

ENERJİ DEPOLAMA YAZI DİZİSİ-2

Enerji Depolama Teknolojilerinin Anatomisi: Geleceğin Enerji Altyapısına Giriş

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

gozde.demirsoy@gmail.com

Enerji depolama sistemleri (EDS), yalnızca enerjiyi muhafaza eden yapılar değil, aynı zamanda enerji sistemlerinin esneklik, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik kapasitesini artıran kritik bileşenlerdir. Artan yenilenebilir enerji penetrasyonu, dijitalleşme ve değişen enerji talepleri, enerji depolama teknolojilerinin çeşitlenmesini ve dönüşümünü kaçınılmaz kılmıştır.

Yazı dizimizin ilk bölümünde, söz konusu sistemlerin tarihsel gelişimi, temel kullanım amaçları ve çeşitli sektörlerdeki yeri ele alınmış; avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bu bölümde ise, EDS'lerin teknik altyapısını oluşturan teknolojilere giriş yapılacaktır. Konunun kapsamı oldukça geniş olduğundan bu kısımda kimyasal ve elektriksel sistemlere odaklanılacaktır. Elektrokimyasal, mekanik ve ısı sistemleri ile birlikte enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırılması, SWOT analizi ve teknoloji seçme kriterleri gibi başlıklar, dizinin sonraki bölümlerinde detaylandırılacaktır.

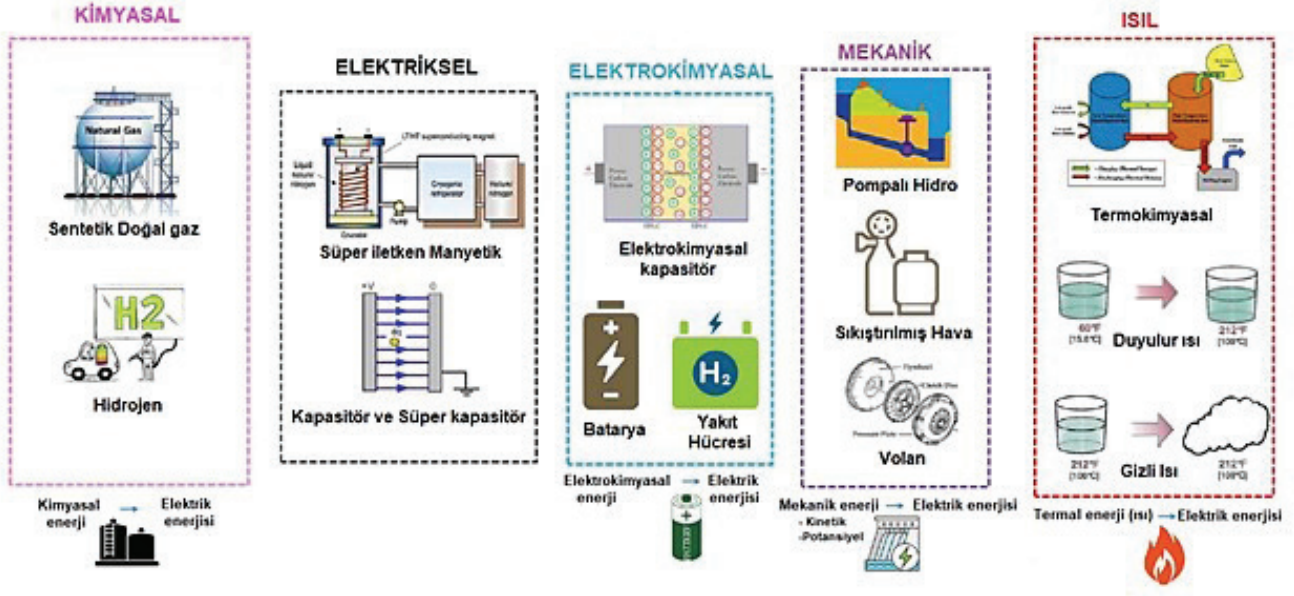
Bu kapsamda, öncelikle enerji depolamanın çok boyutlu doğasına dikkat çekmek gerekmektedir. Şöyle ki, enerji depolama yalnızca elektrik değil; aynı zamanda zaman, esneklik, güvenlik ve sürdürülebilirlik depolamaktır. Bu dönüşümün temelinde ise farklı mühendislik disiplinlerinin kesişiminde gelişen çok boyutlu bir teknoloji mimarisi yer almaktadır.

