



**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNDE HİBRİT DEPOLAMA
YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÖRNEK BİR SİSTEM
BOYUTLANDIRMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elole Komivi Raffegau ADJOYI

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Haziran 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMİNLERİNDE HİBRİT
DEPOLAMA YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÖRNEK
BİR SİSTEM BOYUTLANDIRMASI**

Elole Komivi Raffegau ADJOYI

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Haziran 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Elolo Komivi Raffegeau ADJOYI tarafından hazırlanan “Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Hibrit Depolama Yöntemlerinin Araştırılması ve Örnek Bir Sistem Boyutlandırması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 27 / 06 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Başkan : Prof. Dr. Ümmühan BAŞARAN FİLİK
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih SERTTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... / / tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27 / 06 / 2025

Elolo Komivi Raffegau ADJOYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMİNLERİNDE HİBRİT DEPOLAMA YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ÖRNEK BİR SİSTEM BOYUTLANDIRMASI

Elole Komivi Raffegau ADJOYI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Bu araştırma kapsamında, çeşitli depolama sistemleri araştırıp, yenilenebilir enerji kaynakları için en verimli, düşük maliyetli ve çevreye en az zararlı hibrit depolama yöntemi önerilmiştir. Mevcut enerji depolama sistemleri değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji santrallerinde depolama sistemlerinin uygulanması için teknik ve ekonomik gereksinimler analiz edilmiş, verimliliği artırmak için gerekli hibridizasyon kriterleri ve mevcut depolama sistemlerinin uygulamaları verilmektedir.

Boyutlandırılan sistemin optimize edilebilmesi için, belirlenen kriterler ve sabit verilere uygun olarak sistem bileşenlerinin parametreleri, bir optimizasyon algoritmasıyla iteratif şekilde taranmıştır. Bu parametreler, optimizasyon algoritması tarafından tanımlanmış ve simülasyon süresince değişim gösterdikleri gözlemlenmiştir. Değişken değerlerinde belirgin bir değişiklik ve boyutlandırılan sistemin en optimum noktasına ulaşana kadar iterasyonlar devam etmiştir. Tüm optimizasyon işlemleri ve hesaplamalar MATLAB programıyla gerçekleştirilmiştir.

2025, xi + 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Depolama sistemleri, Yenilenebilir enerji, Hibrit depolama, Hibridizasyon, Optimizasyon algoritması, Simülasyon.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF HYBRID STORAGE METHODS IN RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND SIZING OF A SAMPLE SYSTEM

Elole Komivi Raffegeau ADJOYI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Renewable Energy Systems

Supervisor: Prof. Fatih Onur HOCAOĞLU

Within the scope of this research, various storage systems are investigated and the most efficient, cost-effective and least environmentally harmful hybrid storage method for renewable energy sources is proposed. Existing energy storage systems were evaluated. The technical and economic requirements for the implementation of storage systems in renewable energy power plants are analyzed, the hybridization criteria required to increase efficiency and the applications of existing storage systems are given.

In order to optimize the dimensioned system, the parameters of the system components were iteratively searched in accordance with the defined criteria and fixed data using an optimization algorithm. These parameters were defined by the optimization algorithm, and it was observed that they changed throughout the simulation process. Iterations continued until a significant change in the variable values occurred and the system reached its most optimal point. All optimization processes and calculations were performed using MATLAB software.

2025, xi + 95 pages

Keywords: Storage systems, Hybrid storage, Renewable energy, Hybridization, Optimization algorithm, Simulation.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen hocalarıma her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Elole Komivi Raffegau ADJOYI
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Enerji Depolama Sistemleri	2
2.1.1 Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri	2
2.1.1.1 Hidrojen Depolama Sistemleri	4
2.1.1.2 Sentetik Doğal Gazın Enerji Depolama Sistemlerinde Kullanımı	16
2.1.2 Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri	17
2.1.2.1 Piller	17
2.1.2.2 Aküler.....	18
2.1.2.3 Yakıt Hücreleri	19
2.1.2.4 Akış Pilleri.....	20
2.1.3 Elektriksel Enerji Depolama Sistemleri	24
2.1.3.1 Kapasitörler	25
2.1.3.2 Ültra-kapasitörler ve Süper-kapasitörler	27
2.1.4 Manyetik Enerji Depolama Sistemleri	28
2.1.4.1 Manyetik Alana Maruz Kalan Bir Malzemedeki Enerji	28
2.1.4.2 Süperiletken Manyetik Sistemlerde Enerji Depolama	29
2.1.5 Mekaniksel Enerji Depolama Sistemleri.....	31
2.1.5.1 Potansiyel Enerji Depolama Sistemi	31
2.1.5.2 Kinetik Enerji Depolama Sistemi.....	34
2.1.6 Isıl (Termal) Enerji Depolama Sistemleri	36
2.1.6.1 Duyulur Isı.....	37
2.1.6.2 Gizli Isı	39
2.1.6.3 Termokimyasal Enerji Depolama Sistemleri	40

2.2 Mevcut Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi.....	41
2.2.1 Enerji Depolama Fiyatları	43
2.2.2 Hibridizasyon Kriterleri	44
2.2.3 Yenilenebilir Enerji Sistemlerindeki Hibrit Enerji Depolama Uygulamaları	46
2.2.4 Yenilenebilir Enerji Sistemlerine Göre En Uygun Hibrid Enerji Depolama Yöntemi.....	47
3. MATERYAL ve METOT	48
3.1 Giriş	48
3.2 Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Örnek Bir Hibrid Depolama Sistemi Boyutlandırma	48
3.2.1 Boyutlandırılacak Sistemin Elemanları.....	50
3.2.1.1 Güneş Panelleri.....	50
3.2.1.2 Bataryalar	52
3.2.1.3 Süper Kapasitörler	53
3.2.1.4 Yükler	54
3.2.1.5 İnvertörler.....	55
3.2.1.6 Maksimum Güç Noktası İzleyicisi	56
3.2.1.7 Batarya Regülatörü.....	57
3.2.1.8 Astronomik Zaman Rölesi.....	58
3.2.2 Hibrit Depolama Sistemin Enerji Dengelemesi	58
3.2.2.1 Güneş Panellerden Üretilen Enerji	58
3.2.2.2 Yükler Tarafından Tüketilecek Enerji.....	61
3.2.2.3 Depolama Sistemin Kapasitesi	62
3.2.2.4 Enerji Dengesi	62
3.2.3 Hibrid Enerji Depolama Sistemin Modeli.....	64
3.2.3.1 Gerekten Minimum Güneş Panel Adedi.....	64
3.2.3.2 Minimum Güneş Panel Adedine Göre Gerekten Depolama Kapasitesi	65
3.2.3.3 Batarya ve Süper Kapasitör Hibridizasyonu	66
3.2.3.4 Batarya ve Süper Kapasitör Hibridizasyon Kriterleri	67
3.2.3.3 Optimizasyon.....	69
3.2.3.4 Optimizasyon Sonuçları	71
4. BULGULAR	74
4.1 Sistemin Verimliliği.....	74

4.2 Sistemin Maliyeti.....	75
4.3 Sistemin Karbon Emisyonuna Etkisi	78
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	80
6. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	95



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ah	Amper-saat
atm	Atmosfer
%wt	Ağırlık yüzdesi
USD	Birleşik Devletler (Amerika) dolar
°C	Celsius derece
ZnBr ₂	Çinko bromür
H ₂	Dihidrojen
O ₂	Dioksijen
F	Farad
Hz	Hertz
Psi	İnç kare başına pound
CO ₂	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
K	Kelvin
kW/kg	Kilogram başı kilovat
Wh/kg	Kilogram başı vatsaat
kWh	Kilovatsaat
Co	Kobalt
W/l	Litre başı vat
Wh/l	Litre başı vatsaat
Li-iyon	Lityon iyon
Mpa	Megapascal
MW	Megavat
Ni	Nikel
NiCd	Nikel Kadmiyum
Ru	Rutenyum
sa	Saat
sn	Saniye
NaS	Sodyum sülfür
W	Vat
Wh	Vatsaat
V	Volt
Wp	Watt Peak

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
EDS	Enerji depolama sistemi
HEDS	Hibrid enerji depolama sistemleri
IV	Akım-gerilim ilişkisi
MPPT	Maksimum güç noktası izleyicisi
PCM	Faz değişim malzeme
PHED	Pompalı hidro enerji depolama
PV	Fotovoltaik

SHED	Sıkıştırılmış hava enerji depolama
SMED	Süperiletken magnetik enerji depolama
SNG	Sentetik Doğal Gaz
UPS	Kesintisiz güç kaynağı
VRB	Vanadyum redox batarya



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Enerji depolama sistemleri	2
Şekil 2.2 Hidrojenin ideal ekonomisinin genel kavramı	5
Şekil 2.3 Basit bir paralel plakalı kondansatörün şematik görünümü	26
Şekil 2.4 Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemin şematik gösterimi	32
Şekil 2.5 Dönen bir kütleye etki eden merkezkaç kuvvetinin şematik gösterimi	36
Şekil 2.6 Suyun Gibbs serbest enerjisinin sıcaklığa bağımlılığının şematik gösterimi .	40
Şekil 3.1 Boyutlandırılan sistemin bileşenlerinin blok şeması	50
Şekil 3.2 Bir yıl için kaydedilen saatlik güneş ışıınım verisi	59
Şekil 3.3 Bir yıl için kaydedilen saatlik güneş ışıınım verinin gün bazında gösterimi ...	59
Şekil 3.4 Bir adet güneş paneli için üretilen saatlik gücü	60
Şekil 3.5 Bir adet güneş paneli için gün bazında üretilen gücü	61
Şekil 3.6 Günlük yük dağılımı	62
Şekil 3.7 576 adet güneş paneli için sistemin günlük enerji üretim, tüketim ve depolama grafiği	65
Şekil 3.8 576 adet güneş paneli için sistemin günlük batarya durumunun grafiği.....	66
Şekil 3.9 Optimizasyon Algoritmasının akış şeması.....	70
Şekil 3.10 Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin güneş panel sayısına göre değişimi	72
Şekil 4.1 Boyutlandırılan sistemin verimliliği	75
Şekil 4.2 Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin güneş panel sayısına göre değişimi.....	77
Şekil 4.3 Batarya ve batarya-süper kapasitör depolama sistemlerin karbon emisyonu .	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Hidrojen depolama yöntemlerinin temel teknik özelliklerini karşılaştırılması	13
Çizelge 2.2 Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerin teknik özelliklerini karşılaştırılması	22
Çizelge 2.3 Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki bağlı geçirgenlik değerleri	26
Çizelge 2.4 Bazı yaygın malzemelerin termal özellikleri	37
Çizelge 2.5 Mevcut Enerji depolama teknolojilerinin özellikleri	42
Çizelge 2.6 Enerji depolamanın sermaye fiyatı.....	44
Çizelge 2.7 Yüksek güç ve yüksek enerji teknolojilerin sınıflandırılması.....	45
Çizelge 2.8 Teorik hibrid enerji depolama sistemlerin konfigürasyonları.....	45
Çizelge 2.9 Yenilenebilir enerji sistemlerinde HEDS uygulamaları.....	47
Çizelge 3.1 Boyutlandırılan sistemin optimizasyon sonuçları	71
Çizelge 4.1 Boyutlandırılan sistemin optimizasyon sonuçları	76
Çizelge 4.2 Tek depolama sistemli yapı için optimizasyon sonuçları	77

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 AKÜ hukuk fakültesi ve Üniyurt güzergâh krokisi	49
--	----



1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıt maliyetleri giderek artmaktadır. Diğer taraftan yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir biçimde kullanılması artan yakıt maliyetlerini aşağıya çekebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları denilince akla ilk olarak Güneş ve Rüzgâr enerjisi gelmektedir. Diğer taraftan bu tür kaynaklardan sürekli enerji üretimi mümkün değildir. Bununla birlikte enerji talebinin olmadığı zaman dilimlerinde üretilen fazla enerjinin depo edilmesi, enerji sürekliliğinin sağlanması için büyük önem arz etmektedir. Nitekim üretimin yeterli olmadığı zaman dilimlerinde depo edilen enerjinin harcanması ve böylece sistemin enerjisiz kalmaması özellikle şebekeden bağımsız sistemler için büyük öneme sahiptir. Literatürde hibrit bir yapının sistemi beslemesi planlanan yük durumları göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle yükün hibrit veya münferit enerji kaynaklarından besleneceği ve enerji üretim dengesinin talep lehine bozulması durumunda arda kalan enerjinin kimyasal batarya sistemlerinde depolanacağı varsayımı yapılmaktadır.

Yenilenebilir kaynakların kesikli yapısından dolayı, bu sistemlerde bataryalar kullanıldığında, tam ve kısmi şarj/deşarj döngüleri sırasında ortaya çıkabilecek sorunlar, batarya ömrü üzerinde olumsuz bir etki yaratır ve sistem maliyetlerini arttırır. Bir taraftan depolama sistemleri fiziksel olarak sabit belirli bir boyuta sahiptir ve bu boyutların artırılması mümkün değildir. Diğer taraftan pasif ve aktif depolama sistemlerinin belirli bir hiyerarşide birlikte kullanılmaları durumunda enerji sürekliliğine olumlu katkılar sağlanabileceği ön görülmektedir.

Araştırma kapsamında özellikle şebeke bağlantısı olmayan depolama sistemleri için kullanılan enerji depolama sistemlerinin hibrit kullanım olanakları araştırıldı. Sonrasında ise hibrit depolama sistemine sahip bir yenilenebilir enerji sisteminin boyutlandırılması yapıldı.

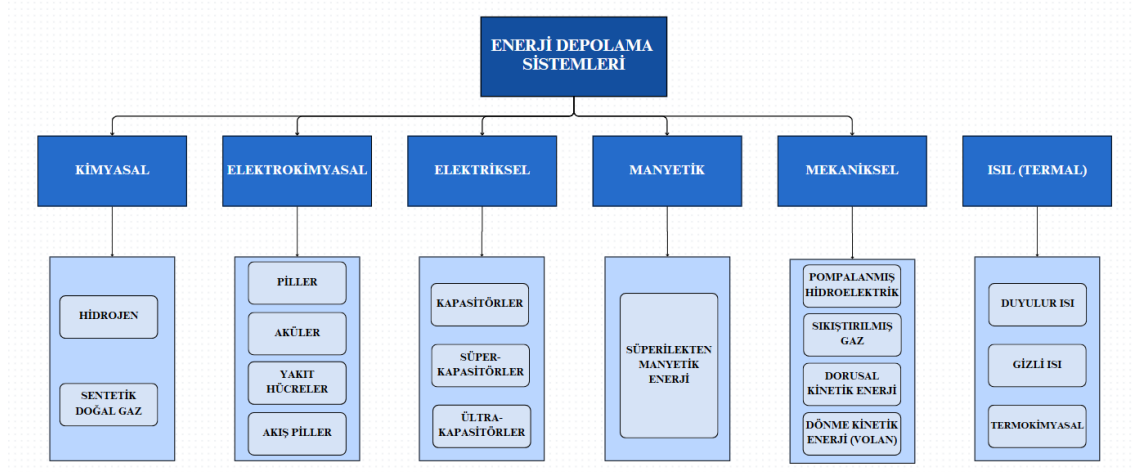
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Enerji Depolama Sistemleri

Depolama sistemleri, artan talebe yanıt vermek üzere genişlemekte, uzun vadeli uygulamaları desteklemekte ve talep ile arz arasındaki dengeyi daha etkin bir şekilde sağlamak amacıyla dinamik performans iyileştirmeleri sunmaktadır. Bu bağlamda, izin verilen kullanımın artışı, yenilenebilir kaynakların etkisini daha erişilebilir hale getirirken, şebekenin esnekliğini, güvenilirliğini ve genel verimliliğini artırmaktadır.

Enerji depolaması, yenilenebilir enerji santrallerinde baskın bir faktördür. Güneş ve rüzgâr gibi değişken yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretilerek, sistemin esnekliği artırılarak, enerji depolama etkinleştirilerek, elektrik enerjisinin güç değişimleri hafifletilebilir.

Elektrik güç sistemlerinde farklı depolama teknolojileri kullanılmaktadır. Bunlar kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, manyetik, mekaniksel veya termal depolama olabilirler.



Şekil 2. 1 Enerji depolama sistemleri

2.1.1 Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Kimyasal enerji depolama, enerjinin kimyasal bağlarda tutulduğu ve ihtiyaç

duyulduğunda bu enerjinin serbest bırakılarak kullanılabilirdiği sistemler aracılığıyla gerçekleştirilen bir enerji depolama yöntemidir. Bu yöntem, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliği nedeniyle enerji arz-talep dengesinin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Luo vd. 2015). Kimyasal enerji depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde uzun vadeli enerji depolama için avantajlı bir çözüm sunar.

Bu sistemlerde enerji genellikle kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolanır ve ihtiyaç halinde bu reaksiyonlar tersinir şekilde gerçekleşerek enerji açığa çıkarılır. En yaygın kimyasal enerji depolama teknolojileri arasında **hidrojen** üretimi, **sentetik yakıt** üretimi (örneğin metanol, amonyak) ve **metal-hidrit** sistemleri yer almaktadır (Schlapbach ve Züttel 2001).

Özellikle hidrojen, bu alanda dikkat çeken bir enerji taşıyıcısıdır. Su elektrolizi ile elde edilen hidrojen, daha sonra yakıt hücrelerinde elektrik üretmek üzere kullanılabilir. Bu süreç, çevre dostu bir enerji döngüsü sunar çünkü hidrojenin yakılması sonucu yalnızca su buharı oluşur (Turner, 2004). Bununla birlikte, hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu ve güvenli depolama gereklilikleri, teknolojik açıdan önemli zorluklar teşkil etmektedir (Züttel 2007).

Bir diğer önemli yöntem, sentetik yakıtların üretimidir. Karbon dioksit ve hidrojenin uygun koşullarda reaksiyona sokulmasıyla metan, metanol gibi karbon bazlı yakıtlar sentezlenebilir. Bu yakıtlar mevcut enerji altyapısında doğrudan kullanılabilir olduğundan, sistem entegrasyonu açısından büyük avantaj sağlar (Graves vd. 2011).

Kimyasal enerji depolama sistemlerinin verimliliği, reaksiyonların geri dönüşümlülüğü, enerji dönüşüm oranları ve kullanılan malzemelerin dayanıklılığı gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, bu sistemlerin çevresel etkileri, maliyet etkinlikleri ve uzun vadeli sürdürülebilirlikleri de dikkate alınmalıdır (Bocklisch 2015).

Sonuç olarak, kimyasal enerji depolama teknolojileri, özellikle büyük ölçekli ve uzun süreli enerji depolama ihtiyaçlarının karşılanmasında stratejik bir çözüm sunmaktadır. Devam eden bilimsel araştırmalar ve malzeme geliştirmeleri sayesinde, bu sistemlerin

gelecekte enerji şebekelerinde daha yaygın kullanılması beklenmektedir.

2.1.1.1 Hidrojen Depolama Sistemleri

Hidrojen önemli bir enerji taşıyıcısıdır ve yakıt olarak kullanıldığında ana fosil yakıtlar olan kömür, ham petrol ve doğal gaz ile bunların türevlerine bir alternatif olarak görülebilir. Temiz, güvenilir ve uygun fiyatlı bir enerji kaynağı olma potansiyeline sahiptir ve karbon içeren ve sera gazı olarak kabul edilen CO ve CO₂ yerine oksijenle yanma ürününün su olması gibi büyük bir avantaja sahiptir. Gelecekteki enerji sistemlerinde önemli bir rol oynamalıdır (Züttel 2004, Turner 2004).

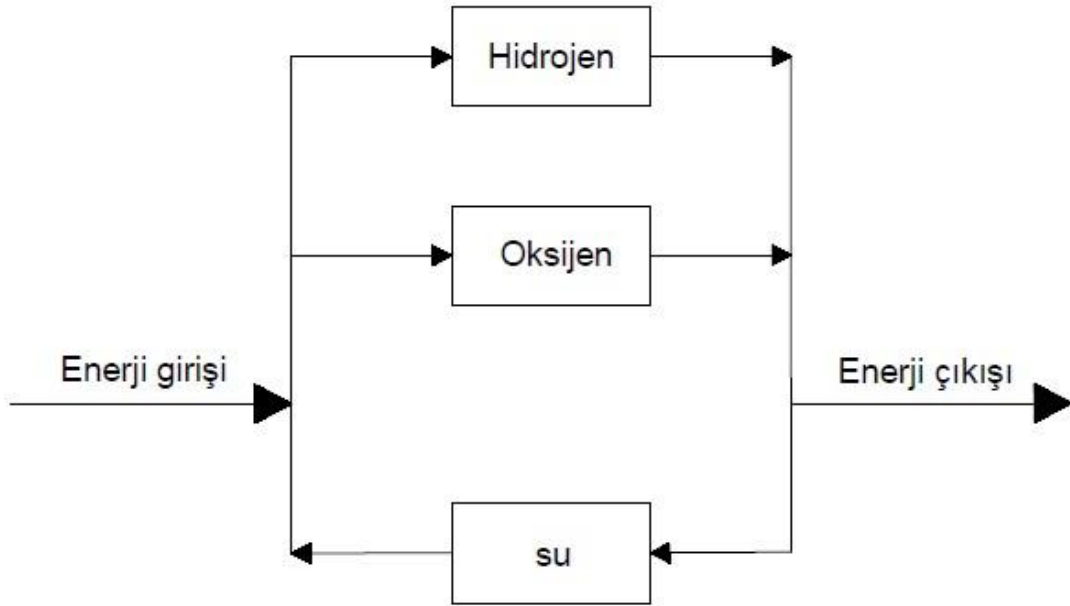
Hidrojenin, orta derecede yüksek bir basınca getirildiğinde nispeten küçük değişiklikler gerektiren pistonlu içten yanmalı motorlarda, türbinlerde ve proses ısıtıcılarında doğrudan kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca hidrojen/oksijen yakıt hücrelerinde doğrudan elektrik üretmek için de kullanılabilir. Burada da tek ürün sudur. Yakıt hücrelerinin enerji verimliliği %60'a kadar çıkabilmektedir. Fosil yakıt sistemleri ise genellikle %34 civarında bir verimliliğe sahiptir (IEA 2019). Hidrojen yüksek sıcaklıktaki yakıt hücrelerinde kullanıldığında, elektrik elde etmek ve verimsizliği nedeniyle yakıt hücresinde üretilen ısıyı ısıtma amacıyla kullanmak mümkündür. Bu kojenerasyon olarak bilinir ve %80'e varan toplam enerji verimliliği sağlayabilir.

Elektrikli araçlar, elektrik motorlarının yaklaşık %90 enerji verimliliğine sahip olabilmesi avantajına sahipken, tipik içten yanmalı motorlar yaklaşık %25 verimliliğe sahiptir. Öte yandan, yakıt hücreleri şu anda karşılaştırılabilir güçteki eşdeğer içten yanmalı motorlardan yaklaşık 100 kat daha pahalıdır. Ancak, yakıt hücreleri geliştirilmeye ve daha büyük ölçekte üretilmeye devam ettikçe, maliyette belirli bir düşüş bekleyebiliriz (Staffell vd. 2019).

Bu cazip özelliklerinden dolayı, bazı insanlar uzun zamandır hidrojenin ana yakıt olarak kullanıldığı basit bir hidrojen ekonomisi kavramını savunmaktadır (Barbir 2005).

