklıkta bir depolama ortamında ısıyı veya soğluğu depolamaya uygun sistemlerdir. Termal EDT; sıcak su temini, ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi gibi endüstriyel uygulamalar ve konut için kullanılabilir. Termal EDT; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı olmak üzere üç farklı kategoride ayrılabilir (Abedin ve Rosen, 2011; Emeksiz ve Kara, 2022). Termal enerji depolama sistemlerinin şeması Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Örnek termal EDT şematığı (Emeksiz ve Kara, 2022)

2.4.1 Termokimyasal Depolama

Termokimyasal enerji depolama, yüksek verimli ve temiz enerji sistemleri sağlayabilen gelişmiş bir termal enerji depolama teknolojisidir. Termokimyasal, yüksek enerji yoğunluklarında depolama potansiyeli olan yeni bir yöntemdir. Bu nedenle, alan sınırlı olduğunda, termokimyasal TED'ler, gerekli kompakt termal enerji depolamasını elde etmek için en büyük potansiyele sahiptir (Abedin ve Rosen 2011; Pflieger ve diğ. 2015).

2.4.2 Duyulur Isı Depolama

Havanın kuru termometre sıcaklığını artırmak için (özgül nemin sabit olması koşuluyla) ısı dış ortama yayılır, bu ısıya duyulur ısı denir. Duyulur ısı depolama işleminde sıcaklık değişimlerine neden olmaktadır. Özgül ısı kapasitesi, kullanılan ortamın kütlesi ile birlikte depolama sisteminin kapasitesini belirlemektedir. Depolama ortamı sıvı (örnek; su, erimiş tuz veya kızgın yağ), katı (örnek; taş, beton, metal veya toprak) veya içi katı dolu sıvı gibi çeşitli aşamalarda olabilmektedir (TÜBA, 2020).