Dolayısıyla, enerji depolama teknolojileri farklı açılardan sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalardan öne çıkan yaklaşımlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Enerji depolama teknolojileri genel olarak kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekanik ve ısı (termal) enerji depolama teknolojileri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın ayrıntıları Şekil 1'de verilmiştir [2].

Tablo 1. Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırmaları [1]

DEPOLAMA SÜRESİ			GÜÇ			DEPOLANAN ENERJİNİN FORMU					DEPOLAMA YOLU	
Uzun (Haftalık/Aylık)	Orta (Saat/Gün)	Kısa (Saniye/Dakika)	Büyük (GW)	Orta (MW)	Küçük (kW)	Isıl	Elektriksel	Elektrokimyasal	Mekanik	Kimyasal	Doğrudan	Dolaylı
Duyulur ve Gizli Isı	Termokimyasal ve redoks akış pilleri	Süper kapasitör	Pompa hidro	Süper kapasitör	Süper kapasitör	Termokimyasal	Süper iletken manyetik	Elektrokimyasal kapasitör	Pompa hidro	Sentetik doğal gaz	Süper iletken Manyetik	Batarya (Pil)
Pompa hidro	Batarya	Süper iletken manyetik	Sıkıştırılmış hava	Süper iletken manyetik	Volan	Duyulur ısı	Kapasitör	Batarya	Sıkıştırılmış hava	Hidrojen	Kapasitör	Volan
Hidrojen	Pompa hidro	Volan	Kimyasal depolama (hidrojen, büyük ölçekli >100 MW)	Volan	Kurşun asit ve lityum iyon pilleri gibi piller	Gizli ısı	Süper kapasitör	Yakıt hücreleri	Volan		Süper kapasitör	Pompa hidro
	Sıkıştırılmış hava	Batarya		Kurşun asit, Lityum iyon, sodyum sülfür ve akış pilleri gibi piller								Isı
				Hidrojen / sıkıştırılmış hava enerji depolama/ pompa hidro (küçük ölçekli 10 MW < P < 100 MW)								Sıkıştırılmış hava
												Hidrojen



Şekil 1. Depolanan enerjinin formuna göre yapılan sınıflandırma

1. Kimyasal Enerji Depolama Teknolojileri

Kimyasal enerji, atomların kimyasal bağlarında depolanır ve sadece kimyasal bir ortamda bulunduğu görülebilen moleküler reaksiyonlardır. Kimyasal enerji serbest bırakıldığında, madde tamamen farklı bir maddeye dönüşmektedir. Kimyasal yakıtlar, elektrik üretiminde ve enerji taşımacılığında ayrıca da enerji depolamada oldukça fazla kullanılmaktadırlar. En çok tüketilen kimyasal yakıtlar; dizel yakıt, işlenmiş kömür, benzin, doğal gaz, propan, bütan, etanol, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), hidrojen ve biyodizeldir [2].

Bahsi geçen bu kimyasallar serbestçe sıvıya dönüştürülür ve ısı motorları kullanılarak hareket ettirici olarak kullanıldığında mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedirler. Öte yandan, elektrik üretimi için depolanan kimyasal enerji, direkt olarak elektron transfer reaksiyonlarıyla serbest bırakılabilmektedir [2].