Enerji üretmek için yanma yoluyla ya da yakıt hücrelerinde oksijenle tepkimeye girer ve

tek ürün sudur. Elektroliz yoluyla doğrudan sudan yeniden üretilebilir. Bu kapalı bir kimyasal döngüdür. Hiçbir kimyasal bileşik oluşmaz veya yok olmaz, ancak net bir enerji akışı vardır. Bu kavram **Şekil 2.2’de** şematik olarak gösterilmiştir. Tam teşekküllü bir hidrojen ekonomisi kurmanın gerekli olmadığını kabul etmek önemlidir. Kısmi uygulama bile çevre kirliliği sorunlarını azaltmak için arzu edilir. Ancak günümüzde hidrojenin ana kullanım alanı bir enerji taşıyıcısı olarak değil, bir dizi önemli büyük ölçekli kimyasal süreçte reaktan olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2. 2 Hidrojenin ideal ekonomisinin genel kavramı

Hidrojen depolamaya yönelik mevcut çözümler

Hidrojenin araç içinde taşınması sorununun kritik bir konu olduğu kabul edilmektedir. Bugüne kadar otomotiv endüstrisi tarafından üç farklı yaklaşım izlenmiştir. Aşağıda tartışılacağı üzere, bunların her birinin potansiyel avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Gaz halindeki hidrojenin yüksek basınçlı tanklarda depolanması

Hidrojeni depolamanın bariz bir yöntemi, onu yüksek basınç altında tanklarda hapsedmektir. Bir gram H_2 gazı, atmosfer basıncında yaklaşık 11 litre hacim kaplar. Bu nedenle, hidrojenin gaz fazında depolanması için yüksek basınç ve büyük hacme sahip tanklara ihtiyaç duyulmaktadır (Züttel 2004). Geleneksel olarak bu tanklar çelikten yapılmış olsa da günümüzde 340-680 atm'ye (yaklaşık 5 000–10 000 psi) kadar iç basınç dayanabilen fiber takviyeli kompozit malzemeler geliştirilmiştir (DOE, 2020).

Hidrojen, genellikle 200–250 bar basınç altında 50 litrelik silindirik tanklarda depolanmaktadır. Ancak, bu yüksek basınçlara rağmen, gaz halindeki hidrojen hâlâ sıvı halinin yaklaşık iki katı kadar hacim kapladığından, bu durum hem taşımayı zorlaştırmakta hem de ekstraksiyon verimliliğini azaltmaktadır (Schlapbach ve Züttel 2001). Ayrıca, çelik tanklarla sağlanabilen gravimetrik yoğunluk yaklaşık %1,5 düzeyindedir. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, hidrojenin sıkıştırılması sırasında harcanan enerjidir. Bu enerji kaybı sistem verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Eberle vd. 2009).

Bu konu **2.1.5 Mekaniksel Enerji Depolama Sistemleri** kısmında kısaca ele alınmış ve ideal gaz yasasına göre sabit hacimli bir tankta depolanan gaz miktarının basınçla orantılı olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak, termal etkilere de dikkat edilmelidir. Bir hidrojen tankının hızlı şarjı neredeyse adyabatiktir (çevreyle ısı alışverişi yoktur), bu nedenle büyük miktarda ısı üretilebilir ve bu da yüksek sıcaklıklara neden olur. Örneğin gazın tanktan bir yakıt hücresine boşaltılması nispeten yavaştır, böylece çevreye ısı transferi gerçekleşebilir, ancak bu ters işlem adyabatik değildir ve ortaya çıkan soğutma önemli olmayabilir.

Sıvı hidrojenin yalıtımlı tanklarda depolanması

Hidrojen, soğutularak sıvı hale getirilebilir. Hidrojenin kaynama noktası 1 atmosfer basınçta 20,3 K (-252,9 °C) olup, bu düşük sıcaklık, sıvılaştırma sürecini oldukça enerji yoğun hale getirir (Züttel 2004). Sıvı hidrojen, ısı yalıtımlı kriyojenik kaplarda

depolanabilir ve taşınabilir. Gerekli olduğunda, yerel sıcaklığı sıvı-gaz geçiş noktasının üzerine çıkaracak şekilde ısı uygulanarak tekrar gaz haline getirilebilir.

Bu teknoloji, geçmişte BMW gibi otomotiv üreticileri tarafından test edilmiştir. BMW, hidrojenin sıvı halde depolandığı ve hafifçe modifiye edilmiş içten yanmalı motorlarda yakıldığı prototip araçlar geliştirmiştir (Bossel vd. 2003). Bu yöntem, gaz fazında yüksek basınçlı depolamaya kıyasla daha düşük hacme ve basınca sahip tanklar gerektirdiğinden maliyet avantajı sağlayabilir.

Ancak sıvı hidrojenin depolanmasının en büyük dezavantajı, kaynama sırasında yaşanan enerji kaybı ve buharlaşmadır. Ayrıca sıvılaştırma işlemi, hidrojenin nihai enerji içeriğinin yaklaşık %30 ila 40'ına karşılık gelen bir enerji tüketimi gerektirir (Eberle vd. 2009). Bu nedenle, genel sistem verimliliği açısından bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Yine de sıvı hidrojen, günümüzde özellikle uzay teknolojilerinde ve yüksek enerjili nükleer fizik deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Schlapbach ve Züttel 2001).

Kriyojenik sıkıştırma ile hidrojen depolama

Kriyojenik basınçlı hidrojen depolama, hidrojenin çok düşük sıcaklıklarda (yaklaşık -140°C ve altı) ve aynı anda yüksek basınç altında (tipik olarak 30-35 MPa) saklanmasına dayanan bir yöntemdir. Bu hibrit yaklaşım, sıkıştırılmış gaz ve sıvı hidrojen sistemlerinin karşılaştığı başlıca zorlukları azaltmayı hedefler (Aceves vd. 2010). Örneğin, 70 MPa basınç altında bile, hidrojenin hem gravimetrik hem de hacimsel enerji yoğunluğu görece düşüktür.

Diğer yandan, sıvı hidrojen depolamasında buharlaşma (boil-off) kaynaklı enerji ve madde kayıpları kritik bir dezavantaj oluşturur. Düşük basınçlı sıvı hidrojen tanklarında (yaklaşık 1 MPa) hidrojenin güvenli saklanma süresi birkaç günü aşmamaktadır. Ancak kriyojenik basınçlı tanklar, buharlaşma oranını düşürerek hidrojenin depolama süresini kayda değer şekilde artırabilir (Yang vd. 2010).

Bu tür tanklar genellikle alüminyum astarlı, karbon fiber takviyeli bir iç hazneye sahiptir

ve paslanmaz çelikten yapılmış dış bir muhafaza ile çevrelenmiştir. İki yapı arasındaki vakumlu boşluk, ısı iletimini minimize eder. Tipik bir kriyojenik basınçlı tank, yaklaşık 129 cm uzunluk ve 58 cm çapa sahip olacak şekilde tasarlanır (DOE 2020).

Kriyojenik sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemleri hem gravimetrik hem de hacimsel enerji yoğunluğu açısından mevcut teknolojiler arasında en yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Ayrıca, sıvı hidrojen sistemlerinde yaşanan buharlaşma kayıplarını önemli ölçüde azaltarak hidrojen depolamada umut vadeden bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Ahluwalia vd. 2012).

Fiziksel adsorpsiyon ile hidrojen depolama

Bazı çalışmalarda, karbon nanotüplerin hidrojen depolama kapasitesi fiziksel adsorpsiyon mekanizması ile ilişkilendirilerek ele alınmaktadır. Bu yöntemde kullanılan poröz malzemeler; zeolit gibi kristal yapıli maddelerden, aktif karbon gibi amorf yapıdaki organik ve inorganik maddelere kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Darkrim vd. 2002). Bu malzemeler, hidrojen moleküllerini yüzeylerine van der Waals kuvvetleri ile zayıf olarak bağlayan, hızlı ve tersinir adsorpsiyon süreçleri sundukları için hidrojen depolama uygulamaları açısından önemli görülmektedir (Züttel 2004).

Bu bağlamda, malzemenin yüzey alanı, gözenek hacmi ve boyutu ile adsorpsiyon entalpisi gibi fiziksel özellikleri, hidrojenin depolanabilirliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Fiziksel adsorpsiyon özellikle aktif karbon, karbon nanofiberler ve karbon nanotüpler gibi karbon esaslı malzemelerle etkin şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Bhatia ve Myers 2006).

Aktif karbon, sahip olduğu yüksek iç yüzey alanı sayesinde mikro gözeneklerde hidrojenin depolanmasına olanak sağlar; ancak etkin bir depolama için genellikle yüksek basınç koşulları gerekmektedir. Karbon nanofiberler, yönlendirilmiş grafit katmanlarının spiral ya da plakalı yapılar halinde bir araya gelmesiyle oluşur ve tipik olarak 5-100 µm uzunluğunda, 5-500 nm çapındadır (Liu vd. 1999).

Karbon nanotüpler (CNT'ler), düzgün yüzey morfolojileri, yüksek özgül yüzey alanları ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle enerji depolama sistemlerinde umut vadetmektedir. Özellikle içi boş yapıları sayesinde kapiler etkiler aracılığıyla hem gaz hem de sıvı fazdaki hidrojenin tutulabileceği düşünülmektedir (Dillon vd. 1997). Ancak, bu malzemelerin hidrojen adsorpsiyon kapasiteleri hâlâ araştırma konusudur ve bazı raporlar oldukça değişken sonuçlar vermektedir; bu durum da üretim yöntemleri, yüzey modifikasyonları ve test koşullarıyla yakından ilişkilidir.

Metal hidritler ve hidrojen depolama

Metal hidritler, hidrojen gazının metal yüzeyine ulaştıktan sonra moleküler formdan ayrılarak atomik hidrojene dönüşmesi ve bu atomların metalin kristal yapısı içerisine difüze olması sonucu oluşan bileşiklerdir. Bu süreç sonucunda metal ve hidrojen arasında kimyasal bir bileşik meydana gelir (Fichtner 2005). Metal hidritler, özellikle güvenli, kompakt ve tersinir hidrojen depolama imkânı sundukları için enerji depolama teknolojilerinde önemli bir araştırma alanıdır. Ancak, genellikle düşük gravimetrik enerji yoğunlukları ve hidrojenin serbest bırakılması için gerekli yüksek sıcaklıklar gibi sınırlayıcı dezavantajlara sahiptirler (Schlapbach ve Züttel 2001).

Bu malzemeler arasında magnezyum hidrür (MgH_2), %7,6 gibi yüksek bir ağırlıkça hidrojen depolama kapasitesi ile öne çıkmaktadır (Zaluska vd. 2001). Ancak, MgH_2 'nin yapısında hem iyonik hem de kovalent bağ karakterleri bulunması nedeniyle, hidrojenin metal matristen serbest kalması için yüksek sıcaklıklar (genellikle $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) gerekmektedir. Bu durum, sistemin enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, MgH_2 üzerine yapılan çalışmalar genellikle katalizör ilavesi, nanoyapılandırma ya da mekanokimyasal işlemlerle buhidrojen salım sıcaklığını düşürmeyi amaçlamaktadır (Varin vd. 2009).

Kompleks hidritler (alanatlar) ve hidrojen depolama

Kompleks metal hidritler (veya alanatlar), başlangıçta geri dönüşümlü hidrojen depolama kapasiteleri olmadığı düşünülerek bu alanda yaygın şekilde tercih edilmemekteydi.

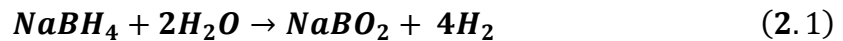
Ancak 1997 yılında Bogdanović ve Schwickardi tarafından gerçekleştirilen çığır açıcı bir çalışmada, sodyum tetrahidroalüminat (NaAlH_4) bileşiğinin, titanyum bazlı geçiş metali katalizörleri kullanılarak kontrollü ve tersinir bir şekilde dehidrojenasyon ve rehidrojenasyon tepkimelerine girebildiği gösterilmiştir (Bogdanović ve Schwickardi 1997). Bu gelişme, kompleks hidritlerin hidrojen depolama teknolojileri açısından yeniden değerlendirilmesini sağlamıştır.

Bu önemli keşif, özellikle borohidritler, lityum ve sodyum esaslı kompleks bileşikler ile magnezyum tabanlı nanokompozit sistemlerin araştırılmasını teşvik etmiştir (Orimo vd. 2007). Son on yılda, yüksek hidrojen kapasitesi ve potansiyel enerji yoğunlukları nedeniyle alüminyum ve bor içeren kompleks hidritler üzerinde yapılan çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır.

Bu alanda en çok ilgi gören bileşiklerden biri olan sodyum alüminyum hidrit (NaAlH_4), %5,6 ağırlıkça hidrojen kapasitesi sunması ve titanyum katkısıyla kinetik engellerin aşılabilmesi açısından dikkate değerdir. Öte yandan, daha karmaşık yapıları alanatlar örneğin $\text{Na}_2\text{LiAlH}_6$ üzerine yapılan çalışmalar da özellikle çok kademeli dehidrojenasyon süreçleri ve termodinamik denge koşullarının anlaşılması bakımından büyük önem taşımaktadır (Gross vd. 2002, Mauron vd. 2004).

Sodyum borohidrit (NaBH_4) ve hidrojen depolama

Sodyum borohidrit (NaBH_4), su ile tepkimeye girerek hidrojen açığa çıkaran önemli bir kimyasal hidrittir. Bu tepkime hem borhidrit hem de su moleküllü kaynaklı hidrojen üretimini içermektedir. Reaksiyon denklemi aşağıdaki gibidir:



Bu denkleme göre, açığa çıkan hidrojenin yaklaşık yarısı su moleküllerinden sağlanmaktadır (Züttel 2003). NaBH_4 hem gravimetrik hem de volümetrik olarak yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Teorik olarak %10,8 oranında hidrojen içeriğine sahiptir; ancak pratik uygulamalarda bu değer, reaksiyon verimi, katalizör kullanımı ve

sistem tasarımı gibi etkenlere bağılı olarak %2,9 ile %7,5 arasında değişmektedir (Zhang vd. 2007).

NaBH₄–H₂O sisteminde öne çıkan iki temel sorun bulunmaktadır. Birincisi, hem başlangıç maddesi olan NaBH₄’ün hem de reaksiyon ürünü olan NaBO₂’nin suda düşük çözünürlüğe sahip olması nedeniyle, reaksiyonun sürdürülebilmesi için yüksek miktarda suya ihtiyaç duyulmasıdır. İkincisi ise, katalizörsüz sistemlerde bu reaksiyonun oldukça yavaş ilerlemesidir (Kim vd. 2004). Bu sebeple, hidrojenin kontrollü ve yüksek verimli şekilde elde edilebilmesi için genellikle geçiş metali bazlı (özellikle Ru, Co veya Ni) katalizörler kullanılmaktadır (Amendola vd. 2000).

Alüminyum hidrit (AlH₃) ve hidrojen depolama

Alüminyum hidrit (AlH₃), yüksek hidrojen içeriği nedeniyle hidrojen yakıtlı araçlar için potansiyel bir hidrojen depolama malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Gravimetrik olarak yaklaşık %10,1 oranında hidrojen içermesi ve hacimsel olarak 148 g/L değerine ulaşması, AlH₃’ü bu alanda dikkat çekici kılmaktadır (Graetz ve Reilly 2005). Bu yüksek kapasiteye rağmen, AlH₃ geri dönüşümlü bir hidrojen taşıyıcısı değildir; yani, hidrojen salımı sonrasında malzemenin doğrudan tekrar AlH₃ formuna dönüştürülmesi oldukça zordur.

AlH₃, görece düşük bir enerji girdisiyle (~7 kJ/mol H₂) aşağıdaki endotermik tepkime yoluyla hidrojen gazı salmaktadır:



Bu düşük dehidrojenasyon enerjisi, AlH₃’ü pratik kullanım için cazip kılmakla birlikte, sistemin sürdürülebilirliği açısından en büyük sınırlayıcı faktör, AlH₃’ün yeniden sentezlenmesidir. Alüminyumun doğrudan AlH₃’e dönüştürülmesi için çok yüksek basınç (yaklaşık 700 MPa) ve reaktif gaz koşulları gereklidir, bu da enerji ve ekipman maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır (Bogdanović vd. 2000, Graetz vd. 2004).

Bu sebeple, AlH_3 temelli sistemler genellikle tek kullanımlık, yani tek yönlü hidrojen kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Buna rağmen, yüksek hidrojen yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda salım yapabilme kapasitesi nedeniyle savunma sanayii ve uzay uygulamaları gibi özel alanlarda kullanım potansiyelini korumaktadır (U.S. DOE 2009).

Amonyak boran (AB) ile hidrojen depolama

Amonyak boran (AB), patlayıcı ve yanıcı özellik göstermeyen, beyaz renkli kristal yapıya sahip bir bileşiktir. Kütlece %19,6 oranında hidrojen içermesi, AB'yi yüksek kapasiteli bir hidrojen taşıyıcısı olarak ön plana çıkarmaktadır (Zhang vd. 2011). AB, su içerisinde yüksek çözünürlüğe sahip olup, sulu çözeltilerinde uzun süre kararlılığını korur. Ayrıca, toksik olmaması ve düşük molekül ağırlığı (30,87 g/mol) nedeniyle katı hâlde hidrojen depolama malzemesi olarak tercih edilmektedir (Srinivasan vd. 2003).

Amonyak boran, uygun bir katalizör varlığında oda sıcaklığında gerçekleşen reaksiyonla 1 mol AB'den 3 mol H_2 gazı salınımı sağlar. Bu reaksiyon, hidrojen üretimi açısından verimli bir yöntem sunmaktadır:



AB'nin hidrojen salımı, farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bunlar arasında termal bozunma (termoliz), katalitik dehidrojenasyon ve çözücü bazlı ayrışma yöntemleri (hidroliz ve metanoliz) yer almaktadır (Zhang vd. 2007). Termoliz, AB'nin doğrudan ısıtılmasıyla hidrojen gazının elde edilmesini sağlar; ancak bu süreç, yüksek sıcaklık gereksinimleri nedeniyle enerji verimliliği açısından zorluklar yaratabilir. Katalitik dehidrojenasyon ise, uygun katalizörler kullanılarak daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve hidrojen salımını hızlandırır (Liu vd. 2013). Hidroliz ve metanoliz gibi çözücü bazlı yöntemler, genellikle daha kontrollü ve güvenli bir şekilde hidrojen üretimi sağlar.

Sıvı organik hidrojen taşıyıcıları (LOHC) ile hidrojen depolama

Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcıları (LOHC), hidrojenin güvenli bir şekilde depolanması için alternatif yöntemlerden biridir. Bu sistemde hidrojen, sıvı hâle bulunan organik bileşiklere kimyasal olarak bağlanarak depolanır. Katı formdaki sistemlerin aksine, LOHC kullanımı; mevcut yakıt dağıtım altyapılarından yararlanma kolaylığı ve istenilen miktarda hidrojenin ısıtılarak doğrudan reaksiyon odasına yönlendirilmesi gibi önemli operasyonel avantajlar sunar (Schlapbach ve Züttel 2001). Bu yöntem, tüm sistemi ısıtmadan sadece gerekli miktarda hidrojenin salınabilmesi sayesinde enerji verimliliğini artırabilir.

LOHC'ler teorik olarak, ağırlıkça %6-8 oranında hidrojen depolama kapasitesine sahiptir (Fischer vd. 2014). Ancak bu kapasite, diğer hidrojen depolama yöntemlerine kıyasla nispeten düşüktür, bu da LOHC'lerin hidrojen depolama teknolojileri arasında daha az ilgi görmesine yol açmaktadır. LOHC sistemlerinde hidrojen depolama ve salımı, genellikle organik bileşiklerin çift bağlarının hidrojenasyon ve dehidrojenasyonu yoluyla gerçekleştirilir (Züttel 2004). Hidrojenasyon süreci sırasında doymamış bağlar hidrojenle doyurulur ve bu işlem ekzotermik olup yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir. Dehidrojenasyon işlemi ise endotermiktir ve enerji girdisi gerektirir.

Bu teknolojinin avantajları arasında, hidrojenin güvenli bir şekilde sıvı formda depolanması ve taşıma altyapısına entegre olabilmesi yer alırken, dezavantajları ise enerjinin dehidrojenasyon sürecinde kaybedilmesi ve sınırlı depolama kapasitesidir.

Çizelge 2. 1 Hidrojen depolama yöntemlerinin temel teknik özelliklerini karşılaştırılması

Yöntem	Teorik H ₂ Kapasitesi (%wt)	Pratik H ₂ Kapasitesi (%wt)	Çalışma Koşulları	Avantajları	Dezavantajları
Sodyum Borohidrit (NaBH ₄)	~10,8	2,9–7,5	~80–100 °C, su ile hidroliz	Yüksek H ₂ içeriği, kontrollü salım	Düşük çözünürlük, yan ürün rejenerasyonu zor

Çizelge 2. 1 (Devam) Hidrojen depolama yöntemlerinin temel teknik özelliklerini karşılaştırılması

Alüminyum Hidrit (AlH_3)	~10	~6	>100 °C, yüksek basınç rejenerasyon (~700 MPa)	Yüksek H_2 kapasitesi	Geri dönüşüm çok zor, yüksek basınç gerekir
Amonyak Boran (AB)	~19,6	~11–13	80–150 °C, çeşitli yöntemlerle (termoliz, hidroliz)	En yüksek H_2 kapasitesi, toksik değil	Rejenerasyon zor ve maliyetli
LOHC (Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcı)	~6–8	5–7	150–300 °C, sıvı ortam, hidrojenasyon/dehidrojenasyon	Sıvı, mevcut altyapıyla uyumlu, yeniden kullanılabilir	Düşük kapasite, enerji yoğun işlem
Kompleks Hidritler (ör. NaAlH_4)	~5,6	~4	150–250 °C, katalizör gerekebilir	Yüksek enerji yoğunluğu, bazıları geri dönüşümlü	Rejenerasyon zorluğu, yüksek sıcaklık

Çizelge 2. 1 (Devam) Hidrojen depolama yöntemlerinin temel teknik özelliklerini karşılaştırılması

Metal Hidritler (ör. LaNi_5H_6 , MgH_2)	1–7	1–5	25–300 °C (metal tipine göre değişir), 1–10 MPa	Güvenli, kompakt, uzun ömürlü	Ağırlıkça düşük kapasite, yavaş kinetikler, yüksek sıcaklık
Fiziksel Adsorpsiyon (Aktif karbon, MOF)	<7	1–2	<100 K, genelde kriyojenik	Hızlı adsorpsiyon /desorpsiyon, yüksek yüzey alanı	Düşük sıcaklık gerektirir, düşük enerji yoğunluğu
Kriyojenik Sıkıştırma (LH_2 + basınç)	~100 g/L (yoğunluk)	—	~20 K, >100 bar	Yüksek hacimsel yoğunluk	Soğutma için yüksek enerji, buharlaşma kayıpları
Sıvı Hidrojen (yalıtlımlı tanklar)	~71 g/L	—	20,3 K, düşük basınç (~1 atm)	Hafif taşıma imkânı, uzay uygulamaları	Buharlaşma kayıpları, tank yalıtımı zor
Gaz H_2 (yüksek basınçlı tanklarda)	—	~4,5–6 wt%, ~39 g/L (700 bar)	200–700 bar, ortam sıcaklığı	Yaygın, olgun teknoloji, dolum kolaylığı	Ağırlık ve tank hacmi büyük, güvenlik önlemleri gerekli

Kaynak: Luo vd. 2015, Züttel 2007, Schlapbach vd. 2001.

2.1.1.2 Sentetik Doğal Gazın Enerji Depolama Sistemlerinde Kullanımı

Enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini ve esnekliğini artırmak amacıyla geliştirilen alternatif yakıtlar arasında Sentetik Doğal Gaz (SNG), çevresel ve teknik avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. SNG, fosil kaynaklı doğal gazın yerini alabilecek potansiyele sahip olup, biyokütle, atık ve karbondioksit gibi karbon içeren bileşenlerin termokimyasal dönüşüm süreçleri sonucunda elde edilen, metan bakımından zengin bir gaz yakıttır (Götz vd. 2016). Kimyasal yapısı itibarıyla, mevcut doğal gaz altyapısıyla tamamen uyumludur ve herhangi bir teknik değişikliğe ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilir.

Enerji depolama bağlamında değerlendirildiğinde, SNG'nin en önemli avantajlarından biri, enerjinin kimyasal formda uzun vadeli ve yüksek yoğunluklu olarak muhafaza edilebilmesine olanak tanınmasıdır. Özellikle güneş ve rüzgâr gibi değişken yenilenebilir kaynaklardan elde edilen fazla elektrik enerjisinin önce suyun elektroliziyle hidrojene, ardından karbondioksit ile reaksiyona girerek metana dönüştürülmesi (metanasyon süreci) sayesinde, bu enerji kimyasal olarak depolanabilir hale gelmektedir (Jentsch vd. 2009). Bu süreç, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki zamansal uyumsuzluğu giderme açısından stratejik bir çözüm sunar.