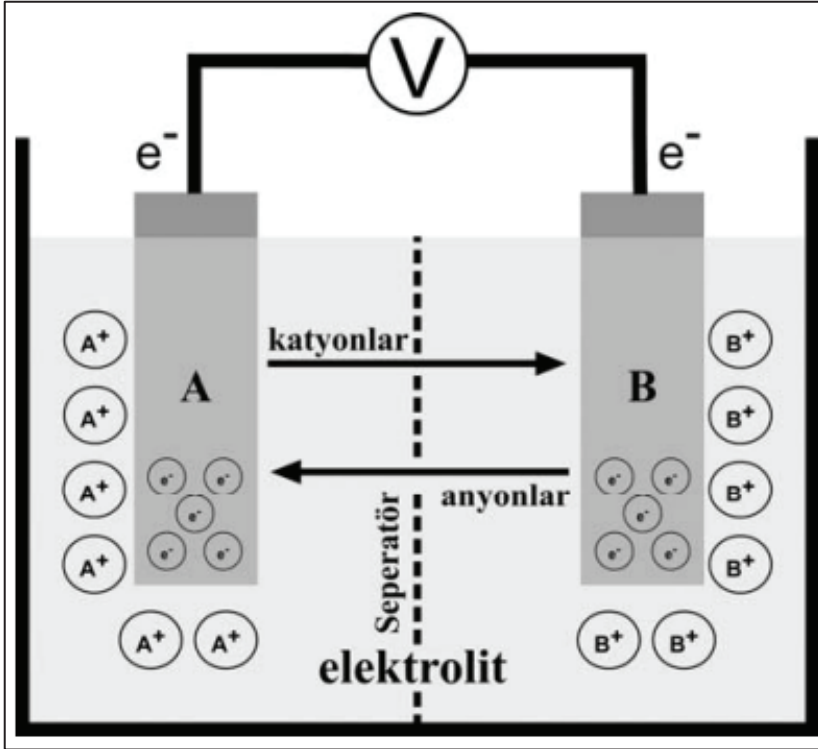
2.4.3 Gizli Isı Depolama

Bir maddenin faz değişimi sırasında ortamdaki emdiği veya ortamdaki saldıdığı ısıdır. Gizli ısı sıcaklık değişimleri ile tespit edilmez. Gizli ısı depolama, bir ısı depolama ortamı oluşturmak için faz değiştiren malzemeleri kullanır. Isıl iletkenlik gizli ısı sistemlerinde önemli bir araçtır. Ayrıca yoğunluk ve entalpi, hacimsel depolama kapasitesini belirlediği için faz geçişlerinde önemlidir. Gizli ısı depolama sistemlerinde organik (parafinler), inorganik ve tuz hidratları kullanılabilir. Gizli ısı enerjisi depolamanın bir yöntemi, buzda enerji depolamadır. Bu işlem, bir binanın soğutma yükünü daha sonra kullanmak üzere depolamak için su ve buzun faz değişimi sırasında üretilen termal enerjiyi kullanmak için kullanılır. Temel amaç, kapalı mekanları soğutmak için kullanılan klimaların enerji tüketim maliyetlerini azaltmaktır (TÜBA, 2020).

2.5 Elektrokimyasal EDT

Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için elektrokimyasal enerji kaynakları kullanılır, bu dönüştürme işlemi sırasında en az iki genel kimyasal reaksiyon sürecinden geçmektedir. Elektrokimyasal enerji kaynakları, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Scrosati ve diğ. 2013).

Genel olarak basit pil sistemi bir elektrokimyasal (galvanik) hücreden oluşmaktadır. Hücreler, elektrik enerjisinin elektrokimyasal reaksiyona neden olmasına veya kimyasal reaksiyon sonucunda elektrik enerjisi oluşmasına göre adlandırılmaktadır. İlk durumda elektrolitik hücrelerden ve ikinci durumda galvanik hücrelerden bahsetmekteyiz (Reddy ve diğ. 2020). Şekil 17'de basit pil şeması verilmiştir.



Şekil 17. Basit pil sistemi (Reddy ve diğ. 2020)

Bu hücre tipik olarak 0,5 ile 5V arasında değişen nispeten düşük bir voltaj sağlar. Daha yüksek voltaj değerleri için hücreler seri bağlanır. Büyük kapasite için paralel bağlanırlar. Her iki durumda da bu hücrelerin birbirine bağlanmasıyla oluşan yapıya 'batarya' adı verilir (Daniel ve Besenhard, 2012).

En basit haliyle, bir pil, iyonik olarak iletken, elektriksel olarak yalıtkan bir elektrolit ile ayrılmış, biri pozitif diğeri negatif olan iki elektrottan oluşur. Bu elektrolit sıvısı bir sıvı, bir iyonomer polimer veya gözenekli bir matris içinde emprenye edilmiş bir katı olabilir. Bazı piller yeniden şarj edilerek birden çok kez kullanılabilir. Diğerleri yalnızca bir kez boşaltılabilir. Boşaldıktan sonra kullanılmak üzere tasarlanmış pillere "birincil piller" denir. "İkincil pil", şarj edilebilir bir pildir (Scrosati ve diğ. 2013).

Elektrokimyasal depolama teknolojisinin iki ana alanı vardır. Bunlar; elektrokimyasal hücreler ve elektrokimyasal kapasitörlerdir. Elektrokimyasal depolama sistemleri tasarım, yapısal özellikler ve kimyasal reaksiyon türü bakımından farklılık göstermektedir. Elektrokimyasal piller ve hücreler çalışma prensibine göre dört kategoriye ayrılabilir. Birincil hücreler veya piller, ikincil hücreler veya piller, yedek piller ve yakıt hücreleridir. Ayrıca pillerin üretiminde kullanılan kimyasal-

ların türüne göre de sınıflandırılmaktadırlar (Gotham, Nderitu, ve Preckel, 2013; Güngör ve Efe, 2021).

• **Çalışma Prensibine Göre Piller :**

- Birincil piller,
- İkincil piller,
- Yedek piller,
- Yakıt pilleri (Güngör ve Efe, 2021).

• **Kullanılan Kimyasalın Çeşidine Göre Piller**

- Kurşun Asit Piller,
- Sodyum İyon Piller,
- Lityum Sülfür Piller,
- NanoBolt Lityum Tungsten Piller,
- Redox Akım Pilleri,
- Alüminyum Grafit Piller,
- Lityum İyon Piller,
- Biyoelektrokimyasal Piller,
- Organosilikon Elektrolit Piller,
- Katı Hal Pilleri,
- Nikel Kadmiyum Piller,
- Altın Nanokablolu Jel Elektrolit Piller (Güngör ve Efe, 2021).