1.1. Sentetik Doğalgaz

Doğal gaz, başlıca bileşeni metan (CH_4) olan ve fosil yakıtlar arasında en yaygın kullanılan enerji kaynağıdır. Biyogaz, çöp gazı, sentetik doğal gaz ve biyo-sentetik doğal gaz ise diğer gaz yakıtlarıdır. Biyogaz çürümüş organik maddeler tarafından üretilmekte olup metan ve karbondioksit (CO_2) içermektedir. Depolama sahasının bileşimi biyogaza benzemektedir. Sentetik doğal gaz, genellikle kömür gazlaştırmadan, biyoküt-

leden (atık) veya fazla olan yenilenebilir enerji kullanılarak sentezlenerek elde edilebilmektedir [2].

Sentetik doğal gaz, içerik ve nitelik bakımından doğal gaza benzer özellikler sergileyen alternatif gaz türleri olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte esnek, depolanabilir, taşınabilir ve karbon salınımını azaltma açısından temiz bir yakıttır [3]. Bu sebeplerden ötürü geleceğin yakıtı ve enerji geçişinde önemli bir bileşen olarak görülmektedir [2].

Üretilen sentetik doğal gaz, yer altında basınçlı tanklarda depolanabilmekte veya doğrudan gaz şebekeleri beslenebilmektedir. Sentetik doğal gaz, hem karbondioksitin fazla olduğu yerlerde hem de elektriğin mevcut olduğu yerlerde tercih edilmektedir. Hidrometanasasyon veya katalitik buhar gazlaştırma teknolojisi geleneksel metanasasyondan daha verimli olarak kabul edilmektedir [2].

Elektrik üretimi, sentetik doğal gazın başlıca kullanım alanı olup bu sayede yüksek enerji tüketen bazı sanayi kollarında verimlilik ve sürdürülebilirlik artırılabilir. Ayrıca yanıcı özelliğinden dolayı içten yanmalı motorlarda yakıt olarak da kullanılabilmektedir [3].

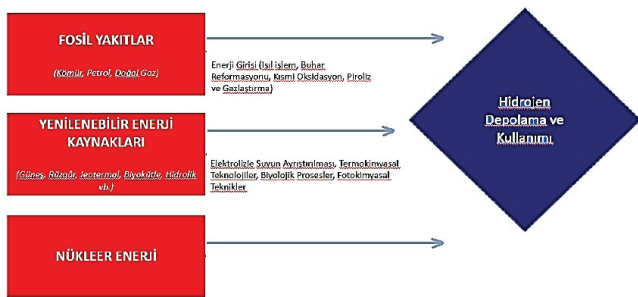
1.2. Hidrojen

Hidrojen, 21. yüzyılın öne çıkan enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmekte olup bol bulunabilirliği, çevre dostu yapısı ve enerji taşıyıcısı

özelliğiyle dikkat çekmektedir [2]. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmektedir. Böylece elektrik ve ısı üretmek için kullanılabilir [4].

Hidrojen teknolojisi, üç temel süreci içermektedir: hidrojenin üretimi, ardından güvenli biçimde depolanması ve taşınması ile son olarak çeşitli uygulamalarda enerji kaynağı olarak kullanılması.

Hidrojen, metanın buhar reformasyonu ile hidrokarbon yakıtla reaksiyona girdiği yüksek sıcaklıktaki bir işlem ile üretilmektedir. Bir başka yaygın hidrojen üretim yöntemi ise elektrolizdir. Bakteri veya mikroalg gibi mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik reaksiyonlar aracılığıyla da hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu gibi biyolojik işlemlerde mikroorganizmalar bitkisel ürünleri tüketerek hidrojen gazı üretmektedir. Ayrıca, güneş ışığı kullanılarak da hidrojen üretimi yapılmaktadır. Bu üretim şekilleri fotobiyolojik, fotoelektrokimyasal, fotovoltaiik odaklı elektroliz ve termokimyasal yöntemlerle olabilmektedir. Hidrojen üretimi için kimyasal, elektrokimyasal, termokimyasal, fotokimyasal gibi teknolojilerin yanı sıra biyolojik yöntemler veya bu yöntemlerin farklı kombinasyonları hibrit olarak kullanılabilir [4].