SNG, yüksek basınçlı tanklarda, yer altı doğal gaz depolarında ya da mevcut boru hatlarında depolanabilmektedir. Bu altyapısal esneklik, onu yalnızca bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda etkili bir enerji depolama aracı haline getirmektedir (Sterner ve Stadler 2014). Ayrıca, çevresel açıdan değerlendirildiğinde, SNG üretimi karbon nötr ya da karbon negatif sistemler olarak tasarlanabilir. Özellikle biyokütle bazlı üretim yöntemleri, atmosferden karbondioksit çekilmesine olanak sağlayarak çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunar (Leonzio 2017).

Sonuç olarak, sentetik doğal gaz, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin kimyasal formda uzun süreli olarak depolanmasını mümkün kılarak, düşük karbonlu enerji sistemlerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Hem mevcut altyapı ile uyumlu oluşu hem de enerji dönüşüm süreçlerinde sağladığı esneklik nedeniyle, SNG enerji depolama teknolojileri arasında stratejik bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2 Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri, kimyasal enerjinin elektrik enerjisi şeklinde geri kazanılmasını sağlayan sistemlerdir. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda, elektrikli araç teknolojilerinde ve taşınabilir elektronik cihazlarda büyük öneme sahiptir (Luo vd. 2015). Temel prensip, elektrotlar ve elektrolitler arasındaki redoks reaksiyonları aracılığıyla enerji depolamak ve gerektiğinde bu enerjiyi elektrik olarak geri sağlamaktır (Dunn vd. 2011).

En yaygın elektrokimyasal enerji depolama sistemleri arasında **piller**, **aküler** ve **yakıt hücreleri** yer almaktadır. Bunların her biri, farklı uygulama alanlarına ve performans kriterlerine göre geliştirilmiştir. Lityum-iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü nedeniyle özellikle taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar gibi alanlarda tercih edilmektedir (Nitta vd. 2015). Kurşun-asit aküler ise daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen düşük maliyetleri ve güvenilir performansları sayesinde sabit enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang 2011).

Gelişmekte olan bir diğer teknoloji ise **akış pilleridir**. Bu sistemlerde enerji, sıvı elektrolitler içinde çözünmüş redoks aktif türler aracılığıyla depolanır. Tanklarda depolanan elektrolitler, bir membran aracılığıyla ayrılmış hücrelerde dolaşarak enerji dönüşümünü sağlar. Akış pilleri, özellikle büyük ölçekli enerji depolama gereksinimleri için uygun olup, kolayca ölçeklendirilebilen ve uzun çevrim ömrüne sahip sistemlerdir (Skyllas-Kazacos vd. 2011).

2.1.2.1 Piller

Piller, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal sistemlerdir. Genel olarak bir veya birden fazla elektrokimyasal hücre içerirler ve taşınabilir enerji kaynakları olarak geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler (Linden ve Reddy 2002). Genellikle düşük güç gerektiren uygulamalarda kullanılan bu sistemlerin hücre gerilimleri, kullanılan elektrot ve elektrolit malzemelerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Pillerin çalışma prensipleri, elektrotlar arasında gerçekleşen redoks (indirgenme-oksidasyon) reaksiyonlarına dayanır (Scrosati ve Garche 2010).

Piller, kullanım şekillerine göre iki ana gruba ayrılır:

- **Primer piller (birincil piller):** Bu piller şarj edilemez; enerji tamamen tüketildiğinde işlevini yitirir ve atılır. Yaygın örnekleri arasında alkalin piller ve çinko-karbon piller yer alır. Genellikle düşük maliyetli, uzun raf ömrüne sahip ve düşük enerji ihtiyacı olan cihazlarda kullanılır (Linden ve Reddy 2002).
- **Sekonder piller (ikincil piller):** Bu tür piller şarj edilebilir yapıdadır ve çok sayıda döngüde kullanılabilir. En bilinen örnekleri arasında lityum-iyon ve nikel-metal hidrit (NiMH) piller bulunmaktadır. Bu piller, özellikle taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Nagaura ve Tozawa 1990, Nitta vd. 2015).

2.1.2.2 Aküler

Aküler, sekonder (ikincil) pillerin bir alt kümesi olarak değerlendirilebilir ve özellikle daha büyük enerji gereksinimleri için uygun sistemlerdir. Elektrik enerjisini kimyasal forma dönüştürerek depolarlar ve ihtiyaç duyulduğunda bu enerjiyi tekrar elektriksel forma dönüştürerek sağlarlar (Linden ve Reddy 2002). Şarj edilebilir olmaları sayesinde çok sayıda döngüde kullanılabilirler. Geniş güç aralığına ve modüler tasarıma uygun yapıları sayesinde kesintisiz güç kaynakları (UPS), elektrikli araçlar ve sabit enerji depolama sistemleri gibi birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Luo vd. 2015).

Öne çıkan akü türleri şunlardır:

- **Kurşun-asit aküler:** Düşük maliyetli olmaları ve güvenilir performansları nedeniyle taşımacılık ve sabit enerji depolama uygulamalarında sıklıkla tercih edilirler. Ancak düşük özgül enerjiye (Wh/kg) sahip olmaları, hacimsel ve ağırlıksal sınırlamalar oluşturur (Buchmann 2011).
- **Lityum-iyon aküler:** Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, düşük kendiliğinden deşarj oranı ve uzun çevrim ömrü sayesinde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Nitta vd. 2015).
- **Nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) aküler:** NiCd aküler, sağlamlıkları ve yüksek çevrim ömürleriyle bilinse de toksik

kadmiyum içeriği nedeniyle çevresel kaygılara yol açmaktadır. Buna karşılık, NiMH aküler daha çevre dostu olup özellikle taşınabilir cihazlarda yaygın şekilde kullanılmıştır (Pistoia 2005).

2.1.2.3 Yakıt Hücreleri

Yakıt hücreleri, hidrojen, metanol gibi yakıtların ve bir oksitleyicinin (genellikle havadaki oksijenin) elektrokimyasal reaksiyona sokulması yoluyla doğrudan elektrik üretimini sağlayan sistemlerdir (Larminie ve Dicks 2003). Geleneksel pillerin aksine, yakıt hücreleri sürekli olarak yakıt beslendiği sürece elektrik üretimini sürdürebilir. Bu sayede uzun süreli, kesintisiz ve sessiz bir enerji üretimi mümkün olur. Yakıt hücreleri, yüksek enerji verimi (%40–60), düşük emisyon ve modüler yapı avantajlarına sahiptir (Barbir 2005). Ancak sistemlerin karmaşıklığı, yüksek maliyetli elektrot/elektrolit malzemeleri ve özellikle hidrojen yakıtının dağıtım ve depolama altyapısının yetersizliği gibi sınırlayıcı faktörler bulunmaktadır (Zhang vd. 2020).

Yakıt hücrelerinin temel bileşenleri arasında:

- **Anot:** Yakıtın (örneğin H_2) iyonlaştığı ve elektron saldıgı elektrottur.
- **Katot:** Oksijenin indirgenerek elektronları aldığı ve su oluşturduğu elektrottur.
- **Elektrolit:** Yalnızca iyon geçişine izin verirken elektronların harici devreye yönlendirilmesini sağlar.

Başlıca yakıt hücresi türleri şunlardır:

- **Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC):** 60–80 °C gibi düşük sıcaklıklarda çalışır. Hızlı başlatılabilir olmaları ve kompakt yapıları nedeniyle taşınabilir uygulamalarda ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhao ve Virkar 2005).
- **Katı oksit yakıt hücresi (SOFC):** 600 – 1 000 °C aralığında yüksek sıcaklıklarda çalışan bu hücreler, yüksek verim ve içten ısı geri kazanımı gibi avantajlar sunar. Genellikle sabit enerji üretiminde kullanılır (Singhal 2000).
- **Alkalin yakıt hücresi (AFC):** NASA tarafından uzay görevlerinde kullanılan

ilk yakıt hücresi türüdür. Yüksek verimlidir ancak safsızlıklara karşı hassas olup yalnızca saf hidrojen ve oksijenle verimli çalışır (Barbir 2005).

2.1.2.4 Akış Pilleri

Akış pilleri, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için sıvı elektrolit çözeltilerinin kullanıldığı elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir (Soloveichik 2015). Bu sistemlerin en ayırt edici özelliği, enerji taşıyıcı elektrolitlerin hücreden ayrı tanklarda depolanması ve pompalanarak reaksiyon hücresinden geçirilmesidir. Bu özellik, enerji kapasitesi ile güç çıkışının birbirinden bağımsız olarak tasarlanabilmesini mümkün kılar (Leung vd. 2012).

Modüler yapıları sayesinde güç ve kapasitenin ayrı ayrı ölçeklendirilebilmesi, binlerce şarj-deşarj döngüsüne dayanıklı olmaları, termal kararlılıkları sayesinde aşırı ısınma riskinin düşük olması ve özellikle Vanadyum Redoks Akış Pili (VRFB) türlerinde patlama veya yangın riskinin az olması gibi avantajlar sunarlar (Skylas-Kazacos vd. 2011).

Bununla birlikte, **düşük enerji yoğunlukları** nedeniyle taşınabilir uygulamalara uygun değildir. Ayrıca pompa, sensör ve kontrol sistemleri gibi ilave bileşenler gerektirdiklerinden dolayı sistem karmaşıklığı ve **yüksek ilk yatırım maliyeti** gibi dezavantajlara da sahiptirler (Ponce de León vd. 2006). Akış pilleri, özellikle şebeke ölçekli enerji depolama (ör. yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte), pik yük dengeleme, yedek güç sistemleri ile mikro ve ada şebekelerde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Çalışma Prensipleri olarak, akış pillerinde, iki ayrı tankta bulunan pozitif ve negatif elektrolit çözeltileri, bir pompa sistemi aracılığıyla hücreye taşınır. Elektrokimyasal reaksiyon hücresinde, iyon değişim membranı aracılığıyla iyonlar geçerken, elektronlar harici devre üzerinden akar ve böylece elektrik akımı elde edilir.

- **Elektrotlar:** Reaksiyonun gerçekleştiği yüzeylerdir.
- **Membran:** İyonların geçişine izin verirken elektrolit çözeltilerin karışmasını

önler.

- **Tanklar:** Kimyasal enerji taşıyan sıvı elektrolitlerin depolandığı yapılardır.
- **Pompalar:** Elektrolitlerin hücreye iletimini sağlar.

Başlıca Akış Pili Türleri;

- **Vanadyum redoks akış pili (VRFB)**

Ticari olarak en yaygın akış pili türüdür. Hem pozitif hem negatif elektrolitlerde vanadyumun farklı oksidasyon halleri kullanıldığından çapraz kontaminasyon riski düşüktür (Skylas-Kazacos ve Kazacos 2011).

- **Avantajları:** Uzun çevrim ömrü, yüksek güvenlik, derin deşarja dayanıklılık.
- **Dezavantajları:** Vanadyumun yüksek maliyeti ve düşük enerji yoğunluğu.

- **Çinko-brom (Zn-Br) akış pili**

Pozitif elektrolitte brom, negatif elektrolitte çinko kullanılır.

- **Avantajları:** Görece daha yüksek enerji yoğunluğu.
- **Dezavantajları:** Bromun korozyon etkisi ve bu nedenle artan güvenlik önlemleri gereksinimi (Rahman vd. 2021).

- **Demir-krom (Fe-Cr) akış pili**

İki farklı geçiş metalinin redoks reaksiyonları kullanılır. Görece düşük maliyetlidir. Ancak düşük enerji verimi nedeniyle sınırlı uygulama alanı bulmuştur (Huskinson vd. 2014).

Çizelge 2. 2 Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerin teknik özelliklerini karşılaştırılması

Sistem Türü	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Ömür (döngü sayısı)	Tepki Süresi	Avantajlar	Dezavantajlar
Lityum-İyon Batarya	100 – 265	250 – 10 000	1 000 – 10 000+	Milisa niyeler	Yüksek enerji yoğunluğu, düşük bakım, yaygın kullanım	Maliyetli, termal kaçak riski
Kurşun-Asit Batarya	30 – 50	180 – 300	300 – 500	Saniye ler	Düşük maliyet, olgun teknoloji	Düşük enerji yoğunluğu, ağır metal içerir
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	45 – 80	150 – 300	1000+	Milisa niyeler	Dayanıklı, yüksek döngü ömrü	Hafıza etkisi, çevreye zararlı
Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH)	60 – 120	250 – 1 000	500 – 1 000	Saniye ler	Daha az toksik, orta enerji yoğunluğu	Yüksek özdeşarj oranı
Süperk apasitör	5 – 10	10 000 – 20 000	1 milyon+	Milisa niyeler	Çok yüksek güç yoğunluğu, uzun ömür	Düşük enerji yoğunluğu

Çizelge 2. 2 (Devam) Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerin teknik özelliklerini karşılaştırılması

Akış Bataryaları (Flow Batteries)	20 – 50	50 – 200	10 000+	Dakikalar	Büyük ölçekli enerji depolamaya uygun, uzun çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, karmaşık sistem
Sodyum - Kükürt Batarya (Na-S)	150 – 240	150 – 250	2 500+	Dakikalar	Yüksek enerji yoğunluğu, şebeke ölçeği	Yüksek çalışma sıcaklığı (~300°C), güvenlik endişeleri

Elektrokimyasal sistemlerin tasarımında dikkate alınması gereken temel parametreler arasında enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, çevrim ömrü, verimlilik, maliyet ve çevresel etkiler bulunmaktadır. Bu parametreler, sistemlerin ticari ve teknik uygulanabilirliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Liu vd. 2018). Enerji yoğunluğu, sistemin ne kadar enerji depolayabileceğini belirlerken; güç yoğunluğu, kısa süreli yüksek güç gereksinimlerini karşılamak için kritik öneme sahiptir (Zhao vd. 2019). Çevrim ömrü ve verimlilik, sistemin uzun dönemli performansını ve ekonomik sürdürülebilirliğini belirler (Liu vd. 2020). Ayrıca, **maliyet** faktörü, özellikle ticari alanda başarılı olabilmek için önemli bir rol oynar, çünkü düşük maliyetli sistemler, büyük ölçekli uygulamalarda daha yaygın kullanılabilir (Xia vd. 2017).

Bununla birlikte, **güvenlik** faktörleri de elektrokimyasal sistemlerin performansında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, yüksek sıcaklıklarda veya hasar durumlarında yangın veya patlama riski taşıyan sistemlerde, güvenlik önlemlerinin titizlikle ele

alınması gerekmektedir (Dunn vd. 2011). Bu sebeple, batarya tasarımlarında kullanılan elektrotlar, elektrolitler ve diğer bileşenlerin güvenliğini sağlamak için yenilikçi malzemeler ve yönetim stratejileri geliştirilmiştir (Chen vd. 2019).

Günümüzde elektrokimyasal enerji depolama teknolojilerinin gelişimi, sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel taşlarından biri olarak görülmektedir (Liu vd. 2020). Artan enerji talebi, karbon emisyonlarının azaltılması hedefi ve elektrikli ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması, bu alandaki Ar-Ge çalışmalarını hızlandırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerjinin depolanması ve sistemlere entegre edilmesi için yüksek performanslı depolama sistemlerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu bağlamda, elektrokimyasal sistemlerin gelişimi, hem düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişi hem de enerji arz güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır (Buchmann 2018).

Gelecek yıllarda daha çevreci, daha yüksek performanslı ve daha ekonomik elektrokimyasal sistemlerin geliştirilmesi, enerji dönüşümünde önemli bir adım olacaktır. Bu teknolojilerin daha geniş bir ölçekte uygulanabilir olması hem enerji sektöründe hem de günlük yaşamda enerji verimliliğini artıracaktır (Zhao vd. 2019). Ayrıca, sürdürülebilir malzemeler ve geri dönüşüm süreçleri üzerine yapılan çalışmalar, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır (Feldman vd. 2015).

2.1.3 Elektriksel Enerji Depolama Sistemleri

Elektrik enerjisinin depolanması, enerjinin negatif ve pozitif elektrik yüklerinin ayrılmasıyla depolandığı kapasitörlerle ilgilidir (Callahan ve Acorn 2019). Bu mekanizmaların esas olarak çok geçici koşullar altında, nispeten kısa süreler için ve bazen yüksek oranlarda mütevazı miktarlarda enerji depolamanın gerekli olduğu durumlara uygulanabilir olduğunu göreceğiz (Nair 2018). Bu nedenle, bu uygulamalar depolanabilecek enerji miktarından ziyade hızlı kinetik ve yüksek güce vurgu yapmaktadır (Chan 2017). Çok uzun bir kullanım ömrü de genellikle çok önemlidir (Lee 2019). Bu yöntemlerle depolanabilecek enerji miktarının genellikle kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle depolanabilecek enerji miktarından çok daha az olduğunu daha sonra göreceğiz (Nguyen 2020).

Bu tür bir ihtiyacı karşılamak için iki genel yaklaşım vardır. Bunlardan biri, enerjinin bir kapasitörünkine benzer özelliklere sahip malzeme ve konfigürasyonlarda depolandığı elektrikli cihaz ve sistemlerin kullanımını içerir (Dutton ve Nelson 2020); diğeri ise elektromıknatıslar kullanarak enerji depolamaktır (Zeng ve Zhou 2021), bu konu **2.1.4 Manyetik Enerji Depolama Sistemleri** kısmında ele alınmıştır.

2.1.3.1 Kapasitörler

Enerji, elektrik alanları içindeki malzemelerde ve kapasitör adı verilen cihazlardaki arayüzlerin yakınında tersine çevrilebilir şekilde depolanabilir. Bu tipte iki genel cihaz türü vardır ve bunlar önemli pratik parametreler, yani depolanabilen enerji miktarı ve emilip serbest bırakılma hızı için geniş bir değer aralığına sahip olabilir.

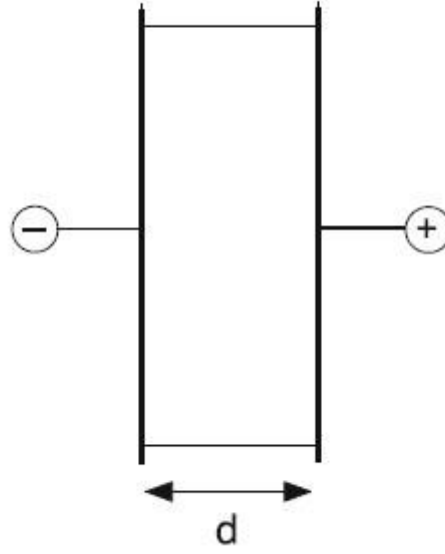
- **Paralel plakalı bir kapasitördeki enerji**

Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilen gibi bir paralel plakalı kapasitörde, iki metal plaka arasına bir dielektrik malzeme yerleştirilir. Plakalar arasında bir elektrik potansiyel farkı uygulanırsa, aralarındaki malzeme boyunca bir elektrik alanı oluşacak ve içerdiği negatif ve pozitif yüklerin yerel olarak yer değiştirmesine neden olacaktır.

Bir d mesafesi ile ayrılmış A alanlı kondansatör plakaları arasındaki bir malzemede W_C depolanan enerji

$$W_C = \frac{1}{2} \epsilon A \frac{V^2}{d} \quad (2.4)$$

ile verilir; burada ϵ plakalar arasındaki malzemenin geçirgenliği ve V uygulanan voltajdır.



Şekil 2. 3 Basit bir paralel plakalı kondansatörün şematik görünümü

Çizelge 2. 3 Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki bağıl geçirgenlik değerleri

Malzeme	ϵ_r
Naylon	2,1
Teflon	2,6
Bakalit	4,9
Yumuşak cam	6-7
Damıtılmış su	80
Yüksek geçirgenliğe sahip oksitler	10 000 ila 15 000

Bu konfigürasyonun C kapasitesi şu şekilde verilir

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

ve

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.6)$$

Burada ϵ_r malzemenin bağıl geçirgenliğidir ve ϵ_0 vakumun geçirgenliğidir, metre başına $8,854 \times 10^{-12}$ F. Geçmişte, geçirgenlik bazen dielektrik sabiti olarak adlandırılırdı.

Çeşitli malzemelerin bağıl geçirgenlik değerleri Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Son iki denklemleri ilk denklemde yerine koyarak, kondansatörde depolanan enerji aşağıdaki gibi yazılabilir

$$W_c = \frac{1}{2} C V^2 \quad (2.7)$$

Bir kondansatörde depolanan yük Q , kapasitansı ve voltajı ile ilişkili olduğundan

$$Q = C V \quad (2.8)$$

depolanan enerji şu şekilde de ifade edilebilir

$$W_c = \frac{1}{2} Q V \quad (2.9)$$

İlginç bir şekilde, böyle bir kondansatörde depolanan enerji miktarı, kondansatör plakaları arasındaki dielektrik malzemenin hacmiyle ters orantılıdır. Bu sezgiye aykırıdır, çünkü normalde madde enerji taşıyorsa, madde miktarı ne kadar büyükse, içerdği enerji miktarının da o kadar büyük olacağını düşünülür.

2.1.3.2 Ültra-kapasitörler ve Süper-kapasitörler

Elektrotlar arasındaki boşluk sıvı veya hatta katı elektrolit özelliklerine sahip bir malzeme içeriyorsa, böyle bir paralel plaka konfigürasyonunun davranışı çok farklı hale gelir. Bu durumda yük, elektronik olarak iletken malzemenin iyonik olarak iletken malzemeyle bulunduğu arayüzey bölgesinde depolanır. Pozitif ve negatif dengeleyici yükler arasındaki fiziksel ayrım çok küçüktür. Bu, kalınlığı atomlar arası mesafeler mertebesinde olan ve

birim alan başına çok daha büyük miktarlarda yük depolanmasına izin veren paralel plakalı bir kapasitörün eşdeğeri olarak görülebilir.

Bu tür yerel yapıya sahip cihazlara elektrokimyasal kapasitörler denir ve iki genel türü vardır. Birincisi, elektrolit/elektronik malzeme arayüzünde veya yakınında elektriksel çift katmanda yük depolamayı içerir. Bu cihazlara **ültra-kapasitörler** denir. Diğer tür ise atomik türlerin elektriksel olarak iletken katı elektrotun kristal yapısına geçici olarak geri dönüşümlü emilimini içerir ve bu cihazlara **süper-kapasitörler** denir.

Bu mekanizmaların her ikisi de daha önce gördüğümüz gibi, plakaları arasında dielektrik malzemeler bulunan kapasitörlerden çok daha yüksek kapasitans değerlerine yol açabilir.

2.1.4 Manyetik Enerji Depolama Sistemleri

Elektromıknatısların enerji depolama kapasitesi, karşılaştırılabilir boyuttaki kapasitörlerinkinden çok daha fazla olabilir (Gupta 2010). Bu cihazlarda akımı taşımak için süper iletken alaşımların kullanılması olasılığı özellikle ilgi çekicidir (Smith ve Jones 2015). Ancak bu konuyu ele almadan önce, manyetik sistemlerde enerji depolamanın temel yönlerini incelemek gerekir.

2.1.4.1 Manyetik Alana Maruz Kalan Bir Malzemedeki Enerji

2.1.3 Elektriksel Enerji Depolama Sistemleri kısmında, d aralıklı ve A alanlı paralel plakalı bir kapasitörde, kapasitör boyunca bir V gerilimi uygulandığında depolanan enerjinin aşağıdaki gibi yazılabileceği gösterilmişti

$$W_c = \frac{1}{2} \epsilon A \frac{V^2}{d} = \frac{1}{2} C V^2 \quad (2.10)$$

ϵ , elektrik alanı tarafından plakalar arasındaki malzemenin polarizasyonunun bir ölçüsü olan geçirgenliktir ve C kapasitanstır.

Enerji manyetik malzeme ve sistemlerde de depolanabilir. Benzer ilişki şöyledir

$$W_M = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (2.11)$$

Burada H manyetik alanın gücüdür ve μ geçirgenliktir, geçirgenliğe benzer şekilde alandaki malzemeye bağlı bir sabittir. H manyetik alanı bazen mıknatıslanma alanı veya mıknatıslanma kuvveti olarak adlandırılır.