3. Enerji Depolama Avantajları

- Enerji üretimi için kullanılan sistemlerin operasyonel verimliliğini, dayanıklılığını ve esnekliğini sağlayarak enerji sürdürülebilirliğini artırmak,
- Enerji talebi ve arzı arasındaki uyumsuzluğu azaltmak,
- Şebeke gerilimi ve frekans regülasyonu sağlamak,
- Kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından her zaman enerji üretememe sorunu, enerji depolama teknolojisi ile hafifletilebilir (Güneş enerji ve rüzgar enerji gibi),
- Enerji santrallerinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini düşürerek ekonomik olarak katkı sağlamak,
- Güç kalitesini artırmaya yardımcı olmak,
- Bazı enerji depolama teknolojileri, atık enerji sisteme geri döndürüldüğü için enerji üretim sistemlerinin verimliliğini artırarak yakıt tüketimini azaltabilir (Kocaman, 2013).

4. Sonuçlar

Enerji depolama teknolojileri (EDT), çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları ile güç sisteminin verimliliğinin güvenilirliğini ve kalitesini sağlamak için güç şebekesiyle entegre olduğundan dolayı depolama ile ilgili sorunlara bir çözümdür. Enerji depolama sistemleri, geleceğin itici teknolojilerinden biri olan akıllı şebeke kavramını mümkün kılmaktadır. Enerji üretimindeki değişkenliği azaltan enerji depolama, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevre koruma gibi temel enerji konuları, bizi enerji kaynaklarımızı çeşitlendirmeye ve yenilenebilir enerji kullanımımızı artırmaya itmektedir. Yenilenebilir kaynaklardaki kısa ve uzun vadeli dalgalanmaların neden olduğu enerji/üretim değişkenliği, birkaç önemli ölçüm gerektirmektedir. Kolay yönetilebilirliği, kontrol edilebilirliği, öngörülebilirliği ve esnekliği enerji depolamayı şebeke yanıt verme yeteneğini iyileştirmek için gerekli kılmaktadır. Hayatımızın her alanına nüfuz eden piller ve benzeri enerji depolama sistemleri, teknolojinin geleceğini iyileştirecek araştırmaların konusu ve gelişmeye en açık alanlardan biridir. Bu çalışmayla birlikte enerji depolama ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar ve standartlar ele alınmış ve literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Sonuç olarak yapılan araştırma neticesinde en yaygın olarak elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri kullanıldığı görülmüştür.

Kaynakça

- Abedin, A. H. (2011). A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. *The Open Renewable Energy Journal*, 4(1), 42–46. Doi: <https://doi.org/10.2174/1876387101004010042>
- Açıkgöz, İsmail. Cem. (2019). *Volan ve lityum-iyon batarya enerji depolama sistemlerinin kıyaslanması ve hibrit enerji depolama sisteminin farklı yük profilleri üzerinde performans analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi (Fen Bilimleri Enstitüsü), İstanbul. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=wFyfHcyXZVzh>
- Aras, E. (2017). Importance of pumped storage hydroelectric power plant in Turkey. *Advances in Energy Research*, 5(3), 239–254. Doi: <https://doi.org/10.12989/eri.2018.5.3.239>
- Arslan, A. (2012). *Bazı iletken Polimerlerin Süperkapasitör Uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=La>
- Bolund, B., Bernhoff, H., ve Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235–258. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.004>