Şekil 2. Kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri [4]

Son yıllarda, doğrudan deniz suyundan hidrojen üretebilen elektroliz sistemleri de geliştirilmiş olup bu yöntem altyapı maliyetlerini azaltarak tatlı suya bağımlılığı düşürmektedir [5-7].

Hidrojenin üretim yöntemine göre hidrojen enerjisinin renk kodlarıyla sınıflandırılması yapılmaktadır. Renk kodlamasında ayrıca üretim sürecinde oluşabilen sera gazı salımı da dikkate alınmaktadır [4].



Şekil 3. Hidrojen üretim yöntemlerine göre hidrojen enerjisi renkleri [4]

Hidrojenin üretimi sonrasında depolanması ve taşınması (iletilmesi) için de çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Hidrojenin birim kütle başına enerji kapasitesi yüksek olmakla birlikte (120 MJ/kg), hacimsel olarak değerlendirildiğinde hidrojenin enerji içeriği 8 MJ/L seviyesine düşmektedir ve kullanılacağı yerde depolanması hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımında en kritik sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon malzemelerde veya kimyasal olarak çeşitli hidrürler şeklinde depolanabilmektedir [8].

Tablo 2. Hidrojen depolama yöntemleri

Depolama Yöntemi	Tanım / Açıklama	Avantajlar	Dezavantajlar
Yer Altı Depolama	Tükenmiş doğal gaz/ petrol rezervuarlarında veya mağaralarda depolama	Düşük maliyet	Sızma riski, sınırlı coğrafi alanlar
Sıvı Depolama	-253 °C'de sıvılaştırma ile kriyojenik tanklarda depolama	Yüksek depolama yoğunluğu, düşük basınç	Yüksek enerji sarfıyatı (%40), kaynama kaybı, süper yalıtımlı kriyojenik kaplara ve soğutmaya ihtiyaç duyulması

Gaz Fazı (Sıkıştırma)	350-700 bar arası yüksek basınçta kompozit tanklarda sıkıştırarak depolama	Yaygın kullanım, yüksek verim, taşınabilirlik	Ağır tanklar, yüksek basınç, güvenlik riski
Metal Hidrürler	Kimyasal bağ yoluyla hidrojenin metal yapılar içinde depolanması	Yüksek hacimsel yoğunluk, hızlı reaksiyon, güvenli	Yüksek sıcaklık gerekebilir, maliyetli olabilir
Kimyasal Hidrürler	Kimyasal bileşiklerle bağlayarak hidrojenin depolanması (örn: sodyum borhidrür)	Isı ve kütle transferi kolaylığı, güvenli ve taşınabilir	Geri kazanım karmaşık, sınırlı yeniden kullanım
Karbon Malzemeler / Cam Küreler	Nanotüp, grafit gibi karbon yapılarında yüzey emilimi ile depolama	Hafif yapı, tasarım esnekliği	Yüksek maliyet, düşük kapasite

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 [3].

Hidrojenin depolanması bazı avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [3].

- 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

Hidrojen depolama teknolojilerinin 2030 hedefleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Hidrojen depolama teknolojilerinin 2030 hedefleri [3]

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 sıvılaştırma	Enerji oluşan kayıpları %30’a düşürerek hidrojen sıvılaştırma için verimin artırılması
Metal hidrürler ve karbon nano-yapılar	AR-GE fonlarının sürekliliğinin sağlanması

Depolanan hidrojen ihtiyaç anında yakıt hücresi teknolojisi aracılığıyla elektriğe dönüştürülerek talep edilen enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu süreçte hidrojenin tüketilmesiyle yalnızca su, elektrik ve ısı açığa çıkmakta; böylece çevre dostu ve temiz bir enerji alternatifi sağlanmış olmaktadır. Ulaşım, sanayi ve konut gibi başlıca alanların yanı sıra çok sayıda sektörde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Enerji üretim süreçlerinde kritik bir rol üstlenen bu teknolojiler, aşağıda belirtilen çeşitli sektör ve sistemlerde yer bulmaktadır [4].