Kapasitörlerdeki geçirgenlik denklemine eşdeğer bir ilişki de vardır:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.12)$$

Burada μ_r manyetik alanda bulunan malzemenin bağıl geçirgenliğidir ve μ_0 vakumun geçirgenliğidir, metre başına $1,257 \times 10^{-6}$ Henry.

Bir malzeme manyetik bir alana yerleştirildiğinde, sonuç, genliği malzemenin μ geçirgenliğine bağlı olan bir iç manyetik alandır.

Bazen manyetik indüksiyon veya manyetik akı yoğunluğu olarak adlandırılan bu indüklenmiş iç manyetik alan, B , aşağıdaki formülle dış alan H ile ilişkilidir

$$B = \mu H \quad (2.13)$$

Depolanan manyetik enerji denklemi bu nedenle dış alan H yerine malzeme içinde indüklenen manyetik alan B cinsinden aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir

$$W_M = \frac{1}{2\mu} B^2 = \frac{1}{2} BH \quad (2.14)$$

2.1.4.2 Süperiletken Manyetik Sistemlerde Enerji Depolama

Harici bir H alanına maruz kalan malzemelerin manyetik enerjisi bu alanın gücüne bağlıdır. Eğer H alanı çevreleyen spiral bir iletkenle akan bir akım tarafından üretiliyorsa,

büyüklüğü

$$H = 4\pi nI \quad (2.15)$$

denkleme göre akımla orantılıdır. Burada n spiralın birim uzunluğu başına dönüş sayısı ve I akım yoğunluğudur.

Açıktır ki, büyük miktarlarda enerji depolanacaksa yüksek akımlar arzu edilir. Bununla birlikte, metal bir telden akım geçişi, aşağıdaki denkleme göre Joule etkisi ile ısınmaya neden olur.

$$ISI = I^2 \quad (2.16)$$

Bu nedenle, akımı taşımak için neredeyse hiç direnci olmayan bir süper iletken malzeme kullanmayı düşünmek arzu edilir. Bu tür sistemler genellikle toroidal bir süper iletken bobin içinde yüksek geçirgenliğe sahip yumuşak bir manyetik malzeme ile tasarlanır (Ferrier 2008).

Enerji, bir DC güç kaynağı kullanılarak böyle bir sisteme enjekte edilebilir. Süper iletken akım oluştuğunda, güç kaynağının bağlantısı kesilebilir. Enerji daha sonra süper iletken bobinin içindeki manyetik malzemede depolanır ve burada yeniden güç vermeye gerek kalmadan istenildiği kadar uzun süre muhafaza edilebilir (Tixador 2008).

Süper iletken DC elektromanyetik depolama sistemine ve bu sistemden enerji aktarımı için bir doğrultucu, invertör ve özel yüksek güçlü AC/DC dönüştürme kontrol sistemleri gerekir. Böyle bir güç koşullandırma sistemi tipik olarak her yönde %2-3'lük bir enerji kaybına neden olur.

Dikkate alınması gereken bir başka özellik de mevcut büyük manyetik alanlar nedeniyle malzemeler üzerinde etkili olan önemli mekanik kuvvetlerin oluşmasıdır. Bu kuvvetlerin azaltılması genel sistemin maliyetini önemli ölçüde artırabilir.

Süper iletken malzemeler belirli bir kritik sıcaklığın altında tutulmalıdır. Kriyostatik bir buzdolabı kullanarak gereken düşük sıcaklığı korumak açıkça enerji gerektirir. Diğer bir komplikasyon ise, süperiletken malzemelerin, çevreleyen H alanının değeri kritik alan olarak adlandırılan kritik bir değerden büyükse süperiletkenlik özelliklerini kaybetmeleridir. Alana süper iletkendeki akım neden olduğundan, bu sınırlamaya bakmanın başka bir yolu da kritik alan yerine kritik akımdan bahsetmektir.

Bu sistemler genellikle kısa süreli enerji depolamada, örneğin bir iletim ve dağıtım sistemine giden güç kaynağının kalitesini ve istikrarını iyileştirmek için kullanılır; burada hızlı tepki ve kısa sürede elde edilebilen yüksek güç açık bir avantaj olabilir.

Sıcaklık veya alanın çok yükselmesi ve böylece malzemenin artık süper iletken olmaması durumunda ciddi bir potansiyel tehlike söz konusudur. Bu durumda direnci “normal” hale gelir.

Sonuç çok önemli ve tehlikeli Joule ısınması olabilir. Büyük ölçekli süper iletken enerji depolama cihazlarıyla ilgili güvenlik hususları genellikle bunların yeraltının derinliklerindeki mağaralara yerleştirilmesi gerektiği anlamına gelir.

2.1.5 Mekaniksel Enerji Depolama Sistemleri

Malzeme sistemleri üzerine kuvvet uygulanmasından kaynaklanan iki temel enerji depolama türü vardır. Bunlardan biri potansiyel enerjideki değişiklikleri, diğeri ise kütlelerin hareketindeki değişiklikleri ve dolayısıyla kinetik enerjiyi içerir.

2.1.5.1 Potansiyel Enerji Depolama Sistemi

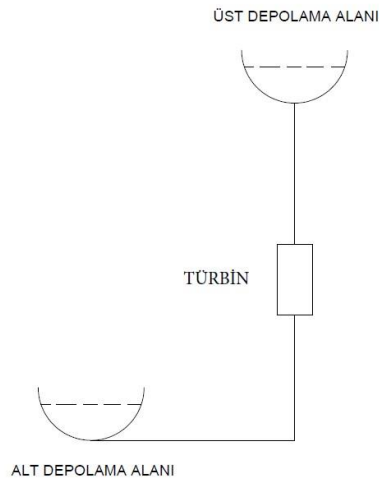
Potansiyel enerji depolama, bir nesnenin konumu veya fiziksel durumuna bağlı olarak enerji biriktirme yöntemidir. Bu enerji formu, dış bir kuvvete karşı yapılan işin sistem içinde saklanması ile oluşur ve ihtiyaç duyulduğunda mekanik enerjiye dönüştürülebilir. En yaygın örneklerden, yerçekimi potansiyel enerjisine dayanan **pompalanmış**

hidroelektrik depolama ve gazların elastik özelliklerinden yararlanan **sıkıştırılmış gaz depolama** sistemleridir. Potansiyel enerji, özellikle büyük ölçekli enerji yönetiminde, yük dengeleme ve yenilenebilir enerji entegrasyonu açısından stratejik bir rol oynamaktadır (Zhao vd. 2018). Ayrıca yaylar ve ağırlıklar gibi çeşitli mekanik sistemlerde de potansiyel enerji depolama prensipleri kullanılmaktadır (Gonzalez 2019).

- **Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemi**

Hidroelektrik depolama ve gücün bir modifikasyonuna “pompalanmış hidroelektrik” depolama denir. Bu durumda genel konfigürasyon iki farklı yükseklikte su depolama tesislerini içerir. Doğal ya da yapay olarak inşa edilmiş olabilirler ve çok çeşitli boyutlara sahip olabilirler. Bunlar yeraltı mağaraları, eski maden shaftları, daha önce petrol tarafından işgal edilmiş hacimler veya yeni kazılmış hacimler olabilir.

Su, basit hidroelektrik enerji sistemlerinde olduğu gibi, üstteki türbinden alttaki türbine akıtılarak elektrik üretilir. Ancak daha sonra su daha yüksekteki depolama alanına geri pompalanarak sistem etkin bir şekilde yeniden şarj edilebilir. Bazı durumlarda bu, iki yönlü türbinlerin kullanımını içerir. Elektrik fiyatı günün veya haftanın farklı zamanlarında önemli ölçüde değişiyorsa bu mantıklı olabilir. Bu tür bir enerji depolama, özellikle günlük pik tıraşlama ve yük dengelemenin yanı sıra enerji talebindeki haftalık ve mevsimsel değişimlerle bağlantılı olarak faydalı olabilir.



Şekil 2. 4 Pompalanmış hidroelektrik enerji depolama sistemin şematik gösterimi

Büyük ölçekli su tahrikli türbinlerin verimliliği oldukça yüksek, hatta %95'in üzerinde olabilirken, çift çevrimli tersinir depolama sisteminin verimliliği tipik olarak yaklaşık %80'dir. Elbette rezervuarların birinden veya her ikisinden su buharlaşması, türbin etrafındaki sızıntı ve hareket eden suyun sürtünmesinden kaynaklanan kayıplar gibi başka kayıplar da vardır.

- **Sıkıştırılmış gaz depolama sistemi**

Bisiklet lastiğini şişirmek zorunda kalan herkes bu işlemin iş gerektirdiğini ve basınç arttıkça gereken kuvvetin de arttığını bilir. Bir sızıntı olursa veya supap açılırsa, lastikte depolanan gaz serbest kalır. Bu, enerjinin bir gazda depolanmasına basit bir örnektir.

Katıların elastik özelliklerine benzer bir şekilde gazların elastik özelliklerinden yararlanarak enerji depolamak mümkündür. Bu, ideal gaz yasası veya ideal bir gazın hal denklemi göz önünde bulundurularak kolayca anlaşılabilir.

$$PV = nRT \quad (2.17)$$

Burada P gazın mutlak basıncı, V onun hacmi, n mol sayısı, R gaz sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. R değeri $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ veya $0,082 \text{ l atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'dir. Bu son değer kullanılarak, bir mol gazın hacmi 273 K veya 0 C'de 22,4 l olarak kolayca bulunabilir.

Basınç mekanik hasara yol açacak kadar büyük olmadığı sürece gazlar sıkıştırılabilir ve basit mekanik tanklarda depolanabilir. Bu, araçların tahriki için geliştirilmekte olan yakıt hücrelerinde yakıt olarak kullanılan hidrojenin muhafaza edilme yollarından biridir.

Gazların yeraltı boşluklarında yüksek basınç altında depolanması da mümkündür, gaz geçirmezlerse. Bu durum bazı büyük tuz mağaraları, tükenmiş petrol kuyuları veya yeraltı akiferleri için geçerlidir.

Bu işlem genellikle hızlı bir şekilde yapılırsa adyabatik olmaya yakın olduğundan,

sıkıştırma sırasında ısı verilir ve genişleme sırasında soğutma olur. Bu sorunun üstesinden gelmek için bir tür ısı transfer sistemi kullanılmalıdır. Bu ciddi bir husus olabilir. Örneğin, 70 atm basınca sıkıştırma yaklaşık 1 000 K sıcaklık üretebilir. Bu da bir basınçlı depolama sisteminin genel verimliliğinin önemli ölçüde azalmasına neden olabilir.

2.1.5.2 Kinetik Enerji Depolama Sistemi

Potansiyel enerjiye ek olarak kinetik enerji depolamak da mümkündür. Bu, kütlenin hareketiyle bağlantılı olan enerjidir. Bu konu iki bölümde ele alınacaktır: bir kütlenin doğrusal hareketi ve bir kütlenin dönme hareketi.

- **Doğrusal kinetik enerji**

Doğrusal hareket halindeki bir cisimle ilişkili kinetik enerji E_{kin} ,

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir; burada m cismin kütlesi ve v doğrusal hızıdır.

Basit bir çekiç bu prensibin bir örneğidir. Hareket eden kütlelerinin kinetik enerjisi çivi çakmak ve diğer amaçlar için kullanılır.

Biraz daha egzotik bir örnek ise hibrid arabalardır. Günümüzün bazı içten yanmalı/elektrikli hibrid araçlarında, güç aktarma organlarındaki bir elektrik motoru/jeneratörü tekerlekleri tahrik eder. Bu motor yüksek kapasiteli bir bataryadan (bazen 'süper kapasitör' olarak da adlandırılır) güç alır ve gerektiğinde verimli bir içten yanmalı motor tarafından şarj edilir.

Araç rölantide çalışırken veya fren yaparken motor/jeneratör ters yönde çalışır ve aracın kinetik enerjisinin bir kısmı aküye geri beslenen elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu enerji daha sonra tahrik için kullanılabilir. Geri kazanılan enerji miktarı genellikle şehir

içi sürüşlerde temel tahrik enerjisinin yaklaşık %10'unu temsil eder. Bu modelin bir çeşidi de araç kullanılmadığında akü tarafından tüketilen net enerjinin bir elektrik şarjı ile değiştirildiği “plug-in hibrid”dir. Bu, örneğin geceleri bir evin elektrik sistemine bağlanmayı içerebilir.

- **Dönme kinetik enerji (Volan)**

Kinetik enerji, bir cisim döndürüldüğünde de mevcuttur. Bu durumda,

$$E_{kin} = \left(\frac{1}{2}\right) I \omega^2 \quad (2.19)$$

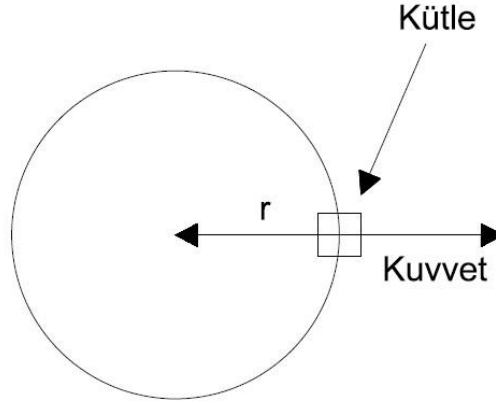
burada I eylemsizlik momenti ve ω açısal hızdır.

Volanlar kinetik enerjiyi depolamak için kullanılabilir ve bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için hazır yöntemler vardır. Dönen bir cismin eylemsizlik momenti

$$I = \int \rho(x) r^2 dx \quad (2.20)$$

olarak ifade edilebilir; burada $\rho(x)$ kütle dağılımı, r ise dönme merkezinden olan uzaklıktır.

Dolayısıyla, dönen bir sistemdeki kinetik enerjinin büyüklüğü, dönme hızı ω büyükse ve I büyükse artar. İkincisi, büyük bir r değerinde büyük bir kütleye sahip olarak elde edilebilir.



Şekil 2. 5 Dönen bir kütleye etki eden merkezkaç kuvvetinin şematik gösterimi

Volanın yapıldığı malzemenin mukavemeti, merkezkaç kuvvetine dayanabilmesi gerektiğinden dikkate alınmalıdır. Bu, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi şematik olarak temsil edilebilir.

Merkezkaç kuvveti,

$$Kuvvet = (kütle)(hızlanma) = mr\omega^2 \quad (2.21)$$

ile verilir.

Volanlar farklı şekillere sahip olabilir. Bir optimizasyon stratejisi, gerilimin her yerde aynı olduğu bir disk kullanmaktır.

2.1.6 Isıl (Termal) Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji depolama (TED) sistemleri, ısıyı daha sonra kullanılmak üzere geçici olarak saklamayı amaçlayan teknolojilerdir. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının süresiz doğasını dengelemek, enerji verimliliğini artırmak ve enerji arz-talep uyumsuzluklarını azaltmak için kritik bir rol oynamaktadır (Khan vd. 2019). Genel olarak üç ana başlık altında incelenir: **duyulur ısı depolama**, **gizli ısı depolama** ve **termokimyasal enerji depolama** (Márquez vd. 2020).

Duyulur ısı depolama, sıcaklık farkı yoluyla enerji saklarken, gizli ısı depolama faz değişim malzemeleri (PCM) kullanarak daha yüksek enerji yoğunlukları sunar (Zhang vd. 2018). Termokimyasal enerji depolama ise kimyasal reaksiyonlar yoluyla en yüksek enerji yoğunluklarını sağlayarak uzun vadeli ve kayıpsız depolama imkânı sunar (Santos vd. 2017). Bu sistemler, enerji dönüşüm ve yönetim süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Khan vd. 2020).

2.1.6.1 Duyulur Isı

Enerji, bir malzemeye sadece daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılarak verilebilir. Bu sıcaklığının değişmesinde rol oynayan enerjiye “duyulur ısı” denir ve miktarı basitçe özgül ısı ile sıcaklık değişiminin çarpımıdır (Yildirim ve Aydın 2019).

Bu duyulur ısı, radyasyon, konveksiyon veya iletim yoluyla başka, daha soğuk bir malzemeye veya çevreye aktarılabilir (He vd. 2017). Dolayısıyla bu, enerjiyi ısı şeklinde depolamak ve tekrar aktarmak için kullanılan bir yöntemdir. Basit bir örnek olarak, uyumadan önce yatağı ısıtmak için sıcak bir taş ya da sıcak su şişesi kullanmak gibi geleneksel bir yöntem verilebilir (Chen ve Zhang 2018).

Bu tür enerji depolama, yaşam veya çalışma alanlarındaki sıcaklığı kontrol etmek için de kullanılmıştır (Li ve Xu 2020). Bazı durumlarda ihtiyaç duyulan depolama malzemesi miktarı oldukça büyük olabilir, bu nedenle maliyeti konusunda bariz bir endişe vardır (Gao vd. 2019). Bu da nispeten basit ve ucuz malzemelerin kullanılmasına yol açmaktadır. Bazı örneklerin ısı kapasitelerine ilişkin veriler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Çizelge 2. 4 Bazı yaygın malzemelerin termal özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg m^{-3})	Özgül ısı ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Hacimsel termal kapasite ($10^6 \text{ J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
Kil	1 458	879	1,28

Çizelge 2. 4 (Devam) Bazı yaygın malzemelerin termal özellikleri

Tuğla	1 800	837	1,51
Kumtaşı	2 200	712	1,57
Ahşap	700	2 390	1,67
Beton	2 000	880	1,76
Cam	2 710	837	2,27
Alüminyum	2 710	896	2,43
Çelik	7 840	465	3,68
Manyetit	5 177	752	3,69
Su	988	4 182	4,17

Bu malzemelerin her birinin bazı avantajları ve bazı dezavantajları vardır

Bir sıcaklıktaki belirli bir malzeme kütlesinden daha düşük sıcaklıktaki başka bir kütleye aktarılabilen q ısı miktarı

$$q = \rho C_p V \Delta T \quad (2.22)$$

ile verilir.

Burada ρ yoğunluk, C_p sabit basınçtaki özgül ısı, V depolama malzemesinin hacmidir ve ΔT sıcaklık farkıdır.

Suyun özgül ısısı, diğer pek çok malzemenin iki katından fazladır; bu durum, onu ısı depolama açısından oldukça verimli bir malzeme haline getirir. Ancak, su yalnızca sınırlı bir sıcaklık aralığında (yaklaşık 5–95 °C) etkin biçimde kullanılabilir (Zalba vd. 2003). Bu nedenle su, özellikle yaşam alanlarının ısıtılması ve soğutulması ile ilgili uygulamalarda cazip bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Dincer ve Rosen 2011). Buna karşın, ucuz ve yaygın olarak bulunan dökme katı malzemelerin bir kısmı daha geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabilmekte ve daha yüksek yoğunlukları sayesinde daha kompakt depolama çözümleri sunabilmektedir (Cabeza vd. 2010). Ek olarak, bu malzemelerin ısıl iletkenlikleri de dikkate alınmalıdır çünkü bu özellik, enerjinin

malzeme tarafından ne kadar hızlı emileceği veya salınacağı üzerinde doğrudan etkilidir (Mehling ve Cabeza 2008).

Sistem ne kadar iyi yalıtılırsa yalıtılsın, duyulur ısı depolama yönteminde her zaman belirli oranda ısı kayıpları meydana gelir. Bu nedenle, termal yalıtım özellikle depolama süresi uzun olduğunda kritik bir öneme sahiptir (Farid vd. 2004). Çevreye olan ısı kaybı, depolama kabının yüzey alanı ve sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Buna karşın, toplam depolama kapasitesi hacimle orantılı olduğundan, yüzey alanı/hacim oranı düşük olan yani küresel formdan sapmayan büyük hacimli tankların kullanılması, ısı kayıplarını azaltma açısından daha avantajlıdır (Tatsidjodoung vd. 2013).

2.1.6.2 Gizli Isı

Enerji depolamak için bir başka mekanizma, kimyasal bileşimi değiştirmeden faz geçişlerini kullanmaktır. Bu yöntem, gizli ısı depolama teknolojilerinin temelini oluşturur. Örneğin, basit bir metal olan alüminyumun erime noktası civarında, entropi değerinde ani bir artış ve buna bağlı olarak entalpi değişimi görülürken, Gibbs serbest enerjisinde bir değişiklik gözlemlenmez (Dincer ve Rosen, 2011). Bu durum, katı ve sıvı fazları aynı kimyasal bileşime sahip olan, uyumlu şekilde eriyen element ve bileşiklerdeki faz geçişlerinin ayırt edici bir özelliğidir (Mehling ve Cabeza, 2008).

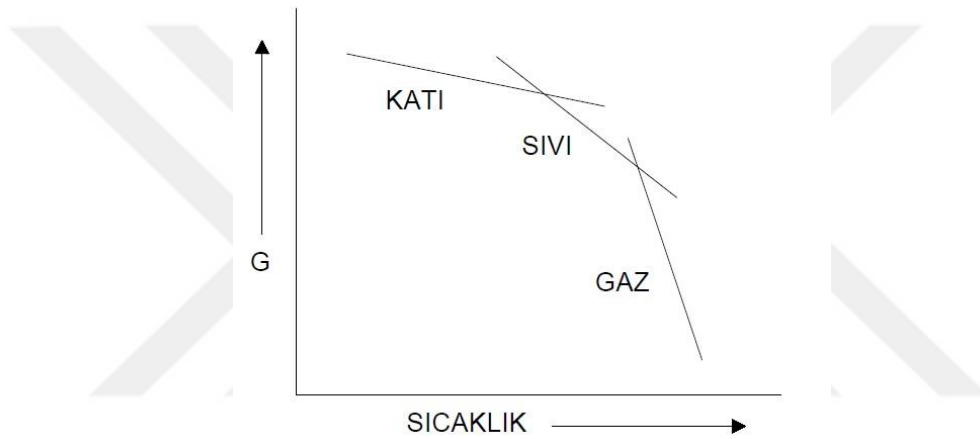
Aynı zamanda her iki fazın da katı olduğu faz geçişleri de mümkündür. Örneğin, titanyumun 882°C'de alfa ve beta fazları arasında bir geçişi bulunur. Düşük sıcaklıklarda alfa fazı altıgen kristal yapıdayken, yüksek sıcaklıklarda beta fazı gövde merkezli kübik yapıya sahiptir. Bu iki faz farklı konfigürasyonel entropilere sahip olduğundan, aralarında belirgin bir entalpi farkı oluşur (Zalba vd. 2003). Gizli ısı, bu tür sistemlerde izotermal olarak, yani sabit sıcaklıkta emilir ya da salınır. Bu da gizli ısı sistemlerini, karşılaştırılabilir kapasitelerdeki duyulur ısı sistemlerine kıyasla çok daha kompakt hâle getirir (Farid vd. 2004).

Faz değişimi üç hâl arasında da gerçekleşebilir: düşük sıcaklıklarda katı, orta sıcaklıklarda sıvı ve yüksek sıcaklıklarda gaz. Bu durumda sistem iki faz geçişine

uğrayabilir ve her iki durumda da entropi ve entalpide önemli değişimler meydana gelir. Ancak faz geçiş sıcaklıklarında sistem dengede olduğu için Gibbs serbest enerjisi sürekliliğini korur (Tatsidjodoung vd. 2013).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 0 \quad (2.23)$$

Üsteki formüle göre, geçiş sıcaklığında ΔH ısı içeriğindeki değişim, o sıcaklıktaki $T\Delta S$ 'ye eşittir.



Şekil 2. 6 Suyun Gibbs serbest enerjisinin sıcaklığa bağımlılığının şematik gösterimi

Gibbs serbest enerjisinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak eğimi entropinin negatif değeri ile orantılıdır ve bu değer farklı yapılara sahip oldukları için farklı fazlarda farklıdır. Bu olgu Şekil 2.6'te şematik olarak gösterilmiştir.