- Bryan, B. P., ve Andrews, J. A. (2004). *Advence in Flywell Energy Storages Systems*. Tezas.
- Çaliker, A., ve Özdemir, E. (2013). Modern enerji depolama sistemleri ve kullanım alanları. *V. Energy Efficiency And Quality Symposium (5'inci Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu)*. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/0a55200ff16175a_ek.pdf
- Chandel, M., ve Williams, E. (2009). Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental İmplications, and Economics. *Climate Change Policy Partnership*. Erişim adresi: <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/natgas-paper.pdf>
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., ve Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- Daniel, C., ve Besenhard, J. O. (2012). *Handbook of battery materials*. John Wiley & Sons. Retrieved from http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H142426_v2.pdf
- Dănilă, E., ve Lucache, Dorin. Dumitru. (2010). History of the first energy storage systems. *3rd International Symposium on the History of Electrical Engineering and of Tertiary-Level Engineering Education* (pp. 27-29). Iași: IEEI. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/profile/Elena-Danila-2/271371039.pdf>
- Deneysan. (2020). Bölüm-8 Hidrojen Enerjisi. Erişim adresi: http://deneysan.com/Content/images/documents/es-08_59355631.pdf
- Elektrik Rehberiniz. (2013). Elektrik Enerjisi Nedir? Erişim adresi: <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/elektrik-enerjisi-nedir-5035/>
- Emeksiz, C., ve Kara, B. (2022). Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6(2), 134-142. Erişim adresi: <https://dergi-park.org.tr/en/pub/ijmsit/issue/73364/1192595>
- Falk, G., Herrmann, F., ve Schmid, G. Bruno. (1983). Energy Forms or Energy Carriers? *American Journal of Physics*, 51(12), 1074-1077. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.13340>
- Gotham, D. J., Nderitu, D. G., ve Preckel, P. V. (2013). Utility Scale Energy Storage Systems. Erişim adresi: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:168571077>

- Güngör, Z. A., ve Efe, Ş. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 947–955. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.31590/ejosat.1048673>
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., ve Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1513–1522. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.028>
- İnan, İ., Akbulut, İ., ve Aslan, E. (2018). Enerji Sorununun Çözümünde Yenilenebilir ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri ve Önemi. *Türk Dünyası Araştırmaları*, 120(237), 11–40. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tda/issue/58714/847773>
- Karakoç, H., Karakoç, N., Erbay, B., ve Aras, H. (2012). *Enerji Analizi*. (Y. Ergün & M. Tanışlı,Eds.) (1st ed.). Eskişehir: T. C. Anadolu Üniversitesi.
- Kocaman, B. (2013). Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 119–127. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/en/pub/bitlisfen/issue/3702/49005>
- Kocaman, B. (2021). *Enerji Depolama Teknolojileri*. Ankara: İksad Yayınevi. Erişim adresi <https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/12/Enerji-Depolama>.
- Landry, M., ve Gagnon, Y. (2015). Energy Storage: Technology Applications and Policy Options. *Energy Procedia*, 79, 315–320. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.494>
- Leblebicioğlu. (2020). Enerji Depolama Nedir? Enerji Depolama Yöntemleri Nelerdir?. Erişim adresi: <https://muhendistan.com/enerji-depolama-nedir>
- Lott, M. C., Kim, S.-I., Tam, C., Houssin, D., ve Gagné, J. F. (2014). Technology Roadmap: Energy Storage. *International Energy Agency (IEA), France*, 1–59. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/80b629ee-597b-4f79-a236>
- Mazman, M. (2018). Enerji depolamada gelecek beklentileri. *11. Uluslararası Enerji Kongresi ve Fuarı*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası.
- Mazman, M., ve Yılmaz, C. H. (2019). Enerji Depolama Çözümleri ve Genel Eğilimler. *Elektrik Mühendisliği Bilimsel Dergisi*, (466), 32–40. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/da7b5bd048a3e14_ek.pdf?dergi=1210
- Mehling, H. (2017). What is energy, and why is it conserved? A review, analysis, and suggested explanation and definition. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/312071321_What_is_energy_and_why_is_it_cons