- Dağınık veya birleşik ısı ve güç sistemleri
- Yedek güç sistemleri
- Yenilenebilir enerji depolama
- Hava, kara ve deniz yolu taşıma araçları için yardımcı güç

Bu açıdan bakıldığında, hidrojenin depolanması için geliştirilen sistemler, gelecekte kendinden söz ettiren önemli enerji depolama yöntemleri arasında yer alacağı değerlendirilmektedir [3].

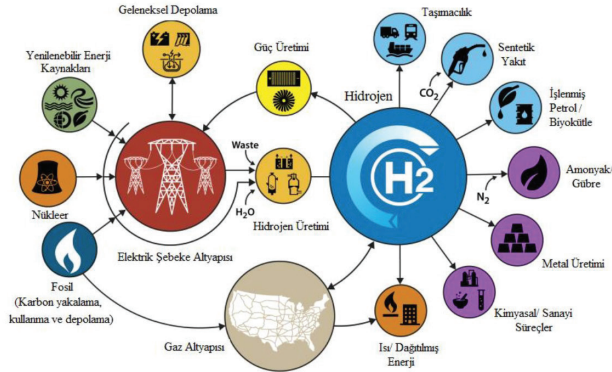
Depolanan hidrojenin taşınması işlemi, hidroje-

nin gaz formunda sıkıştırılması veya basınçlı ortamda sıvı forma dönüştürülmesi ve sonrasında tankerlere yüklenmesiyle yapılmaktadır. Ancak, ilerleyen yıllarda artacak hidrojen ihtiyacı nedeniyle, hidrojenin mevcut doğal gaz boru hatları vasıtasıyla da taşınması mümkündür. Zira, özellikle ülkeler arası doğal gaz hatlarının mevcut yapısı, hidrojenin taşınmasına elverişli potansiyel taşımaktadır.

Hidrojenin geleceğin enerji taşıyıcısı olarak hızla yükselmesi, üretim, taşıma ve depolama teknolojilerindeki gelişmeleri zorunlu kılmaktadır. Hidrojenin enerji ekosistemindeki yerini şekillendiren teknolojilerde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle depolama verimliliği, üretim maliyetleri ve taşınabilirlik üzerine yapılan çalışmalar, hidrojenin enerji sistemlerindeki rolünü daha da artırmaktadır. 2024 yılında geliştirilen yüksek verimli elektrolizörler (%95'e kadar çıkan verim), yeşil hidrojen üretimini daha ekonomik hale getirmiştir [9]. UNIST ve KAIST'teki araştırmacılar, pahalı değerli metallerle olan ihtiyacı ortadan kaldıran iki işlevli bir elektroliz katalizörü geliştirmişlerdir. Bu yüksek verimli katalizör, yüksek saflıkta yeşil hidrojenin istikrarlı üretimini sağlayarak üretim maliyetlerini düşürmekte ve karbon nötr enerjiye geçişi hızlandırmaktadır [7]. Aynı yıl Toyota'nın sıvı hidrojen için geliştirdiği kendinden basınçlandırmalı sistem, taşıma ve araç içi kullanım açısından devrim niteliğindedir [10]. Bunlara ek olarak, hidrojenin amonyak yoluyla taşınması, kıtalar arası tedarik senaryolarında yeni bir dönem başlatmaktadır. Hoegh'in 2025'te Almanya'ya amonyak türevli hidrojen teslimat planı, bu alandaki ilk büyük ölçekli uygulamalardan biridir [11]. Araştırmacılar, metal hidritler veya silikon bazlı bileşikler gibi malzemeler kullanarak hidrojen gazını kararlı, katı bir toz formuna dönüştürmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yenilik, hidrojenin yüksek basınçlı tanklar veya kriyojenik soğutma olmadan ortam sıcaklıklarında güvenli bir şekilde depolanmasını ve taşınmasını sağlamaktadır. Hidrojen, su eklenerek veya ısı uygulanarak serbest bırakılabilmekte ve enerji depolama ve taşıma için pratik ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır [7]. Ayrıca metal-organik iskeletler (MOF'lar) gibi yeni nesil adsorban malzemeler, düşük sıcaklık ve basınçta yüksek kapasitede hidrojen tutabilme potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Bu ilerleme, güvenlik ve verimlilik zorluklarını ele alarak hidrojen depolama ve taşıma için hafif ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır [7].