2.1.6.3 Termokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Termokimyasal Enerji Depolama (TCES), ısıнын kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla geri kazanılabilir bir biçimde saklanmasına dayalı gelişmiş bir enerji depolama yöntemidir. Bu sistemlerde enerji, genellikle tersinir (geri dönüşümlü) endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar yoluyla kimyasal bağlar içinde depolanır ve gerektiğinde geri kazanılır. Diğer ısı depolama sistemlerinden farklı olarak termokimyasal depolama sadece sıcaklık

değişimiyle değil kimyasal dönüşüm yoluyla enerji depolar. Bu sayede hem enerji yoğunluğu artırılmış olur hem de uzun vadeli ve kayıpsız enerji saklama imkânı sağlanır. Bu yöntemde genellikle bir reaktant madde ısıtılarak ayrıştırılır (endotermik süreç). Ayrıştırılan bu ürünler daha sonra kontrollü şartlarda tekrar bir araya getirilerek ekzotermik bir tepkimeyle enerji geri kazanılır. Bu tür sistemlerin tasarımında kullanılan maddelerin reaksiyon kinetikleri, enerji yoğunlukları ve çevrim sayısındaki kararlılıkları büyük önem taşır. Uygulamada en yaygın olarak kullanılan reaksiyonlar arasında metal oksit redüksiyon/oksidasyon tepkimeleri ve tuzların hidratasyon/dehidratasyon reaksiyonları yer alır.

Termokimyasal enerji depolama sistemlerinin en belirgin avantajlarından biri yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Bu sistemler hem duyulur hem de gizli ısı depolama yöntemlerinden çok daha fazla miktarda enerji depolayabilirler. Ayrıca kimyasal ürünlerin ayrı ayrı saklanabilmesi uzun vadeli enerji depolama ihtiyacını karşılamak açısından da büyük bir avantaj sağlar. Bu avantaj, özellikle mevsimsel enerji depolama veya şebeke dışı yenilenebilir enerji sistemlerinde kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte, termokimyasal sistemlerin yaygınlaşması önünde bazı teknik engeller de mevcuttur. Reaktantların stabilitesi, reaksiyonların geri dönüşebilirliği, ısı transferi verimliliği ve reaksiyon hızları gibi parametreler, sistemlerin performansını doğrudan etkiler. Ayrıca ekonomik faktörler de göz önüne alındığında, bu sistemlerin henüz ticarileşme aşamasında bazı gelişmelere ihtiyaç duyduğu açıktır.

Sonuç olarak termokimyasal enerji depolama sistemleri, gelecekte özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları, santral ölçekli ısı depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Devam eden araştırmalar ve malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler sayesinde bu teknolojinin enerji altyapısında daha yaygın bir şekilde kullanılması mümkün hale gelebilecektir.

2.2 Mevcut Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Mevcut enerji depolama teknolojileri, farklı enerji ihtiyaçlarına göre çeşitlenmiştir. Her

bir teknolojinin avantajları ve sınırlamaları, belirli uygulamalar için farklı çözümler sunmaktadır. Kapasitörler, süperkapasitörler ve SMED, hızlı tepki ve yüksek güç sağlarken, PHS ve lityum-iyon piller daha uzun süreli enerji depolama için uygundur.

Termal enerji depolama sistemleri ise özellikle ısı enerji depolamak için ideal bir çözüm sunmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin gelişmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve enerji altyapısının sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu nedenle, farklı enerji depolama çözümleri arasında seçim yaparken, depolama kapasitesi, maliyet, verimlilik ve çevresel etki gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Mevcut sistemlerin gelişmesi ve yeni teknolojilerin devreye girmesi ile daha verimli, ekonomik ve çevre dostu enerji depolama çözümleri mümkün olacaktır.

Çizelge 2. 5 Mevcut Enerji depolama teknolojilerinin özellikleri

Sistem	Nominal		Yoğunluk		Yaşam Süresi		Verim	Günlük
	Güç (MW)	Tipik Deşarj Zaman	Güç Yoğ. (W/l)	Enerji Yoğ. (Wh/l)	Yıl	Devir	(%)	Kendi Kendin e Deşarj (%)
Pompa Hidroelektrik	100- 5 000	1 – 24sa	0,1- 0,2	0,2-2	>50	>15 000	70- 80	Çok Küçük
Sıkıştırılmış Hava	5-300	1 – 24sa	0,2- 0,6	2-6	>25	>10 000	41-75	Küçük
Volan	0- 0,25	1sn – 1sa	5 000	20-80	15-20	104-107	80-90	100
Yakıt Pili	0-50	1sn – 24sa	0,2- 20	600	10-30	103-104	34-44	0
Süper- kapasitör	0-0,3	1msn – 1sa	(4- 12) *10 ⁴	10-20	4-12	>500 000	85-98	20-40

Çizelge 2. 5 (Devam) Mevcut Enerji depolama teknolojilerinin özellikleri

SMED	0,1-10	1msn-8sn	2.600	6	-	-	75-80	10-15
Bataryalar								
Kurşun Asit	0-20	1sn – 1sa	90-700	3 -15	3-15	250-1 500	75-90	0,1-0,3
NiCd	0-40	1sn – 1sa	75-700	5- 20	5- 20	1 500 – 3 000	60-80	0,2-0,6
Li-iyon	0-0,1	1dk – 1sa	1 300 – 10 000	5-100	5-100	600-1 200	65-75	0,1-0,3
NaS	0,05-8	1sn – 1sa	120-160	10-15	10-15	2 500–4 500	70-85	10 -20
VRB	0,03-3	1sn – 10sa	0,5-2	5-20	5-20	>10 000	60-75	Küçük
ZnBr ₂	0,05-2	1sn – 10sa	1-25	5-10	5-10	1 000-3 650	60-75	Küçük

Kaynak: Kuşdoğan 2017.

2.2.1 Enerji Depolama Fiyatları

Enerji depolama teknolojileri hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli olumlu etkiler sunmaktadır. Bu etkiler şunları içerir:

- Enerji talebindeki artış ve beklenen dalgalanmalar doğrultusunda rezerv güç santrallerinin yükünü hafifletme,
- Kısa süreli enerji dalgalanmalarını dengeleyerek ve elektrik kesintileri sırasında boşluğu doldurarak güç kesintilerinin maliyetlerini düşürme. Yenilenebilir enerji için sağlanan destek, bu tür enerji kaynaklarının değişkenliğini dengelemeye yardımcı olarak, gerektiğinde elektrik dağıtımına olanak sağlar. Depolama sistemlerinin sağladığı açık avantajlara rağmen, yenilenebilir enerji santrallerinin entegrasyonunda karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için

daha fazla çaba sarf edilmesi gerektiği aşıkardır.

Çizelge 2. 6 Enerji depolamanın sermaye fiyatı

Sistem	Sermaye		
	USD (kW)	USD (kWh)	USD (her devir için kWh)
PHED	600-1 200	5-100	0,1-1,4
SHED	400-800	2-50	2-4
Volan	250-350	1 000-5 000	3-25
Kurşun asit	300-600	200-400	20-100
Ni-Cd	500-1 500	800-1 500	20-100
Li-iyon	1 200-4 000	600-2 500	15-100
NaS	1 000-3 000	300-500	8-20
VRB	600-1 500	150-1 000	5-80
ZnBr	700-2 500	150-1 000	5-80
Yakıt pili	>10 000	-	6 000-10 000

Kaynak: Kuşdoğan 2017.

2.2.2 Hibridizasyon Kriterleri

Enerji depolama sistemlerinin teknolojileri, depolanan enerjinin türüne göre üç ana kategoriye ayrılabilir: mekanik, elektriksel ve kimyasal. Her bir kategori, farklı özellikler ve uygulamalara sahip çeşitli sistemleri içermektedir. Çizelge 2.5'te görüldüğü gibi, enerji depolama sistemleri genellikle iki ana kategoriye ayrılabilir: yüksek güç ve yüksek enerji teknolojileri.

Yüksek güç depolama sistemleri, genellikle kısa süreli yüksek enerji sağlama kapasitesine sahip olup, süperiletken manyetik enerji depolama, süper kapasitörler, volanlar ve yüksek güç bataryaları bu grupta yer alır. Bu sistemler, çok kısa süreler içinde büyük enerji akışları sağlayabilen sistemlerdir.

Buna karşılık, yüksek enerji depolama sistemleri, uzun süreler boyunca enerji

sağlayabilme kapasitesine sahiptir. Bu sistemler arasında pompalanmış hidroelektrik enerji depolama, sıkıştırılmış hava enerji depolama, yakıt hücreleri ve bazı batarya türleri bulunmaktadır. Çizelge 2.7, enerji depolama sistemlerini bu sınıflandırmalara göre daha ayrıntılı bir şekilde kategorize etmektedir.

Çizelge 2. 7 Yüksek güç ve yüksek enerji teknolojilerin sınıflandırılması

Yüksek Güç Aygıtları (Hızlı cevap)	Yüksek Enerji Aygıtları (Yavaş cevap)
Süper kapasitör	Pompalamalı hidro.
SMED	SHED
Volan	Yakıt pili
Batarya	Batarya

Batarya teknolojileri, geniş kapsamlı özelliklere sahip olmaları nedeniyle hem yüksek güç hem de yüksek enerji depolama aygıtları olarak sınıflandırılabilir. Bu bağlamda, yüksek enerjili cihazların hibridizasyonu ile daha fonksiyonel enerji depolama sistemleri elde etmek mümkündür.

Bilinen hibrit enerji depolama sisteminin arzulanan işleyişi şu şekildedir: Yüksek enerji aygıtı, uzun süreli enerji ihtiyacını karşılamakla birlikte, aynı zamanda kısa süreli güç taleplerini de karşılayabilmelidir. Bu teoriye dayanarak, olası tüm kombinasyonlar teknik açıdan uygulanabilirliği olmayan ve bazı sistem seviyesi sınırlamaları bulunanlar da dahil çizelge 2.8'te listelenmiştir.

Çizelge 2. 8 Teorik hibrid enerji depolama sistemlerin konfigürasyonları

Enerji sağlayıcı	Güç sağlayıcı
Batarya	Süper kapasitör
	SMED
	Volan
SHED	Süper kapasitör
	SMED
	Volan
	Batarya

Çizelge 2. 8 (Devam) Teorik hibrit enerji depolama sistemlerin konfigürasyonları

Yakıt pili	Süper kapasitör
	SMED
	Volan
	Batarya
Pompalamalı hidroelektrik	Süper kapasitör
	SMED
	Volan
	Batarya

2.2.3 Yenilenebilir Enerji Sistemlerindeki Hibrit Enerji Depolama Uygulamaları

Şebekelerde, yenilenebilir enerji kaynakları aralıklı yapıları nedeniyle güç kalitesi, güvenilirlik ve kararlılık gibi sorunlara yol açabilir. Bu tür problemlerle başa çıkabilmek için, enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji entegrasyonu ve düzleştirme etkileri üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Yenilenebilir enerjinin dalgalanmalarını ortadan kaldırmak amacıyla depolama aracı olarak bataryaların kullanımı önerilmektedir. Ancak, yenilenebilir kaynakların aralıklı yapısından dolayı bataryalar kullanıldığında, özellikle tam ve kısmi şarj/deşarj döngüleri sırasında bazı sorunlar ortaya çıkabilir.

Bu sorunlar, batarya ömrü üzerinde olumsuz bir etki yaratır ve sistem maliyetlerini artırır. Ayrıca, diğer yenilenebilir enerji sistemlerinde bataryalar dışında farklı depolama aygıtlarından, güç kalitesi bozulmalarında, kısa zaman periyotlarında daha hızlı tepki verebilen ve daha yüksek güç yoğunluğu ile karakterize edilen enerji depolama sistemleri, yüksek güç gereksinimlerine sahip olabilir. Bu nedenle, hibrit enerji depolama sistemlerinin kullanımı gereklidir. Şebekeye aralıklı yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile, hibrit enerji depolama sistemleri uzun süreli enerji dengelemesi, kısa süreli güç kalitesi iyileştirmeleri ve frekans regülasyonu sağlamak için uygulanabilir. Yenilenebilir enerji sistemlerinde hibrit enerji depolama sistemlerinin uygulamaları çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2. 9 Yenilenebilir enerji sistemlerinde HEDS uygulamaları

HEDS teknolojisi		HEDS uygulamaları
Enerji sağlayıcı	Güç sağlayıcı	Yenilenebilir enerji
Batarya	Süper kapasitör	Genel mikro şebeke
		Hibrid rüzgâr-fotovoltaik
		Rüzgâr
		Fotovoltaik
	SMED	Genel mikro şebeke
		Rüzgâr
	Volan	Genel mikro şebeke
		Rüzgâr
Yakıt pili	Süper kapasitör	Genel mikro şebeke
		Rüzgâr
		Fotovoltaik
	SMED	Genel mikro şebeke
	Batarya	Genel mikro şebeke
		Hibrid rüzgâr-fotovoltaik
		Fotovoltaik

Kaynak: Kuşdoğan 2017.

2.2.4 Yenilenebilir Enerji Sistemlerine Göre En Uygun Hibrid Enerji Depolama Yöntemi

Yenilenebilir enerji sistemlerinde yapılan çeşitli hibrit depolama kombinasyonları incelemeleri sonucunda, en uygun hibrit enerji depolama yöntemi olarak batarya-süper kapasitör kombinasyonu öne çıkmaktadır. Bu hibrit enerji depolama sistemlerinin sermaye fiyatlarına göre sıralaması şu şekildedir:

1. Batarya – Süper Kapasitör (1 800 USD/kWh)
2. Yakıt Pili – Süper Kapasitör (10 300 USD/kWh)
3. Yakıt Pili – Batarya (11 500 USD/kWh)

Sonuç olarak, çeşitli uygulamalarda hibrit enerji depolama sistemlerinin kullanımı, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından olumlu etkiler sağlayacaktır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle hibrid depolama sisteminde yer alan çeşitli elemanların özellikleri ve çalışma şekilleri tanıtıldı. Daha sonra sistemin enerji dengeleme kriterleri çıkarılıp, optimizasyon modeli tasarlanarak, örnek bir sistem boyutlandırıldı.

3.2 Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Örnek Bir Hibrid Depolama Sistemi Boyutlandırma

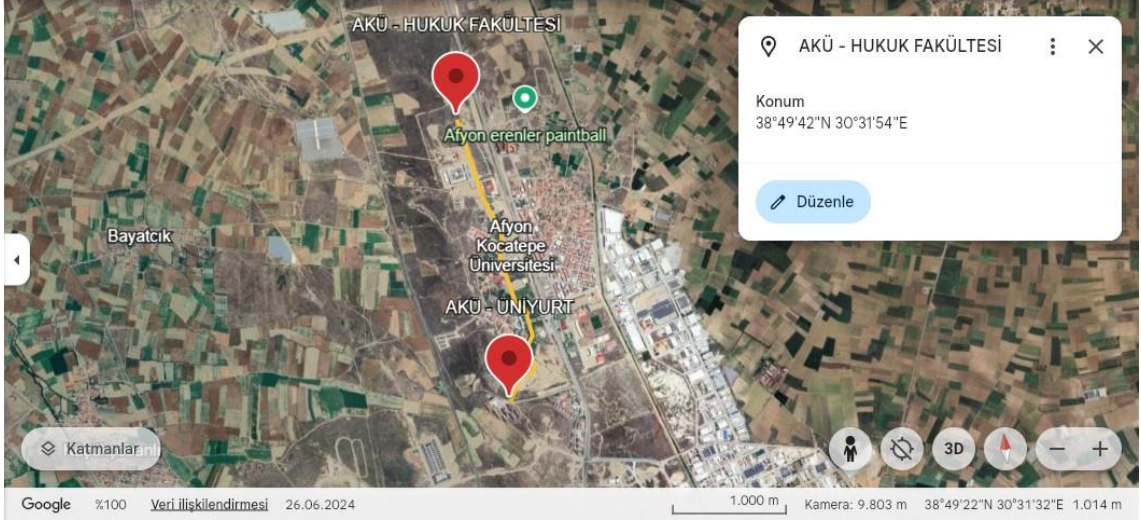
Bu tez çalışmasında, tasarlanan sistem Afyon Kocatepe Üniversitesi'nin Hukuk Fakültesi ve kampüs içerisinde bulunan yurdu (ÜNİYURT) arasındaki güzergâhın aydınlatmasını hedefe almıştır. Bu güzergâh yaklaşık **2 680 m** uzunluğuna sahip olan 3 m'lik şerit mesafesi ve 1 m kaldırım mesafesi olan çift yönlü bir yoldan oluşmaktadır. Sokak genişliği **8 m** olmasından dolayı gerekli aydınlatma seviyesi 15 – 20 lüks arasında çıkmaktadır, böylece 40 – 50 W'lik bir lambaya ihtiyaç duyulmaktadır. Aydınlatma direkleri ise yolun ortasında değil, yolun her iki tarafına kaldırımları da aydınlatacak şekilde düşünüldü. Yolun dar olmasından kaynaklı aydınlatma direklerin uzunluğu **8 m** olarak seçildi ve direkler arasındaki mesafe

$$\text{Direk arası mesafe} = \text{Direk uzunluğu} * 2,5 = 8 \text{ m} * 2,5 = 20 \text{ m} \quad (3.1)$$

olarak hesaplanmıştır. Aydınlatma direk sayısı ise

$$\text{Direk sayısı} = \left(\frac{\text{tek yön yolun mesafesi}}{\text{direk arası mesafe}} + 1 \right) * 2 = \left(\frac{2\,680 \text{ m}}{20 \text{ m}} + 1 \right) * 2 = 270 \quad (3.2)$$

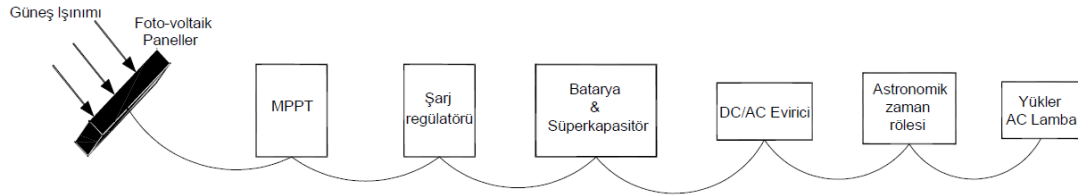
olarak hesaplandı ve **270 adet 50 W'lik** aydınlatma lambaya ihtiyaç duyuldu.



Resim 3. 1 AKÜ hukuk fakültesi ve Üniyurt güzergâh krokisi

3.2.1 Boyutlandırılacak Sistemin Elemanları

Tasarlanan sistemin enerji kaynağı güneştir. Güneş paneller vasıtasıyla enerji üretilir ve batarya ile Süper kapasitör'den oluşan hibrit depolama sistemimizde depolanır. Sistemde bulunan maksimum güç nokta izleyicisi üretilen enerjinin her zaman maksimumunu depolanmasını sağlar, batarya regülatörü ise depolama sistemin aşırı şarjdan korunmasını sağlamaktadır. Depolanan enerji, astronomik zaman rölesi tarafından belirlenen saatlerinde invertörler yardımıyla uygun bir alternatif akımına (AC) dönüşür ve bu sistemde yük olan aydınlatma lambaların beslemesini sağlar.



Şekil 3. 1 Boyutlandırılan sistemin bileşenlerinin blok şeması

3.2.1.1 Güneş Panelleri

Fotovoltaik (PV) hücreler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken aygıtlardır. Güneş ışığının yeterli düzeyde olduğu süre boyunca elektrik üretimi devam ederken, bu sistemlerin işletme maliyetleri oldukça düşüktür ve güvenli çalışma koşulları sunar (Şen 2014). Güneş panelleri, farklı boyut ve kapasitelerde piyasaya sunulmakta olup, genellikle 700 Wp'ye kadar olan çeşitli modeller mevcuttur. Ancak, bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olabilir. Önümüzdeki yıllarda teknolojik gelişmelerin maliyetleri azaltmasıyla birlikte kullanım oranlarının artacağı öngörülmektedir (EPIA 2016).

PV sistemler, şebekeden bağımsız küçük ve orta ölçekli yüklerin enerji ihtiyacını karşılamak açısından ekonomik bir çözüm sunar. Bu sistemlerin kullanım ömrü, kullanılan hücre teknolojisine bağlı olarak ortalama 10 ila 20 yıl arasında değişmektedir

(Fraunhofer ISE 2020). Güneş panelleri, çok sayıda fotovoltaik hücrenin seri bağlanmasıyla oluşturulur. Panellerin nominal gücü, belirli standart test koşulları altında elde edilen değerlere göre tanımlanır. Bu panellerin elektriksel davranışı, kendine özgü akım-gerilim (I-V) karakteristiğiyle ifade edilir (Green 2003).

Üretici firmalar, bu karakteristik eğrileri hazırlarken çeşitli çevresel koşulları sabit tutarak (örneğin rüzgâr ve sıcaklık) ışınım düzeylerinin etkisini analiz eder. Maksimum güç elde edebilmek için sistemin çalışma noktasının doğru belirlenmesi gerekir. Bu noktadaki değişkenliği azaltmak için, sistemlerde maksimum güç noktası izleyici (MPPT) teknolojisi kullanılmaktadır (Hussein ve El-Gezawi 1995).

Güneş ışığının gün içinde değişkenlik göstermesi ve bazı zamanlarda tamamen kaybolması, PV sistemlerinin sürekli enerji sağlamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, batarya sistemleri entegre edilerek güneş ışığının olduğu zamanlarda şarj sağlanmakta, ışık olmadığında ise yük bataryadan beslenmektedir. Ancak batarya sistemlerinin kapasitesini artırmak, mevsimsel değişimlerden daha az etkilenmek adına gerekli olsa da maliyeti yükseltmektedir (IEA-PVPS, 2019).

Güneş ışığının geliş açısının yıl boyunca değişmesi, panel verimliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, ayarlanabilir açılı montaj sistemlerinin tercih edilmesi önerilse de bu yapıların maliyeti daha yüksektir. Panel kurulumu sırasında, gölgelenmeye neden olabilecek çevresel faktörlerin analiz edilmesi gerekir çünkü gölgelenme, enerji üretiminde ciddi kayıplara yol açabilir (Duffie ve Beckman 2013). PV paneller, doğrudan doğru akım (DC) ile çalışan cihazlara bağlanabileceği gibi, bir invertör aracılığıyla alternatif akım (AC) sistemlerine de entegre edilebilir. Ancak DC sistemli cihazlar genellikle AC alternatiflere kıyasla daha pahalıdır (Tiwari ve Dubey 2016).

Bataryaların doğrudan panele bağlanması önerilmez. Bunun yerine, batarya ömrünü korumak ve güvenli şarj-deşarj döngüsünü sağlamak adına şarj regülatörleri kullanılmalıdır. Ayrıca sistemin verimli çalışmasını sürdürebilmesi için düzenli bakım yapılmalı, panel yüzeyleri temizlenmeli ve bağlantılar kontrol edilmelidir (Masters 2013).

3.2.1.2 Bataryalar

Bataryalar, enerjiyi kimyasal olarak depolayan elektrokimyasal sistemlerdir ve özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde, üretimin talebi karşılayamadığı zamanlarda enerjiyi kullanıma sunmak amacıyla kritik bir rol oynarlar. Güneş ve rüzgâr gibi değişken üretim kaynaklarıyla çalışan sistemlerde, fazla enerji depolanarak gelecekteki ihtiyaçlar karşılanabilir (Linden ve Reddy 2002). Hibrit enerji sistemlerinde en yaygın tercih edilen batarya türlerinden biri, derin deşarja dayanıklı kurşun-asit sabit tesis bataryalarıdır. Alternatif olarak, nikel-kadmiyum (Ni-Cd) ve nikel-demir (Ni-Fe) batarya türleri de kullanılabilir (Lu vd. 2013).

Kurşun-asit bataryalar, yaygın olarak tercih edilmekle birlikte, kullanım açısından dikkatli yönetim gerektirir. Aşırı şarj veya deşarj durumları batarya ömrünü kısaltabilir ve batarya uzun süre düşük şarj düzeyinde bırakıldığında kalıcı kapasite kaybı oluşabilir. Bu bataryaların hizmet ömrü, kullanım koşullarına bağlı olarak 3 ila 15 yıl arasında değişebilir. İlk yatırım maliyetleri görece düşük olmakla birlikte, bakım ve değiştirme maliyetleri önemli düzeyde olabilir (Buchmann 2011).