- Miller, M. A., Petrasch, J., Randhir, K., Rahmatian, N., ve Klausner, J. (2021). Chemical energy storage. *Thermal, mechanical, and hybrid chemical energy storage systems* (pp. 249–292). Elsevier.
- Molina, M. G. (2010). Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power system applications. *Dynamic Modelling*, 300.
- Niaz, S., Manzoor, T., ve Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457–469.
- Nowotny, J., ve Veziroglu, T. N. (2011). Impact of hydrogen on the environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13218–13224.
- Özarslan, A. (2012). Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Büyük Ölçekli Enerji Depolama Yöntemleri. *DEKTMK Türkiye*, 12, 14–16.
- Özdemir, N., ve Hadra, M. (2016). Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Depolama Yöntemleri. *Güç Sistemleri Konferansı, İstanbul, Kasım*.
- Özdoğan, M. (2010). *Bir enerji depolama sisteminin tasarımı ve çalışma parametrelerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir. Erişim adresi: <https://acikerisim.deu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12397/8129/283628.pdf>
- Parrilla, Á. P., Gonzalez, J. M., ve Aguado, J. A. (2023). Mechanical energy storage technologies.
- Petrovan, B. (2022). 10 alternatives to lithium-ion batteries: Which new tech will power the future?. Erişim adresi <https://greenauthority.com/>
- Pfleger, N., Bauer, T., Martin, C., Eck, M., ve Wörner, A. (2015). Thermal energy storage—overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 1487–1497.
- Reddy, M. V, Mauger, A., Julien, C. M., Paoella, A., ve Zaghbi, K. (2020). Brief history of early lithium-battery development. *Materials*, 13(8), 1884.
- Root, M. (2011). *The TAB battery book : an in-depth guide to construction, design, and use*. McGraw-Hill/TAB. Retrieved 13 February 2024 Erişim adresi: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270968450176.bib?lang=en>
- Sahay, K., ve Dwivedi, B. (2009). Development of Techno-Economical Objective Function for Supercapacitors Energy Storage System Implemented in Distribution System. *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, 15(2), 29–33.
- San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., & Eguia, P. (2011).

Energy storage technologies for electric applications. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (Vol. 13, p. 15).

Sara Enerji. (2021). Enerjisi Depolama Sistemleri. Retrieved 13 February 2024, Erişim adresi: <http://www.saraenerji.com.tr/index.php/tr/enerjisi-depolama-sistemleri>

Sarı, A. (2011). Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar. *Kimya Lisans Öğrencileri Araştırma Projesi Çalıştayı*, 20–28.

Schaber, C., Mazza, P., ve Hammerschlag, R. (2004). Utility-scale storage of renewable energy. *The Electricity Journal*, 17(6), 21–29.

Schlögl, R. (2017). Chemical energy storage: Part of a systemic solution. *EPJ Web of Conferences* (Vol. 148, p. 00015). EDP Sciences.

Scrosati, B., Abraham, K. M., van Schalkwijk, W. A., ve Hassoun, J. (2013). *Lithium batteries: advanced technologies and applications*. John Wiley & Sons.

Şenel, Mahmut. Can., ve Koç, E. (2013). Rüzgar Türbinleri Dinamik Davranış Analizi Teorik Boyutsuz Bir Model. 2. *Anadolu Enerji Sempozyumu (2. AES)* (pp. 301–313). Diyarbakır. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/326831490>

STM ThinkTech. (2022). *Enerji Depolama Teknolojilerindeki Son Gelişmeler*. Erişim adresi: <https://thinktech.stm.com.tr>

Tanrıöven, K. (2013). Enerji Depolama Sistemleri ve Yeni Açılımlar. *V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*. Kocaeli: Elektrik Mühendisleri Odası (EMO). Erişim adresi: <https://www.emo.org.tr>

TÜBA. (2020). *TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu*. (İ. Dinçer & Mehmet. Akif. Ezan,Eds.). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net>

Wikipedi. (2022). Enerji Biçimleri. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org>

Whittingham, M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, 100 (Special Centennial Issue), 1518–1534. Doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190170>

Willis, H. L., & Scott, W. G. (2018). *Distributed Power Generation*. (H.L. Willis,Ed.), Distributed power generation: planning and evaluation (1st Edition). Florida: CRC Press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9781315215006>

Worldometer. (2022). World Population Projections. Erişim adresi: <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-projections/>

- Yağlı, H., Koç, A., Koç, Y., & Uđurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Deđerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86–114. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakina/issue/48388/614281>
- Yavuz, B. (2011). *Enerji depolama sistemlerinin modellenmesi ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Erişim adresi: <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/1/7824/0075923.pdf>
- Zakeri, B., ve Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>
- Zwart, R. W. R., Boerrigter, H., Deurwaarder, E. P., Van der Meijden, C. M., ve Van Paasen, S. V. B. (2006). Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Biomass. Development and operation of an integrated bio-SNG system. Non-confidential version.