2024 yılında çeşitli firmaların iş birliğinde, katı hidrojen depolama modüllerinin AR-GE süreci hız kazanmıştır. Bu teknoloji, hacimsel yoğunluk açısından geleneksel gaz/sıvı yöntemlerden çok daha verimlidir. $TiV_2ZrCrMnFeNi$ gibi yüksek entropili alaşımlardaki gelişmeler, oda sıcaklığında geri dönüşümlü ve hızlı aktivasyona sahip hidrojen depolama çözümler ortaya koymaktadır [7]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, sodyum borhidrür ve amonyum borhidrür gibi maddelerin hem güvenli hem yüksek kapasiteli kimyasal depolama ortamları olabileceğini göstermiştir [12].

Yukarıda bahsi geçen üç aşama (hidrojenin üretimi, taşınması ve depolanması) birlikte hidrojen ekonomisi olarak adlandırılmaktadır. Enerji üretimi ve ısı/dağıtılmış güç için hidrojenin sabit ve ulaşım enerji depolama teknolojileri ile kullanımına ilişkin ekonomisi de aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4. Hidrojen ekonomisi [3]

2. Elektriksel Enerji Depolama Teknolojileri

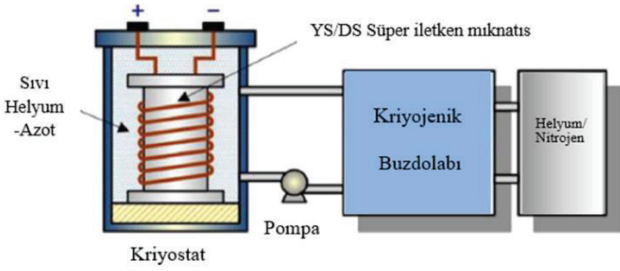
Elektriksel depolama, enerjinin elektrik alanı veya manyetik alan şeklinde depolanmasını ifade etmektedir. Elektriksel enerji depolama teknolojileri, güç kalitesinin artırılması, elektrikli araçlar ve akıllı şebeke uygulamaları için **stratejik bir rol üstlenmektedir** [3].

2.1. Süper İletken Manyetik

Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage), çok az sayıdaki doğrudan elektrik enerjisi enerji depolama teknolojilerinden biridir. Süper iletkenle enerji depolama, elektrodinamik ilkesine göre çalışmakta olup süper iletken kritik sıcaklığının altında tutulan bir süper iletken bobin içinde

akan doğru akımla oluşan manyetik alan içinde enerjinin depolanmasıdır [2,3].

Kriyojenik olarak soğutulan süper iletken malzeme ve depolanan enerji, bobinin enerjisini boşaltarak şebekeye geri bırakılabilmektedir [2]. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi, Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Süper iletken manyetik enerji depolama sisteminin yapısal görünümü [2]

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, su bazlı (sulu) ve çözücü temelli (susuz) elektrolitlere dayalı farklı yapılandırmalarda tasarlanabilmektedir. Sulu elektrolitli piller arasında Kurşun Asit, Nikel-Kadmiyum, Nikel-Metal Hidrür ve Alkalın Çinko-Mangan Dioksit yer almaktadır. Susuz elektrolitli piller arasında ise Lityum İyon, Metal Hava, Lityum Metal, Sodyum Kükürt ve Sodyum Nikel Klorür bulunmaktadır [2].