Bataryalar, çoğunlukla 2V'lik hücrelerin seri bağlanmasıyla oluşturulur. Her hücre, elektrolit içerisine daldırılmış pozitif ve negatif plakalardan oluşur. Deşarj sırasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi elde edilir; şarj esnasında ise bu reaksiyon ters yönde işler (Tiwari ve Dubey 2016). Derin deşarj yapabilme kapasitesi, plaka kalınlığına bağlıdır. Örneğin otomobillerde kullanılan ince plakalı bataryalar, %10 ila %20'lik bir derinliğin ötesinde deşarja uygun değildir. Buna karşın sabit tesis bataryalarında kullanılan kalın plakalar, %70 ila %80'lik bir kapasite aralığında deşarjı mümkün kılar (Linden ve Reddy 2002).

Batarya kapasitesi genellikle amper-saat (Ah) cinsinden ifade edilir; gerçek enerji saklama kapasitesi ise bataryanın nominal gerilimi ile çarpılarak watt-saat (Wh) ya da kilowatt-saat (kWh) olarak hesaplanır. Bununla birlikte, gerçek saklama kapasitesi zamanla ve kullanım koşullarına bağlı olarak azalabilir. Verimli bir kullanımda, şarj edilen enerjinin %70 ila %80'i kullanılabilir. Bu değer batarya verimliliğini belirleyen temel göstergelerden biridir (Chen vd. 2009).

Bataryaların yaşlanması, plakalarda sülfat birikimi ve elektrolitin bozulması gibi fiziksel-kimyasal süreçlerle gerçekleşir. Bu birikim, zamanla elektrolit içerisinde kısa devre riskini artırabilir ve batarya performansını düşürebilir. Tipik olarak, bir bataryanın ekonomik ömrünün sona erdiği, nominal kapasitenin %80'ine düştüğü ya da şarj veriminin %60'ın altına indiği durumda kabul edilir (Rogers 2010).

Çevresel sıcaklık, batarya performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Her 10 °C'lik sıcaklık artışı, batarya ömrünü önemli ölçüde kısaltabilir. Düşük sıcaklıklarda ise şarj verimi düşer. Örneğin, kurşun-asit sabit tesis bataryalarının 20 °C'deki tipik ömürleri 5 ila 10 yıl arasında değişebilir (NREL 2020).

Şebekeden bağımsız sistemlerde, bataryaların uzun süre düşük şarj seviyesinde kalması durumunda geri dönüşü olmayan kapasite kayıpları yaşanabilir. Aşırı şarj ya da yüksek sıcaklık altında çalışma, elektrolit içindeki gazlanma oranını artırarak H₂ ve O₂ gazı açığa çıkmasına neden olur. Bu gazların birikmesi yangın veya patlama riski oluşturabilir. Ayrıca, pozitif plakalardaki kurşun levhalar oksitlenerek korozyona uğrar. Bu nedenle, bataryaların yerleştirildiği ortamın iyi havalandırılmış olması ve sıcaklık kontrolünün sağlanması kritik önem taşır (Buchmann 2011).

3.2.1.3 Süper Kapasitörler

Süper kapasitörler, son yıllarda gelişen enerji depolama teknolojileri içerisinde yüksek çevrim ömrü ve hızlı şarj-deşarj kabiliyetleri ile ön plana çıkmaktadır. Geleneksel pillerin aksine, süper kapasitörler saniyeler içinde şarj olabilmekte ve milyonlarca çevrime kadar dayanıklılık gösterebilmektedir (Conway 1999). Bu özellikleri, onları yeşil enerji uygulamaları açısından ideal bir seçenek haline getirmektedir.

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı enerji transferi, güvenilirlik ve uzun ömür, süper kapasitörlerin temel avantajları arasında yer alır (Zhang ve Zhao 2009). Bu elektrokimyasal cihazlar, yüksek güçlü elektrik enerjisini çok kısa sürede depolayabilir ve aynı hızla serbest bırakabilirler. Süper kapasitörlerin yapısı temel olarak iki elektrot ve bir elektrolitten oluşur. Enerji depolama mekanizması, elektrot-elektrolit arayüzünde fiziksel yük birikimi ile gerçekleştiğinden, kimyasal reaksiyonlar söz konusu değildir. Bu durum, cihazın yüksek çevrim ömrüne sahip olmasını sağlar (Simon ve Gogotsi 2008).

Süper kapasitörlerin verimli çalışabilmesi için elektrot malzemesinin yüksek yüzey alanına sahip olması gereklidir. Çünkü enerji depolama kapasitesi, bu yüzeyde fiziksel olarak biriken yük miktarına bağlıdır. Tipik süper kapasitörler, düşük gerilim limitlerine sahip olup, genellikle 1,8V ile 2,5V aralığında çalışırlar. Bu nedenle, birçok düşük voltajlı uygulamada güvenle kullanılabilirler (Miller ve Burke 2008).

Enerji depolama kapasitesi açısından süper kapasitörler, konvansiyonel dielektrik kapasitörlerden daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, bataryalarla kıyaslandığında çok daha yüksek güç yoğunluğu sağlarlar. Süper kapasitörler, bu bağlamda piller ve kapasitörler arasında bir köprü işlevi görmektedir (Pech vd. 2010). Genellikle 10 ila 20 yıl arası hizmet ömrü bulunan bu cihazların kapasitesinde, zamanla bir miktar azalma gözlenebilir. Örneğin, kullanımın 8-10. yıllarında kapasite genellikle %80'e kadar düşebilir (Niu vd. 2006).

Süper kapasitörlerin performansını daha da artırmak için elektrot malzemelerinde nanoteknolojik gelişmeler ön plana çıkmaktadır. Özellikle nanokompozit ve elektroaktif yapıların geliştirilmesi, daha yüksek kapasitif özelliklerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Nano ölçekte farklı kapasitif özellikler gösteren malzemelerin birleştirilmesi, yeni nesil süper kapasitör teknolojilerinin gelişiminde önemli bir strateji olarak kabul edilmektedir (Guan vd. 2011).

3.2.1.4 Yükler

Günümüzde kullanılan pek çok elektrikli cihaz, genellikle 12 veya 24 V doğru akım (DC) ya da 220/380 V alternatif akım (AC) gerilim ile çalışmaktadır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan enerji kaynaklarının büyük bölümü, özellikle güneş panelleri ve bataryalar gibi bileşenler, doğrudan DC çıkışı sağlar (Masters 2013). Bu nedenle, sistemin genel çıkış gerilimi çoğunlukla DC biçimindedir.

Doğru akım ile çalışan cihazlar genellikle özel olarak üretilmekte olup, bu durum maliyetlerini artırmaktadır. Buna karşılık, AC ile çalışan cihazlar hem daha yaygın hem de maliyet açısından daha uygun oldukları için tercih edilebilmektedir (Blaabjerg vd. 2004). Bu iki farklı gerilim tipi arasında geçişi sağlamak amacıyla inverter adı verilen

cihazlar kullanılır. İnverterler, DC enerjiyi AC forma dönüştürerek geleneksel evsel ya da endüstriyel cihazlarla uyumlu hale getirir. Bu tür dönüştürücüler, özellikle batarya destekli hibrit sistemlerde vazgeçilmez bir bileşen olarak öne çıkmaktadır (Khan ve Iqbal 2005).

3.2.1.5 İnvertörler

Hibrit enerji sistemlerinde alternatif akım (AC) ile çalışan yüklerin beslenebilmesi için doğru akımı (DC) AC'ye dönüştüren invertörlerin kullanımı zorunludur. İnvertörler, genellikle batarya çıkışındaki DC gerilimi, standart 50 Hz frekansında ve 220/380 V seviyesinde AC gerilime dönüştürerek, geleneksel cihazlarla uyum sağlar (Blaabjerg vd. 2004). Küçük ölçekli uygulamalarda genellikle tek fazlı invertörler tercih edilirken, büyük ölçekli sistemlerde yüklerin üç fazla beslenmesi gerekliliği nedeniyle üç fazlı invertörlere ihtiyaç duyulmaktadır (Koutroulis ve Blaabjerg 2012).

Şebekeden bağımsız çalışan sistemlerde farklı çıkış dalga formlarına sahip invertör türleri kullanılabilir. Tam sinüs dalga çıkışı sağlayan invertörler, şebeke kalitesinde enerji üretir ve özellikle hassas elektronik cihazların sağlıklı çalışabilmesi açısından tercih edilmektedir. Kare dalga çıkışlı invertörler ise basit motorlu sistemlerde ve aydınlatma gibi düşük hassasiyetli uygulamalarda kullanılabilir. Merdiven basamaklı (modified sine wave) invertörler, tam sinüs dalga çıkışına yakın bir form üretir ve maliyet avantajı ile birlikte düşük hassasiyetli cihazlarda tercih edilmektedir (Salas vd. 2009).

Tam sinüs invertörlerin maliyeti diğer türlere göre daha yüksek olmakla birlikte, endüktif ve kapasitif yüklerin ilk çalıştırma anında yüksek akım çekmesi nedeniyle bu cihazlar için gereklidir. Bu ani akım çekişleri, invertörlerin koruma devrelerinin tetiklenmesine neden olabilir. Bu tür yükler için doğru invertör seçimi, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir (Carrasco vd. 2006).

İnvertörlerin verimliliği genellikle nominal çıkış güçlerinin %80 ila %90'ı arasında en yüksek düzeye ulaşır. Ancak, yük olmadan çalıştıklarında da belirli bir enerji tüketimi gerçekleştiğinden, boşa çalışan invertörlerin devre dışı bırakılması enerji tasarrufu açısından önemlidir. Ayrıca, invertörlerin her bir yük grubuna özel olarak

boyutlandırılması, sistem verimliliğini artıran bir yöntemdir. Bu bağlamda, yük gruplarına özel invertörler kullanılarak paralel yapılar kurulabilir ve her invertör kendi ideal çalışma aralığında çalıştırılabilir (Esrar ve Chapman, 2007).

Şebekeye bağılı çalışan sistemlerde kullanılan inverterler, şebekenin frekansına senkronize çalışacak şekilde tasarlanır. Bu tür sistemlerde invertör, frekansı şebekeden referans olarak sabit tutar. Ayrıca, şebekeye enerji satışı hedeflendiğinde reaktif güç akışı da dikkate alınmalı ve buna uygun güç elektroniğı sistemleri entegre edilmelidir (Calais vd. 2002). İnvrtör seçimi yapılırken yalnızca nominal yük değil, aynı zamanda kısa süreli tepe güç ihtiyaçları da dikkate alınmalıdır. Pek çok invertör, kısa süreli olarak nominal güçlerinin 5 ila 6 katı çıkış sağlayabilecek kapasitededir.

3.2.1.6 Maksimum Güç Noktası İzleyicisi

Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MPPT), fotovoltaiik (PV) sistemlerin verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan, genellikle yüksek frekanslı bir DC-DC dönüştürücü yapısına sahip güç elektroniğı bileşenidir. Bu birim, güneş panelinin her an üretebileceğı maksimum gücü algılayarak, bu gücün yüke ya da enerji depolama sistemine aktarımını optimize eder (Esrar ve Chapman 2007).

MPPT birimleri, PV sistemlerde elde edilen enerjinin bataryalara en uygun koşullarda aktarılmasını sağlayacak biçimde, çoğunlukla şarj regülatörleri ile entegre halde çalışır. Bununla birlikte, doğrudan AC motorları besleyen sistemlerde MPPT algoritmaları genellikle invertör içrisine entegre edilmiştir (Femia vd. 2005). Bu sayede, değişken güneş ışıını ve sıcaklık koşullarına rağmen sistem, sürekli olarak maksimum güç noktasında çalıştırılarak enerji dönüşüm verimi artırılır.

MPPT teknolojisinin kullanımı, özellikle batarya şarjı gerçekleştirilen sistemlerde önemli avantajlar sunar. Ancak, bu cihazların yüksek maliyetli olması, düşük bütçeli uygulamalarda kullanımını sınırlayabilmektedir (Hohm ve Ropp 2003). Yine de uzun vadede enerji verimliliğindeki artış göz önünde bulundurulduğunda, MPPT'nin sisteme katkısı ekonomik açıdan da anlam kazanmaktadır.

3.2.1.7 Batarya Regülatörü

Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin kararlı ve verimli şekilde çalışabilmesi için batarya regülatörleri temel bileşenlerden biridir. Bu regülatörler genellikle iki ana işlevsel birimden oluşur: şarj regülatörü ve y k regülatörü. şarj regülatörünün temel amacı, bataryaların aşır şarj olmasını önleyerek batarya ömrünü uzatmaktır. Yük regülatörü ise, bataryaların derin deşarja maruz kalmasını engelleyerek sistemin güvenliğini ve sürekli liğini sağlar (Khan ve Iqbal 2005).

şarj regülatörleri, batarya gerilimini sürekli izleyerek belirli bir eşik değere ulaşıldığında şarj akımını keser. Örneğin, 2 V'luk hücrelerde bu eşik değeri genellikle 2,35 V civarındadır. Bu seviyeye ulaşıldığında batarya tam doluluk seviyesine ulaşmış sayılır ve elektrolit içinde gazlanma başlamadan önce regülatör şarj akımını keser. Gerilim seviyesi 2,2 V'a düştüğünde şarj işlemi yeniden başlatılır (Buresch 1983). Aynı şekilde y k regülatörü de bataryanın gerilimi kritik eşik olan yaklaşık 1,81 V'un altına düştüğünde yükün enerji çekmesini durdurarak bataryayı korur. Bu eşik değerler, batarya teknolojisine ve üretici firma standartlarına göre farklılık gösterebilir; dolayısıyla pek çok modern reg lat rde bu sınırlar kullanıcı tarafından ayarlanabilir.

Sıcaklık değişimi, bataryanın gazlanma gerilimini etkilediği için şarj regülatörlerinde sıcaklık kompanzasyonu da bulunmalıdır. Bu tür özellikler, regülatörün batarya sağlığını daha etkin biçimde yönetmesini sağlar. Ayrıca regülatörlerde kullanılan anahtarlama elemanlarının tipi ve kalitesi, sistemin genel verimliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle uygun anahtarlama elemanının seçimi, sistem tasarımı açısından kritik öneme sahiptir (Weidong ve Liuchen 2006).

Hibrit sistemlerde her enerji kaynağına entegre bir şarj regülatörü uygulanırken, y k regülatörü genellikle invert rle entegre biçimde sistemin çıkış biriminde yer alır. Daha gelişmiş uygulamalarda, tüm sistemin merkezi bir kontrol birimi ( rneğin, programlanabilir mantıksal denetleyici-PLC veya mikroişlemci) tarafından yönetilmesi tercih edilmektedir. Bu tür sistemler, batarya ve enerji üretim verilerini merkezi bir noktaya aktararak uzaktan izleme ve kontrol imkânı da sunar (Koutroulis ve Blaabjerg 2012).

3.2.1.8 Astronomik Zaman Rölesi

Astronomik zaman rölesi, belirli bir lokasyonun enlem ve boylam bilgilerine dayalı olarak yıl içerisindeki güneşin doğuş ve batış saatlerini hesaplayarak elektrikli sistemlerin otomatik kontrolünü sağlayan programlanabilir bir zamanlayıcıdır. Bu cihazlar, özellikle dış mekân aydınlatma sistemlerinde kullanılarak, aydınlatma donanımlarının yalnızca gerekli zaman dilimlerinde çalışmasını sağlayarak enerji israfını önler (Dounis ve Caraiscos 2009).

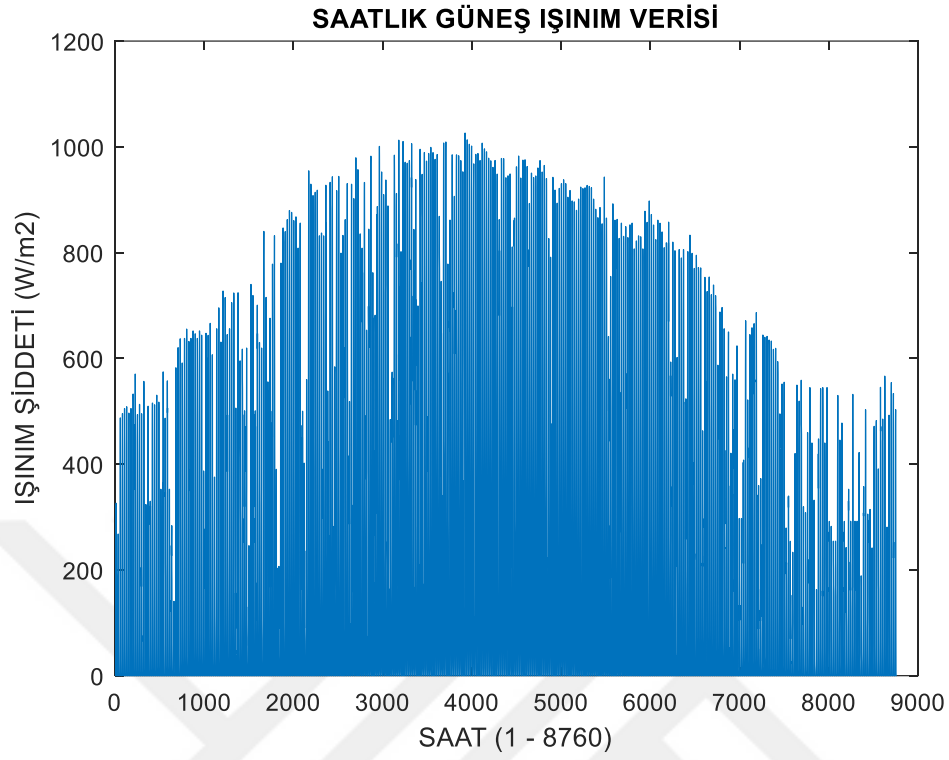
Astronomik zaman rölelerinin temel işlevi, kullanıcı tarafından tanımlanan tarihsel ve coğrafi verilere dayanarak her gün değişen gün doğumu ve gün batımı zamanlarını hesaplamak ve bu zamanlara göre yükleri açıp kapatmaktır. Böylece, örneğin bahçe veya sokak aydınlatmalarının yalnızca hava karardığında devreye girmesi ve gün ışığıyla birlikte otomatik olarak kapanması sağlanır. Bu durum, manuel zamanlayıcılara kıyasla daha hassas bir kontrol mekanizması sunar ve sistemin dışsal ışık koşullarına göre daha uyumlu çalışmasına olanak tanır (Mahdavi vd. 2008).

Enerji verimliliği açısından bakıldığında, astronomik zaman röleleri önemli bir avantaj sunar. Bu cihazlar sayesinde dış aydınlatma sistemlerinde gereksiz enerji tüketimi önlenmekte ve sistemin çalışma süreleri optimize edilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, uygun şekilde yapılandırılmış astronomik zaman rölelerinin %20 ila %30 oranında enerji tasarrufu sağlayabildiğini göstermektedir (Güven vd. 2015). Bu durum, özellikle uzun süreli dış aydınlatma ihtiyacı olan yerleşim alanlarında, park ve bahçelerde sürdürülebilir enerji yönetimi açısından dikkate değerdir.

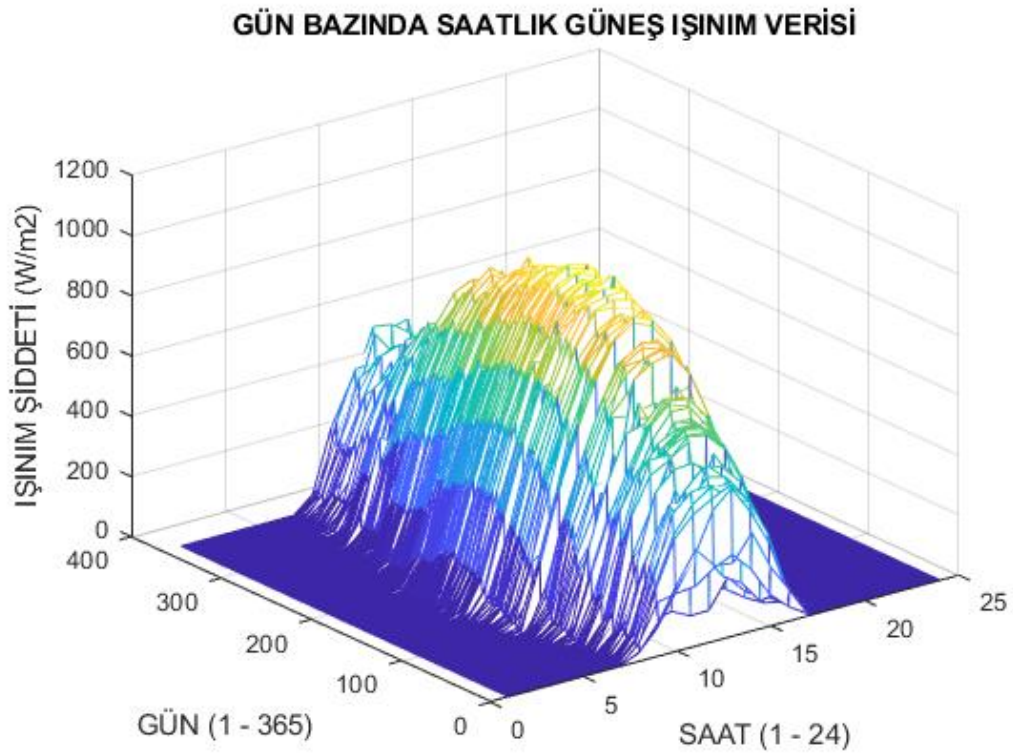
3.2.2 Hibrit Depolama Sistemin Enerji Dengelemesi

3.2.2.1 Güneş Panellerden Üretilen Enerji

Güneş panellerinde üretilen enerjiyi, Afyon Kocatepe Üniversitesinin Mühendislik Fakültesinin bahçesinde yapılan bir fizibilite çalışması sonucunda bir yıl için kaydedilen saatlik ışıınım verileri vasıtasıyla hesaplandı.



Şekil 3. 2 Bir yıl için kaydedilen saatlik güneş ışıınım verisi



Şekil 3. 3 Bir yıl için kaydedilen saatlik güneş ışıınım verinin gün bazında gösterimi

Güneş panellerden üretilen gücü aşağıdaki formülü kullanarak hesaplandı;

$$SGU = SGIV \times A \times \cos(EA) \times V \times PS \quad (3.3)$$

Eşitlikte;

SGU: saatlik güneş üretimi (W),

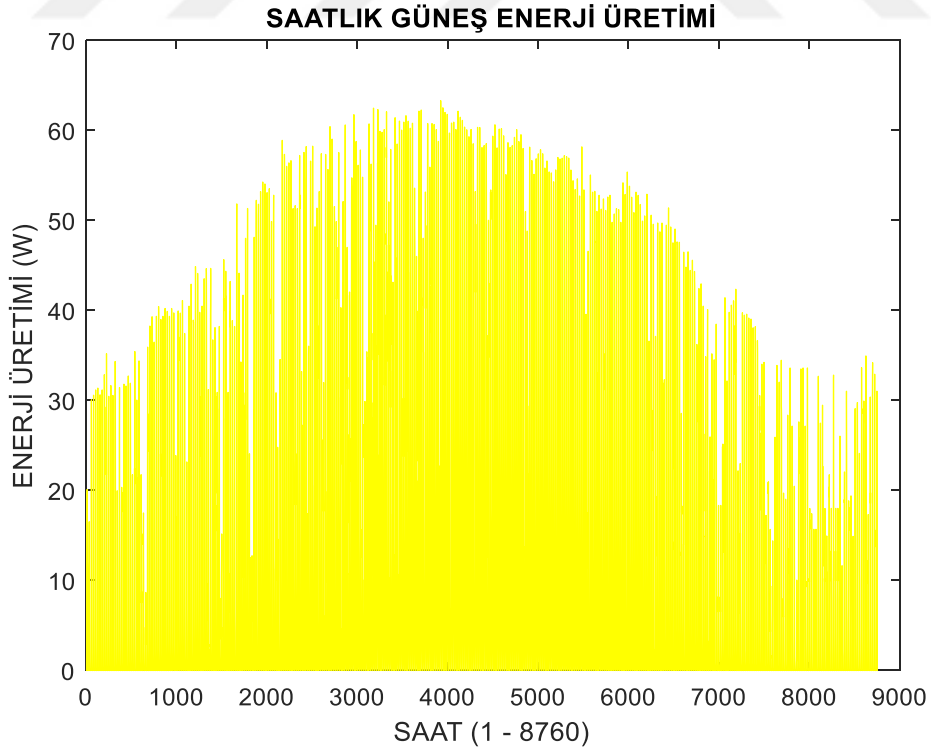
SGIV: Saatlik güneş ışıınım verisi(W/m²),

A: Güneş panelin alanı (2m²),

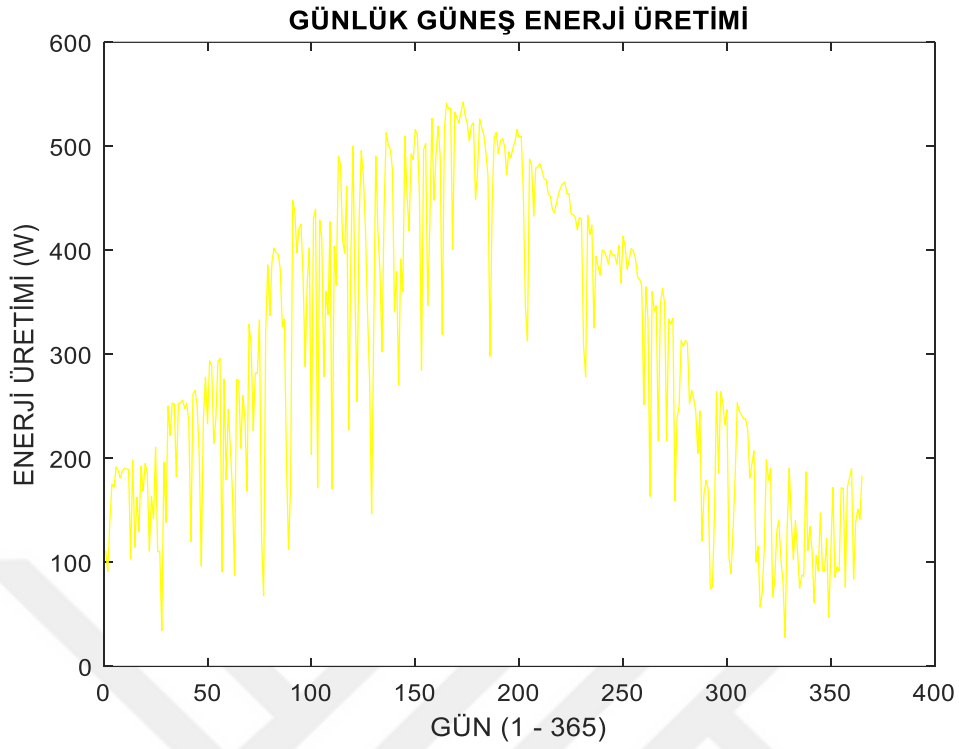
EA: Güneş panelin eğim açısı (30°),

V: Güneş panelin verimi (%20),

PS: Güneş panel sayısı.



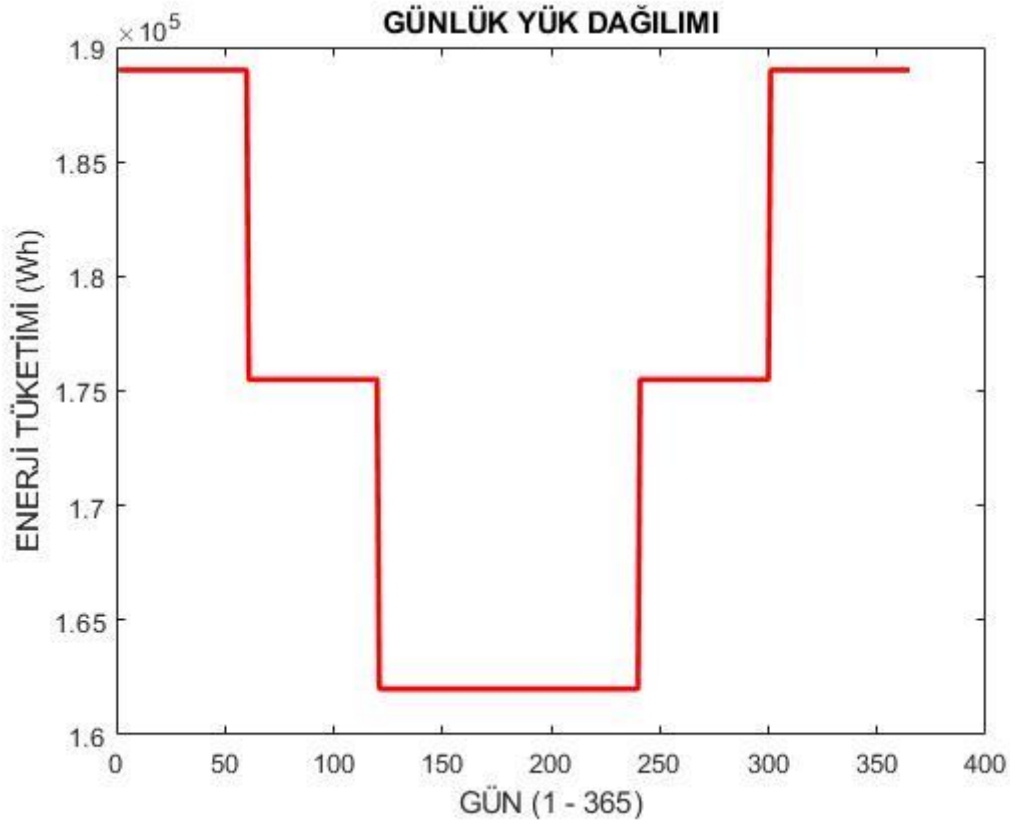
Şekil 3. 4 Bir adet güneş paneli için üretilen saatlik gücü



Şekil 3. 5 Bir adet güneş paneli için gün bazında üretilen gücü

3.2.2.2 Yükler Tarafından Tüketilecek Enerji

Sistemin yükü 270 adet 50W'lık lambadan oluşmaktadır. Bu lambalar güneş batımı ve doğuşu arasında çalışacaktır. Afyonkarahisar için en uzun gece süresi 14 saat ve en kısa gece süresi 12 saat olarak baz aldık.



Şekil 3. 6 Günlük yük dağılımı

3.2.2.3 Depolama Sistemin Kapasitesi

Toplam enerji ihtiyacımız gidermek için yaklaşık günlük

$$270 \times 50 \text{ W} \times 14 \text{ saat} = 189\,000 \text{ Wh} \quad (3.4)$$

yani 189 kWh’lik bir enerji depolama gerekmektedir. Bu depolama sistemi için kurşun-asit batarya ve süper kapasitör kullanıldı, batarya kapasiteleri ise yapılan optimizasyon modeli yardımıyla belirlendi.

3.2.2.4 Enerji Dengesi

Güneş enerjisi ile çalışan enerji üretim sisteminde, enerji güneş panelleri aracılığıyla üretilir. Üretilen enerji, sisteme bağlı yük tarafından tüketilir. Ancak, enerjinin üretildiği

anda tüketilmesi ya da tüketim gerektiğinde enerji üretiminin yapılması her zaman mümkün değildir. Bu sebeple, üretilen enerjinin depolanması zorunludur. Özellikle aydınlatma uygulamalarında, gündüz üretilen enerjinin depolanıp, gece bu enerjinin kullanılması gerekmektedir.

Depolama birimi, üretim ve tüketim dengesine bağlı olarak sistemde yük veya kaynak olarak işlev görecektir. Eğer yükün tüketimi üretilen enerjiden fazla ise, batarya eksik enerjiyi karşılayacaktır. Tersine, üretilen enerji tüketimden fazla ve batarya boş ise, fazla enerji bataryada depolanacaktır.

Güneş enerji üretim sisteminin belirli bir zaman aralığındaki enerji dengesi, denklemlerle ifade edilebilir. Enerji denge denklemi, sistemin bu süreçteki enerji giriş ve çıkışlarını hesaplar ve bu şekilde sistemin verimli çalışmasını sağlar.

$$WY \leq WG \pm WB \quad (3.5)$$

Eşitlikte;

WY: Yükün tüketimi,

WG: Güneş panellerin üretimi,

WB: Bataryada depolanan veya bataryadan kullanılan enerjidir.

Bu denklemin belirli bir zaman aralığında doğrulanması, yükün enerjisiz kalmasını önler ve sistemin güvenilirliğini en üst düzeye çıkarır. Bir enerji üretim sisteminden beklenen temel işlev, yük talep ettiğinde kesintisiz enerji sağlamaktır; bu özelliğe güvenilirlik denir. Yeterli büyüklükte bir depolama elemanı seçilmediğinde, güvenilirlik azalır ve yük enerjisiz kalabilir.

Güvenilirliği artırmak için, depolama elemanının kapasitesinin artırılması, enerjinin maliyetini de yükseltir. Bu nedenle, sistemin boyutlandırılması aşamasında güvenilirlik ile maliyetin en uygun noktada dengelenmesi gerekmektedir.

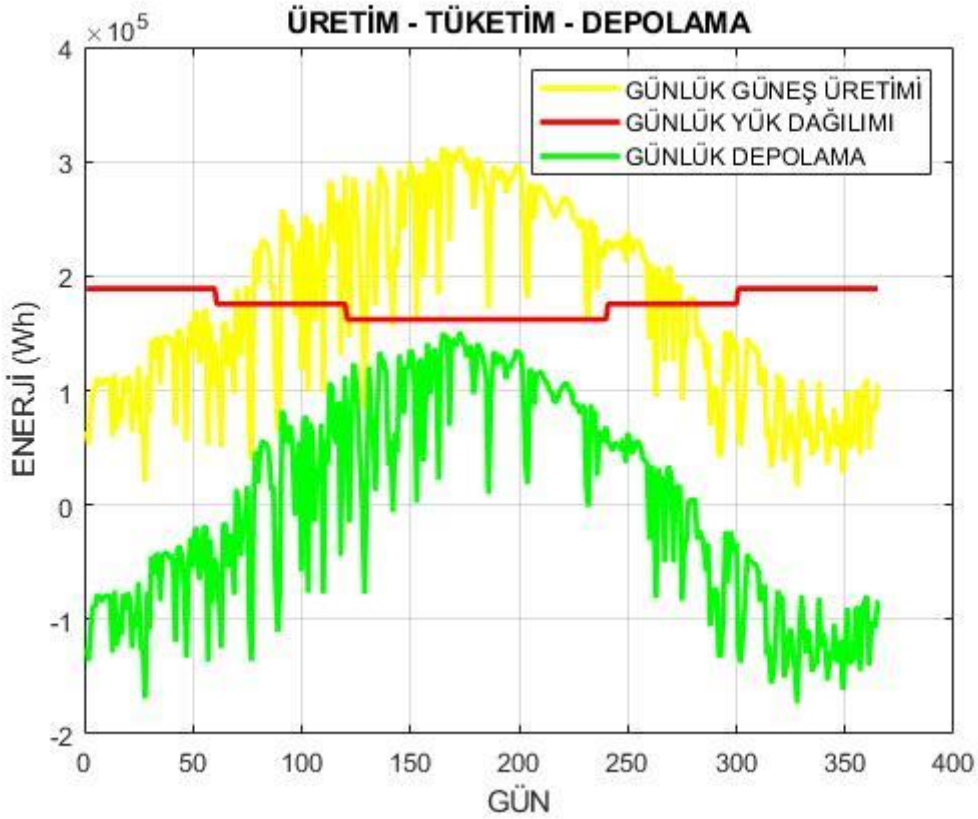
3.2.3 Hibrid Enerji Depolama Sistemin Modeli

Bu tezde, yükü enerjisiz kalacak süreyi yok edilebilecek kadar ekonomik bir hibrid enerji depolama sisteminin boyutlandırılması yönteminin geliştirilmesi yapılmıştır. İlk olarak, sistemin çalıştığı süre boyunca (bir yıl) üretilen enerjinin tüketilen enerjiden fazla olması üzere bir simülasyon gerçekleştirildi ve gereken depolama kapasitesi bulundu. Ardından hibrid depolama sistemin maliyet modeli oluşturup optimum çözümü bulmak adına simülasyon yapılmıştır.

3.2.3.1 Gerekli Minimum Güneş Panel Adedi

Sistemimizde 550Wp'lik güneş paneli kullanılmıştır. Yılda gündüz süremiz mevsimlere göre sürekli değişmekte olup güneş enerji üretimi de etkilemektedir. Gerekli güneş panel sayısı bulmak için Matlab yardımıyla simülasyonu yapılmıştır.

Yıl bazında toplam üretilen enerji, tüketilen enerjiye eşit veya daha fazla olacak şekilde bir algoritma tasarlandı. Enerji dengeleme noktasına ulaşana kadar otomatik olarak güneş panel sayısı artmaktadır. Dengeye ulaşıncaya simülasyon durur ve optimal güneş panel sayısını verir.



Şekil 3. 7 576 adet güneş paneli için sistemin günlük enerji üretim, tüketim ve depolama grafiği

Yukarıdaki sonuçlar, 576 adet 550Wp'lık güneş paneli yıllık enerji üretimi ve tüketimi dengelemek için yeterli olduğunu göstermektedir.

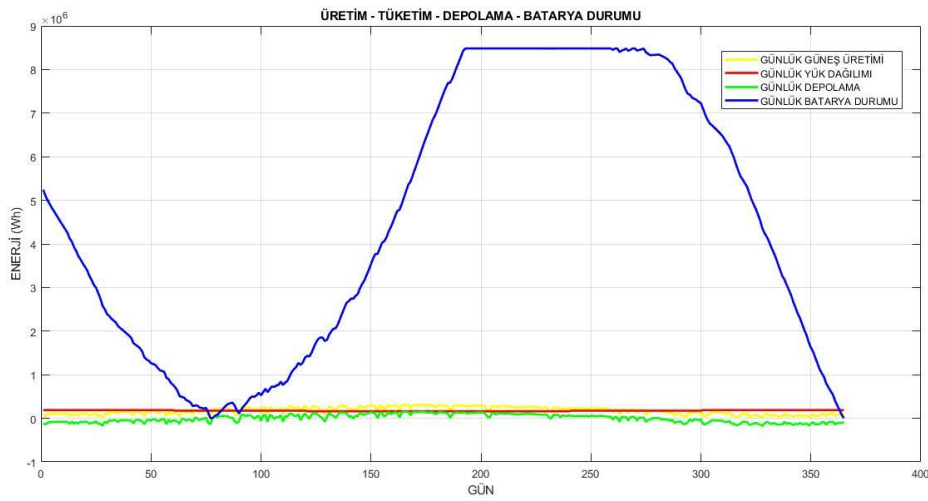
3.2.3.2 Minimum Güneş Panel Adedine Göre Gerekten Depolama Kapasitesi

Sistemimiz şebeke bağlantısı olmayan bir sistem olup, yükler ise güneş batımı ve doğuşu arasında çalışmaktadır. Bu sebeple gündüz üretilecek enerjiyi, gece kullanabilmek için depolanması gerekmektedir.

Sisteme bağlı olan yüklerin enerjisiz kalmayacak şeklinde, her gün üretilen fazla enerjiyi depolayıp bir sonraki günlerde kullanılmak üzere bir simülasyon tasarladık. Bir yıl sonuna kadar enerji ihtiyacı olmayacak üzere her enerji fazlalığına karşı depolama kapasitemiz artırılmaktadır. Bu depolama sistemin minimum kapasitesini belirler.

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, üretimi grafiğin gündüzlerin kısa (gecelerin uzun) olduğu bir mevsimde başlayıp üretilen enerjini yeterli olmadığı fark edilmektedir. Bu grafiğin başlangıcındaki enerji yetersizliği ortadan kalkana kadar bataryanın gerekli minimum başlangıç şarj kapasitesi simülasyon tarafından belirlendi.

Gerekli minimum güneş panel adedi için yapılan simülasyona göre yaklaşık 8 483 kWh kapasitesi olup 5 367 kWh başlangıç şarj durumu olan bir depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3. 8 576 adet güneş paneli için sistemin günlük batarya durumunun grafiği

3.2.3.3 Batarya ve Süper Kapasitör Hibridizasyonu

Süper kapasitörler, oldukça yüksek özgül güç değerleri (10 kW/kg üzerinde) sunmalarına rağmen, özgül enerji kapasiteleri nispeten düşüktür ve genellikle 10 Wh/kg seviyesinin altında kalmaktadır (Conway 1999). Bu cihazlar, uzun çevrim ömürleri sayesinde 500 000’den fazla şarj-deşarj döngüsünü tamamlayabilirler. Öte yandan, tekrar şarj edilebilen bataryalar, sekonder bataryalar olarak da adlandırılır, süper kapasitörlere kıyasla daha yüksek özgül enerji sağlarlar; ancak özgül güçleri genellikle 1 kW/kg seviyesini geçmez ve çevrim ömürleri de daha kısadır (Burke 2007).

Batarya ve süper kapasitörlerin birlikte kullanımı, enerji sistemlerinin performansını

artırmak amacıyla gerçekleştirilen bir hibridizasyon yaklaşımıdır. Bu hibrit yapı, içsel veya dışsal entegrasyon yöntemleriyle kurulabilir ve seri ya da paralel bağlantı biçimlerine göre sınıflandırılabilir. Bu kapsamda, Hibrid Enerji Depolama Sistemleri (HEDS), iç seri, iç paralel, dış seri ve dış paralel olmak üzere dört temel yapılandırmaya sahiptir (Zhang vd. 2011). Özellikle dış paralel yapılandırma, değişken güç taleplerine sahip yenilenebilir enerji sistemlerinde ve ani güç ihtiyacı olan uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Elektrikli ve hibrit araç teknolojilerinde temel güç kaynağı çoğunlukla şarj edilebilir bataryalar ve yakıt hücreleridir. Bataryaların hizmet ömrü, uygulanan şarj/deşarj döngülerinin sayısı ve bu işlemlerin hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yüksek güç çekişi sırasında, batarya gerilimi minimum sistem gerilim değerinin altına düşebilir. Bu durum hem sistem kararlılığını hem de batarya ömrünü olumsuz etkileyebileceğinden, süper kapasitörlerin bataryalarla birlikte kullanılması yaygın bir stratejidir (Gonzalez vd. 2009).

Hibrit enerji depolama sistemlerinde süper kapasitörlerin kullanımı, yalnızca batarya ömrünü uzatmakla kalmaz; aynı zamanda enerji yoğunluğu ile güç yoğunluğu arasındaki dengeyi sağlayarak sistem performansını artırır. Ayrıca, süper kapasitörler, yenilenebilir enerji sistemlerinde ani güç dalgalanmalarını dengeleme yetenekleri sayesinde önemli bir katkı sunmaktadır (Miller ve Burke 2008).

3.2.3.4 Batarya ve Süper Kapasitör Hibridizasyon Kriterleri

Bu sistemde, toplam enerji ihtiyacının çoğu batarya tarafından, ani güç taleplerinin ise süper kapasitör tarafından karşılandı.

$$SUPE_{min} = \frac{P_{peak} \times \Delta t_{pulse}}{\eta} = \frac{(270 \times 50W) \times 1sn}{0,915 \times \frac{3600sn}{1sa}} \approx 4,09Wh \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

SUPE_{min}: Süper kapasitörün minimum enerji kapasitesi (Wh)

P_{peak}: Maksimum ani güç (Wh),

Δt_{pulse}: Ani güç süresi (saniye),

η: Verim,

Bu, süper kapasitörün minimum enerji ihtiyacını verir ve güvenlik payı ile çarpılır, bu sistem için 1,2 olarak seçildi.

$$SUPE_{min} = 4,09 \times 1,2 \approx 4,91Wh \quad (3.7)$$

Kapasitörün minimum enerji kapasitesi 5Wh olarak belirlendi ve böylece,

$$SUPE_{min} \geq 5Wh \quad (3.8)$$

olmalı, bu sistemin ilk hibridizasyon kriteridir.

Sistemde kullandığımız batarya toplam enerjinin %90'ını karşılamaktadır.

$$BATE_{min} \geq 0,9 \times GTDE \quad (3.9)$$

Burada BATE_{min} Bataryanın minimum enerji kapasitesi ve bu şekilde sistemin diğer hibridizasyon kriteridir belirlendi.

Bu depolama sistemlerin verim faktörleri de dikkate alındı. Nikel kadmiyum bataryanın verimi %60 ila %80 olup ortalaması %70 çıkmaktadır, süper kapasitör ise %85 ila %98 arasında değişmekte olup ortalaması %91,5 olarak hesaplandı. Böylece gerekli toplam enerji kapasitesi aşağıdaki formüle uymaktadır;

$$GTDE = \left(\frac{0,9}{0,7}\right) BATE + \left(\frac{0,1}{0,915}\right) SUPE \quad (3.10)$$

Eşitlikte;

GTDE: Gerekli toplam depolama enerji kapasitesi (Wh),

BATE: Nikel kadmiyum bataryanın enerji kapasitesi (Wh),

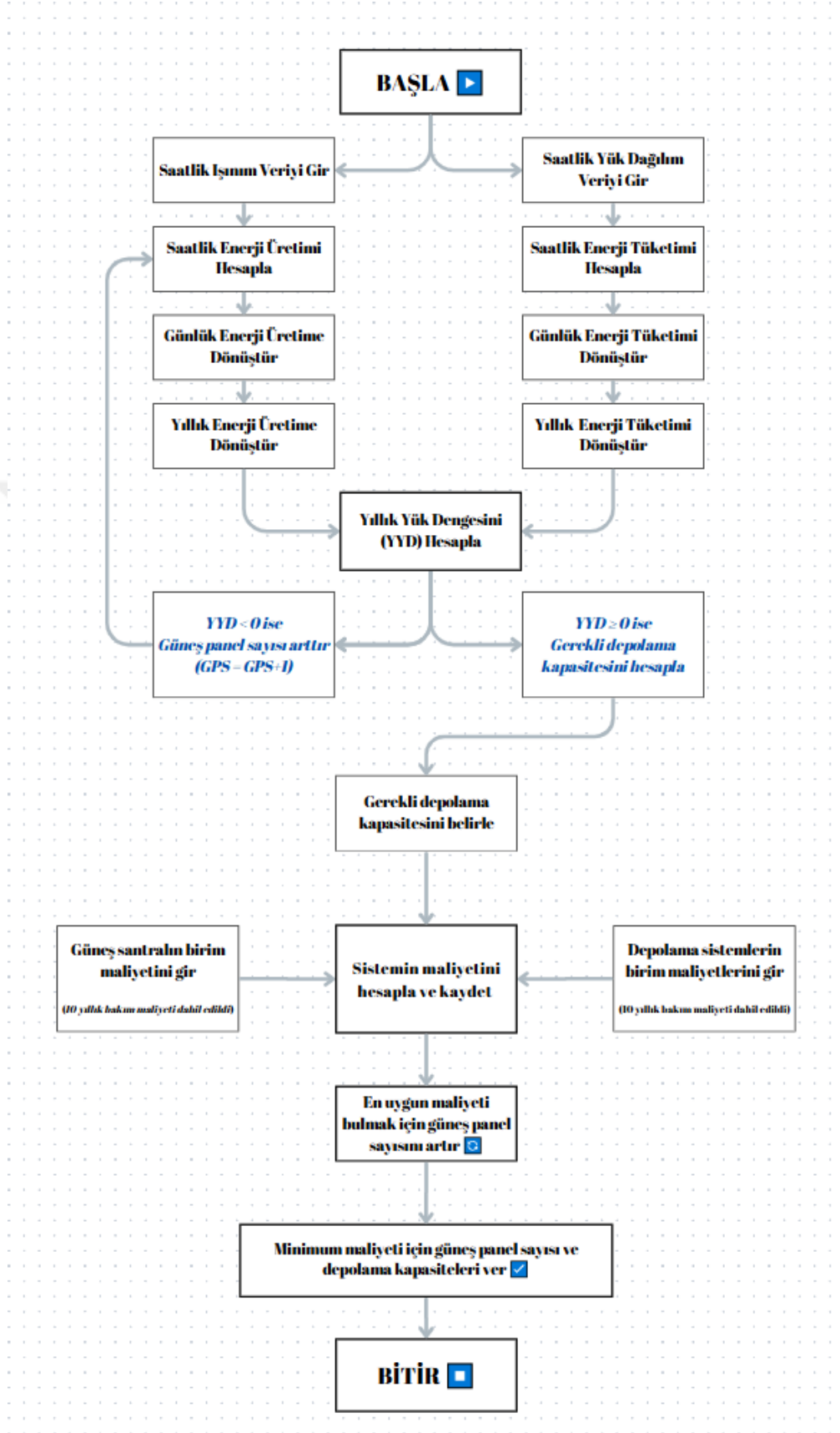
SUPE: Süper kapasitör enerji kapasitesi (Wh)

3.2.3.3 Optimizasyon

Sistemin enerji üretim kısmı için güneş enerji santralının birim maliyeti, gerekli tüm malzemeler ve kurulum dahil 800USD/kW sabit kabul edildi. Depolama sistemleri kısmında Nikel kadmiyum pilin (12V 1 000Ah) birim maliyeti 650USD ve süper kapasitörü (12V 1 000F) birim maliyeti ise 1 000USD.