Süper iletken manyetik enerji depolama teknolojisi; yük akışı, frekans regülasyonu, sistem kararlılığı, enerji yönetimi gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Depolama teknolojilerinin yüksek verimliliği, söz konusu uygulama alanlarında çevresel sürdürülebilirliği destekleyici etkiler yaratmaktadır. Ayrıca, gelecekte enterekonnekte enerji sistemleri içinde yer bulabilecek potansiyele sahip önemli bir enerji üretim bileşeni olarak değerlendirilmektedir. [3].

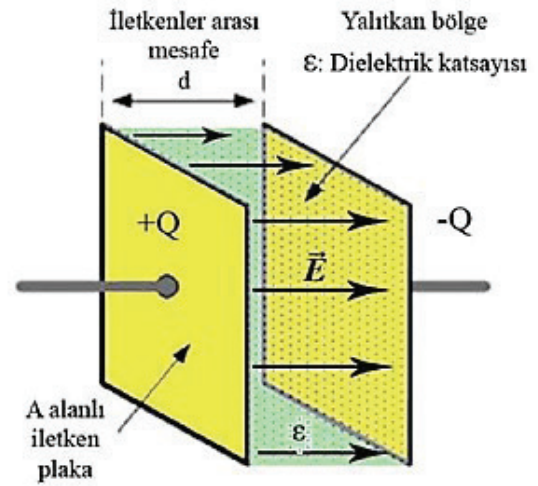
Söz konusu depolama sistemi, uzun ömürlü ekipman kullanımı, yüksek yoğunluk kapasitesi, hızlı yanıt verme özelliği, düşük kayıplar ve uygulanabilirliğini kolaylaştıran basit teknolojik çözümleriyle tanımlanmaktadır. Bu sistem şimdiye kadar dağıtılmış güç sistemleri tarafından uyarlanmamıştır [3].

2.2. Kapasitör

Kondansatör olarak da bilinen kapasitörler, her türlü elektrik sisteminde yaygın olarak kullanılan enerji depolama teknolojisi olup elektriği de-

polamak için oldukça etkilidir [2,3]. Kapasitörler, enerjiyi elektrostatik formda depolamakta ve daha sonra elektrik enerjisi olarak açığa çıkarmaktadır. Bu işlem gerçekleştirilirken herhangi bir bozulma olmadan binlerce defa şarjdeşarj döngüsü yapılabilmektedir.

Kapasitör iç yapısı Şekil 6'da gösterilmektedir [2].



Şekil 6. Kapasitör iç yapısı [2]

Kapasitör, dielektrik adı verilen iletken olmayan bir katmanla ayrılmış iki metal plakadan oluşmaktadır. Bir levha doğru akım kaynağından gelen elektrikle yüklenmekte, diğer levha da karşıt işaretli bir yük indüklenmektedir. Metalize veya metal elektronların yüzeylerinde ise enerji depolanmaktadır. Kapasitörlerin enerji yoğunluğu çok düşük olduğundan, yüksek akımlar iletilmekte ancak bu son derece kısa süreler için gerçekleştirebilmektedir [2]. Günümüzde araştırmaların hedefleri arasında kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırma da bulunmaktadır [3].

Kapasitörlerin elektrik enerjisi depolama kapasiteleri; enerji depolama, filtreleme ve darbe üretme gibi amaçlar için doğru ve alternatif akım devrelerinde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır [3].

Kapasitörler, öncelikle tüketicilerin kullandıkları küçük elektronik cihazlar için kullanılmıştır. Ancak zaman içerisinde silah ve ticari elektrikli araçlarına güç sağlamak için geliştirilmektedir [3].

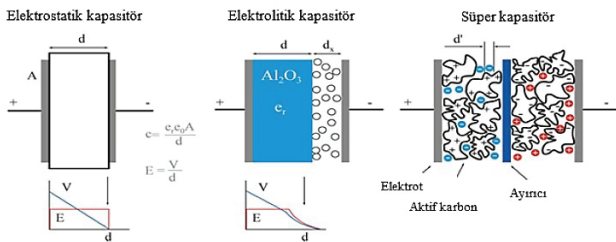
2.3. Süper kapasitör

Süper kapasitörler, diğer adıyla ultra kapasitörler ya da elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler, elektronik devrelerde kullanılan geleneksel kapasitörler ile kimyasal piller arasındaki enerji ve güç yoğunluğu boşluğunu dolduran bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [2,3].

Volanlardaki mekanik enerji veya pillerdeki kimyasal enerji gibi başka bir forma dönüştürmek yerine, doğrudan iki elektrot arasında elektrik enerjisini depolamaktadır. Dolayısıyla, şarj ve deşarj süreçleri çok hızlı ve verimlidir [3]. Bataryalarla karşılaştırıldığında, süper kapasitörler çok daha hızlı ve verimli şarj-deşarj döngüleri gerçekleştirebilmektedir. Enerji depolama potansiyeli açısından değerlendirildiğinde, süper kapasitörler klasik kapasitörlere göre çok daha yüksek kapasite sunmaktadır [2].

Çift katmanlı kapasitörler olarak da bilinen süper kapasitörler, elektriksel iletken bir karbon ve bir elektrolit arasındaki arayüzde oluşan çift tabaka boyunca enerji depolamaktadır. Süper kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmak için, aktif karbon gibi yüzey alanı yüksek malzemeleri kullanılmaktadır [3].

Süper kapasitör iç yapısı Şekil 7’de gösterilmiştir [2].



Şekil 7. Süper kapasitör iç yapısı [2]

KAYNAKLAR

[1] Enerji Depolama Çözümleri ve Genel Eğilimler, Elektrik Mühendisleri Odası. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/da7b5bd048a3e14_ek.pdf?dergi=1210. Erişim tarihi: 6 Nisan 2023.

[2] C. Emeksiz ve B. Kara, “Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi,” *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, cilt 6, sayı 2, ss. 134-142, 2022.

[3] B. Kocaman, *Enerji Depolama Teknolojileri*. Ankara:

İksad Yayınevi, 2021.

[4] Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu, TSKB. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/hidrojen-enerjisi-bilgilendirme-notu-120721.pdf>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2023.

[5] Greencarcongress, “Sinopec advances hydrogen production technology,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.greencarcongress.com/2024/12/20241222-sinopec.html>.

[6] Z. A. Aksoy, M. Tezeren, G. Parmaksız, M. T. Konca, İ. Taşkın ve S. Gökçeoğlu, “Deniz Suyu, Sodyum Sülfat ve Magnezyum Sülfat Tuz Çözeltilerinin Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Gazı Üretim Performanslarının İncelenmesi,” *Premium E-Journal of Social Sciences (PEJOSS)*, cilt 8, sayı 49, ss. 1780-1788, 2024, doi: 10.5281/zenodo.14616559.

[7] United Hydrogen Limited, “Top Hydrogen Innovations in 2024,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://unitedhydrogenlimited.com/top-hydrogen-innovations-in-2024/>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.

[8] Enerji Depolama Teknolojileri – Hidrojen Enerjisi, IdeaPort. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.ideaport.org.tr/img/blog/6242f838ab621.pdf>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2023.

[9] Hydrogen Central, “World’s Highest Efficiency Hydrogen System Scales Up for Mass Production,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://hydrogen-central.com/worlds-highest-efficiency-hydrogen-system-scales-up-for-mass-production/>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.

[10] The Verge, “Toyota’s liquid hydrogen self-pressurizer hits the GR Corolla H2,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.theverge.com/2024/11/18/24299725/toyota-liquid-hydrogen-self-pressurizer-gr-corolla-h2>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.

[11] Reuters, “Norway’s Hoegh maps out hydrogen delivery plans to Germany,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.reuters.com/business/energy/norways-hoegh-maps-out-hydrogen-delivery-plans-germany-2025-02-05/>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.

[12] Pmarketresearch, “Chemical Hydrogen Storage Technology Market,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pmarketresearch.com/chemi/chemical-hydrogen-storage-technology-market/>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.