Tüm sistemin yıllık bakım maliyeti ise 15USD/kW olarak belirlenip 10 yıllık bir bakım ücreti hesaplamalara dahil edildi.

Sistemin hem verimliği ve maliyetini düşürmek adına izlenilen optimizasyon algoritması aşağıdadır.



Şekil 3. 9 Optimizasyon Algoritmasının akış şeması

3.2.3.4 Optimizasyon Sonuçları

Şekil 3.10’da verilen optimizasyon algoritmasına göre Matlab üzerinde simülasyon yapıldı ve sonuçların bir kısmı Çizelge3.1’de verildi.

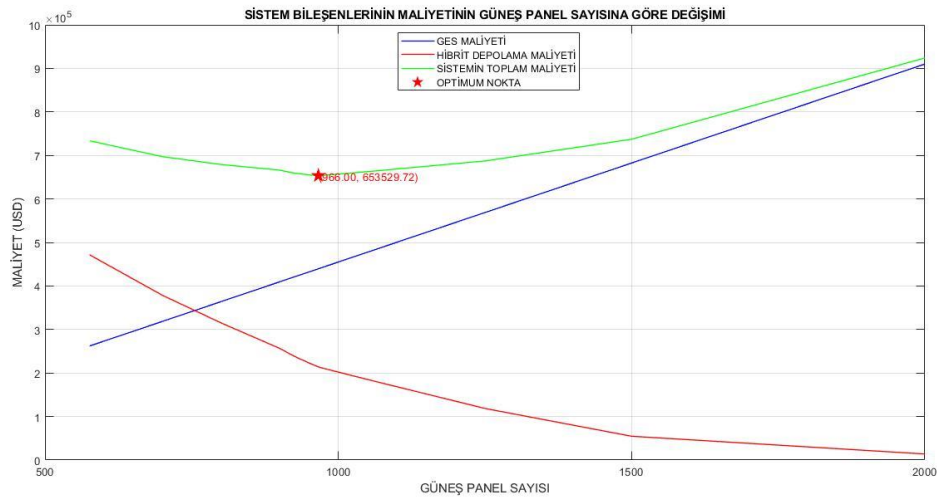
Çizelge 3. 1 Boyutlandırılan sistemin optimizasyon sonuçları

Güneş panel sayısı	Batarya kapasitesi (kWh)	Süperkapasitör kapasitesi (Wh)	Sistemin toplam maliyeti (USD)
576	8 483	5	733 644,72
700	6 794	5	697 169,72
800	5 639	5	679 144,72
900	4 575	5	666 124,72
925	4 243	5	659 239,72
950	3 965	5	655 324,72
965	3 809	5	653 569,72
966	3 800	5	653 529,72
967	3 793	5	653 599,72
975	3 739	5	654 269,72
990	3 645	5	655 924,72
1 000	3 583	5	657 064,72
1 250	2 064	5	687 269,72
1 500	903	5	737 164,72
2 000	162	5	923 909,72

Gerekli minimum güneş panel adedinden başlayarak sistemin en uygun maliyetini

bulmak üzere her iterasyonda sistem bileşenlerin maliyeti sabit tutuldu ve yalnız güneş panel adedi artırıldı. Her güneş panel adedi artırıldığında yeniden verilen hibridizasyon kriterlerle gerekli depolama kapasitesi belirlenir ve maliyeti hesaplanır. Ayrıca sistemin toplam maliyeti hesaplanır ve kaydedilir. Binlerce iterasyonlardan sonra sistemin toplam maliyet değişikliği incelenir ve en minimum sistemin maliyeti verilir.

Boyutlandırılan sistemin en uygun maliyetli ve en verimli olduğu halde, 966 adet güneş paneli 3 800kwh'lık bir batarya ve 5wh'lık bir kapasitör gerektirmektedir, böylece tüm sistemin maliyeti 10 yıllık bakım ücreti dahil yaklaşık 653 530 USD olarak bulunmuştur.



Şekil 3. 10 Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin güneş panel sayısına göre değişimi

Boyutlandırma sonucunda elde edilen konfigürasyonların maliyetlerinin sistemde kullanılan güneş panel sayılarına göre değişimleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Sistemi oluşturan güneş enerji santralının (GES) ve hibrit depolama sistemlerin maliyetlerinin güneş panel adedi ile değişimini de içermektedir.

Güneş enerji santralının (GES) maliyet eğrisi (mavi renkli) güneş panel adediyle lineer bir şekilde artmaktayken hibrit depolama sistemlerin maliyet eğrisi (kırmızı renkli) parabol bir şekilde düşüş göstermektedir.

Sistemin toplam maliyetinin eğrisi güneş enerji santralının (GES) ve hibrit depolama

sistemlerin maliyetlerinin eğrilerin toplanması sonucunda elde edilmiştir.

Şekil 3.11’de yeşil çizgi ile gösterilen sistemin toplam maliyetinin eğrisinin minimum olduğu yeri optimum nokta olarak kırmızı bir yıldız ile işaretlendi.



4. BULGULAR

Bir yıl boyunca her gün, yük olarak 270 adet 50Wh'lık lambanın güneş batımı ve doğuşu arasında çalışacak şeklinde bir sistem boyutlandırıldı ve enerji kaynağımız 550Wp'lik güneş panellerinden oluşmaktadır.

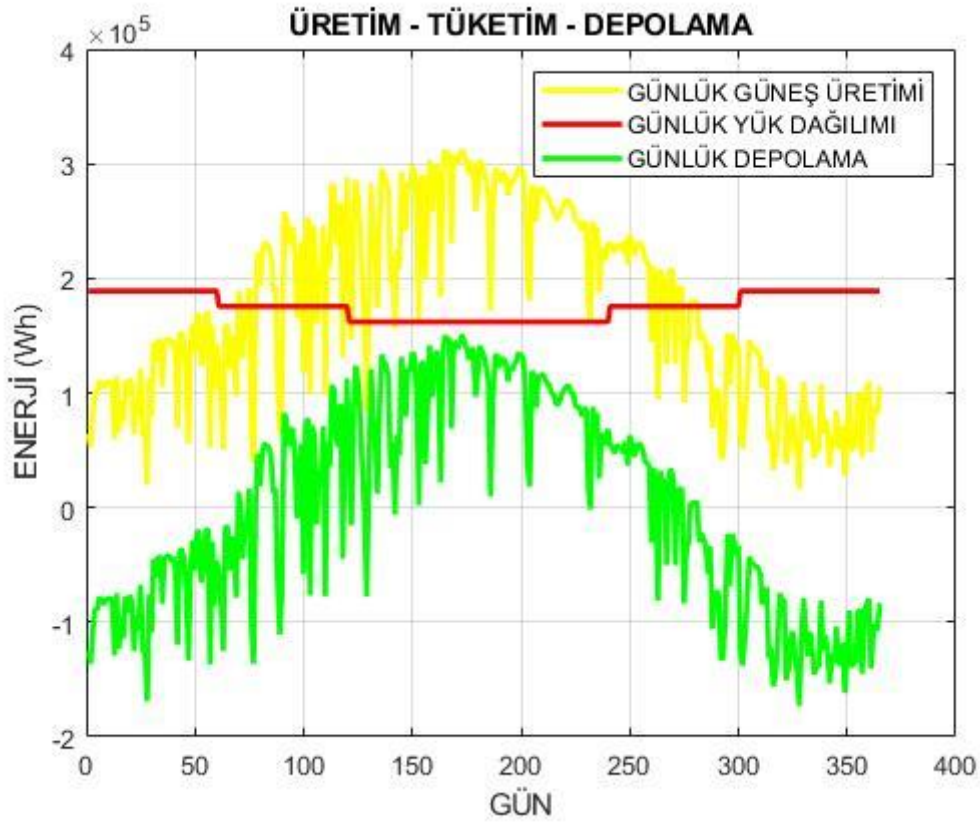
Yılda gündüz süremiz mevsimlere göre sürekli değişmekte olup güneş enerji üretimi de etkilemektedir. Şebekeye bağlı olmayan bu sistemin en verimli, düşük maliyetli ve çevreye en az zararlı sistemi yapmak üzere gerekli en optimum güneş panel sayısı bulmak ve doğru depolama hibridizasyonu oluşturmak için Matlab yardımıyla simülasyonlar gerçekleştirildi.

4.1 Sistemin Verimliliği

Boyutlandırılan sistemin şebekeye bağlı olmaması, sistemin verimliliğini çok önemli bir parametre yapmaktadır. Gerekli süre boyunca üretilen enerjinin tüketilen enerjiyi karşılamaması sistemin verimliliğini düşürmektedir. Bu sebeple ilk yapılan simülasyon yıllık üretim ve tüketimin dengelemesi için yapıldı.

Enerji üretimi, Afyon Kocatepe Üniversitesinin Mühendislik Fakültesinin bahçesinde yapılan bir fizibilite çalışması sonucunda bir yıl için kaydedilen saatlik ışıınım verileri vasıtasıyla hesaplandı. Enerji tüketimi ise 270 adet 50Wh lambanın mevsimlere göre en uzun gece süresi 14 saat ve 12 saat olarak belirlendi.

Yapılan simülasyon sonucunda kullanılan ışıınım verilere göre sistemin en verimli hali şekil 4.1'de gösterildi. Sistemin çalıştığı süre boyunca üretilen enerjinin tüketilen enerjiden fazla olduğunu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 1 Boyutlandırılan sistemin verimliliği

Burada depolama olarak gösterilen yeşil eğrinin verilerin ortalaması verilen süre boyunca sıfırdan küçük değildir.

4.2 Sistemin Maliyeti

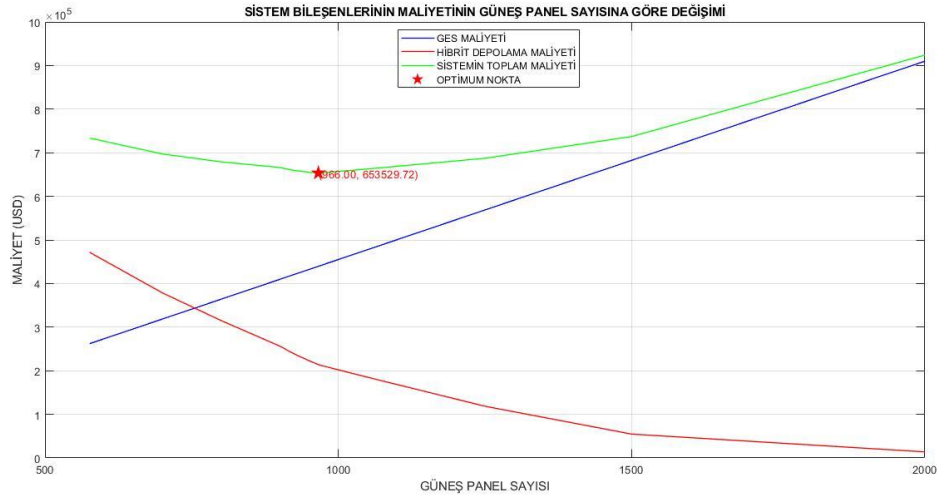
Sistemin verimliliğini garanti edildikten sonra, sistemin en uygun maliyetini bulmak üzere gerekli simülasyonlar yapıldı. Önce **3.2.3.4 Hibridizasyon kriterleri** kısmında verilen hibridizasyon kriterleri uygulayarak algoritma tarafından seçilen depolama sistemlerin formülü oluşturuldu. Daha sonra üretim için güneş enerji santralının maliyeti, çeşitli depolama sistemlerin maliyetleri ve tüm sistemin 10 yıllık bakım maliyeti girildi. Bu verilerin girilmesine istinaden sistemin en uygun maliyetini bulmak üzere binlerce iterasyon içeren bir simülasyon yapıldı.

Simülasyon sonuçların çok olması sebebiyle çizelge 4.1’de bir kısmı verildi. Sitemin en düşük maliyeti 653 529,72 USD olduğunu görülmektedir.

Çizelge 4. 1 Boyutlandırılan sistemin optimizasyon sonuçları

Güneş panel sayısı	Batarya kapasitesi (kWh)	Süperkapasitör kapasitesi (Wh)	Sistemin toplam maliyeti (USD)
576	8 483	5	733 644,72
700	6 794	5	697 169,72
800	5 639	5	679 144,72
900	4 575	5	666 124,72
925	4 243	5	659 239,72
950	3 965	5	655 324,72
965	3 809	5	653 569,72
966	3 800	5	653 529,72
967	3 793	5	653 599,72
975	3 739	5	654 269,72
990	3 645	5	655 924,72
1 000	3 583	5	657 064,72
1 250	2 064	5	687 269,72
1 500	903	5	737 164,72
2 000	162	5	923 909,72

Simülasyon boyunca sistemin bileşenlerinin maliyetleri değişmesi ise şekil 4.2’de verildi.



Şekil 4. 2 Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin güneş panel sayısına göre değişimi

Güneş panelin sayısı arttığı sürece güneş enerji santralının maliyeti artmaktadır, fakat hibrit depolamanın maliyeti ise düşmektedir. Gerçekleşen simülasyonlar sonucunda bulunan sonuçların doğruluğunu teyit etmek amacıyla, hibrit olmayan yanı tek depolama yönteminden oluşan bir sistem için gerekli simülasyonlar gerçekleştirildi.

Bu tek depolama yöntemli olan sistem, boyutlandırılan hibrit depolamalı sistemden hiçbir farkı yoktur. Her iki sistemin parametreleri ortaktır, yalnız depolama sisteminde birinde hibrit olup batarya ile süper kapasitör kullanılırken diğerinde ise sadece bataryadan oluşan tek depolama sisteminden oluşmaktadır.

Tek depolama yöntemli sistemi için elde edilen simülasyon sonuçları çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4. 2 Tek depolama sistemli yapı için optimizasyon sonuçları

Güneş panel sayısı	Batarya kapasitesi (kWh)	Sistemin toplam maliyeti (USD)
965	3 809	658 569,72
966	3 800	658 529,72
967	3 793	658 599,72

Sonuçlar incelendiğinde hibrit depolamalı sistemin sonuçlarından pek bir fark olmadığı görülmektedir. Gerekli güneş panel adedi ve gerekli batarya kapasiteleri birebir aynıdır. Sadece sistemin toplam maliyetinde bir farklılık söz konusudur. Bu maliyetteki değişiklik bataryanın yükler tarafından talep edilen ani güçlerden ötürü bozulmasından kaynaklı bakım maliyetlerinden oluşmaktadır. Bu bakım maliyetleri çizelge 4.2’de görüldüğü gibi uzun vadeli olarak sistemin toplam maliyetini olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

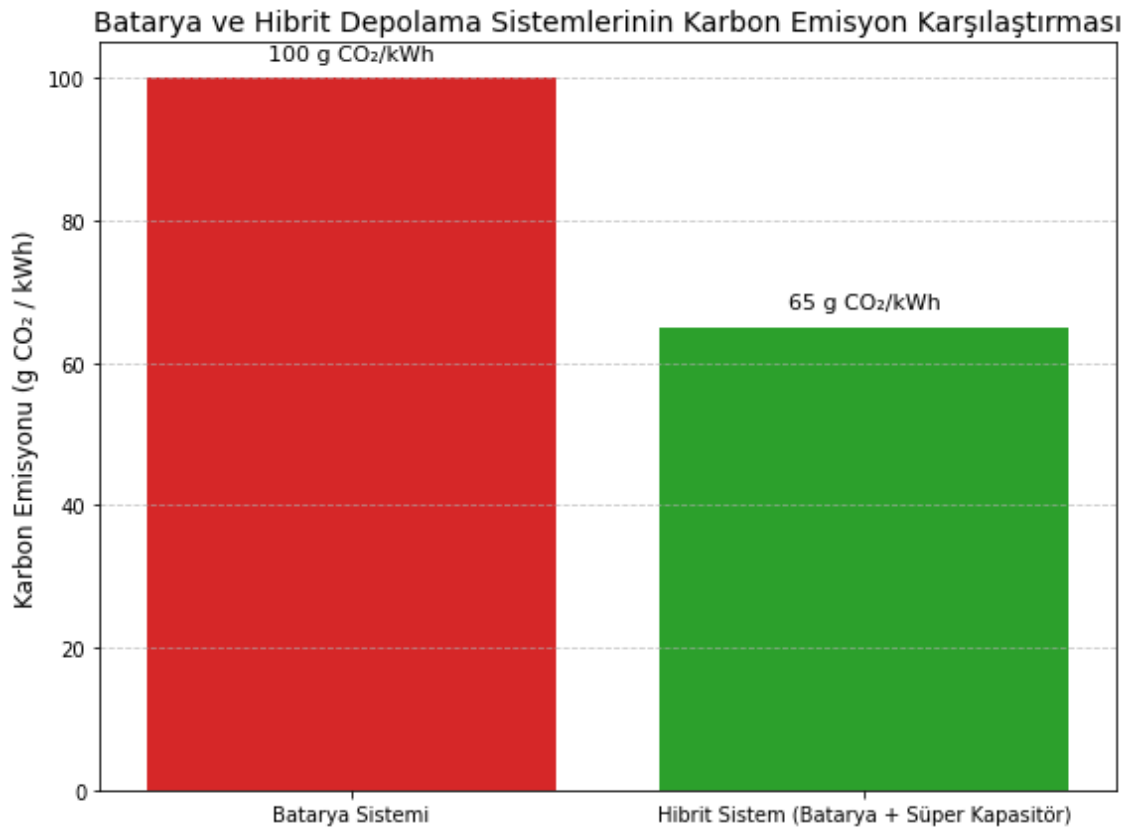
4.3 Sistemin Karbon Emisyonuna Etkisi

Yenilenebilir enerji sistemlerinde yapılan çeşitli hibrit depolama kombinasyonları incelemeleri sonucunda, en uygun hibrit enerji depolama yöntemi olarak batarya-süper kapasitör kombinasyonu öne çıkmaktadır.

Süper kapasitörler, ani güç taleplerini hızlı bir şekilde karşılayabildikleri için bataryaların sürekli yüksek güç çıkışında çalışmasını engeller. Bu durum bataryaların daha verimli çalışmasını ve ömrünün uzamasını sağlar. Uzun ömürlü bataryalar, daha az üretim ihtiyacı anlamına gelir; bu da batarya üretiminden kaynaklanan dolaylı karbon emisyonlarını azaltır.

Hibrit enerji depolama sistemler, güneş ve rüzgâr gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonunu kolaylaştırır. Enerji arz-talep dengesizliği durumlarında hızlı tepkime verebilen süper kapasitörler ve uzun süreli enerji sağlama kapasitesine sahip bataryalar sayesinde, fosil yakıtla çalışan yedek güç sistemlerine olan ihtiyaç azalır. Bu da doğrudan karbon salımının düşürülmesine katkı sağlar.

Hibrit depolama sistemin karbon emisyonu etkileri daha kolay bir şekilde ifade etmek üzere hem batarya hem batarya-süper kapasitör kombinasyonundan oluşan depolama sistemlerin karbon emisyon etkisini şekil 4.3’te verilmektedir.



Şekil 4. 3 Batarya ve batarya-süper kapasitör depolama sistemlerin karbon emisyonu

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tezde yapılan çalışmalar, birçok çalışmalara göre gerçek bir fizibilite çalışması sonucunda alınan verilerden yapılmaktadır ve gerekli hesaplamalar için prosedürümüze uygun formüllerden faydalandık. Bu şekilde daha gerçek ve doğru sonuçlara vardık.

Sistemde yer alan malzemeler ise literatürde bulunan çalışmalardakilerden pek bir farkı yoktur, çünkü güneş enerji sistemlerde standart kullanılan malzemelerden seçilmiştir. Ayrıca sistemin şebekeye bağlı olmaması, şebekeye bağlı sistemlere göre, depolama sistemleri gerektirmektedir.

Bir yandan hibrit bir depolama sistemin kullanılması, tek bir depolama sistemine göre ciddi anlamda maliyetimizi düşürmektedir. Öte yandan güç sağlayıcı olarak süperkapasitör ve enerji sağlayıcı olarak batarya kullanmamız sistemi en verimli hale getirmiştir.

Belirlenen hibridizasyon kriterlerin ve optimizasyon algoritmaların yardımıyla sistemin maliyetinin ve verimliliğinin tam optimum noktasını bulundu.

Hibrit depolamalı olmayan sistemlerde depolama aygıtı olarak genelde batarya kullanılmaktadır. Tam ve kısmi şarj/deşarj döngüleri sırasında ortaya çıkabilecek sorunlar, batarya ömrü üzerinde olumsuz bir etki yaratır ve sistem maliyetlerini arttırır. Bu sistemi için sadece batarya kullansaydık, çalıştığı sürece bakım maliyetlerinden kaynaklı sistemin toplam maliyetinde kesinlikle bir artış söz konusu olacağını unutulmamalıdır. Hibrit depolama sistemin daha verimli ve az maliyetli olduğunu söylenebilir.

Sonuç olarak, süper kapasitör ve batarya bileşenlerinden oluşan hibrit enerji depolama sistemleri hem sistem verimliliğini artırarak hem de yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırarak karbon emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu özellikleriyle, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte çevre dostu bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte depolama maliyetlerini en aza indirmek için yeni hibridizasyon kriterleri üzerinde daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Aceves S M, Berry G D, Espinosa-Loza F, 2010, High-density automotive hydrogen storage with cryo-compressed tanks, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(3), 1219–1226.
- Adeyinka A M, Esan O C, Ijaola A O, Farayibi P K, 2024, Advancements in hybrid energy storage systems for enhancing renewable energy-to-grid integration, *Sustainable Energy Research*, 11:26, DOI: 10.1186/s40807-024-00120-4.
- Ahluwalia R K, Hua T Q, Peng J K, 2012, Hydrogen storage options for light-duty vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3), 2891–2910.
- Akarslan E, Hocaoglu F O, 2017, A novel method based on similarity for hourly solar irradiance forecasting, *Renewable Energy*, 112, 337–346, DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.058.
- Akarslan E, Hocaoglu F O, 2018, Bir fotovoltaik güç sisteminin üretiminin çok boyutlu tahmin filtreleri ile modellenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 516–522, DOI: 10.5578/fmbd.67026.
- Amendola S C, Sharp-Goldman S L, Janjua M S, Spencer N C, Kelly M T, Petillo P J, Binder M, 2000, A safe, portable, hydrogen gas generator, *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(10), 969–975.
- Amrouche S O, Rekioua D, Rekioua T, 2015, Overview of energy storage in renewable energy systems, 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 20914–20927, DOI: 10.1109/IRSEC.2015.7454988.
- Aneke M, Wang M, 2016, Energy storage technologies and real life applications, *Applied Energy*, 179, 350–377, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097.
- Barbir F, 2005, PEM fuel cells: Theory and practice, Academic Press.
- Barbir F, 2005, Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier, *Energy*, 30(14), 2911–2922.

- Bhatia S K, Myers A L, 2006, Optimum conditions for adsorptive storage, *Langmuir*, 22(4), 1688–1700.
- Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, Timbus A V, 2004, Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1398–1409.
- Bocklisch T, 2015, Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 499–507.
- Bocklisch T, 2016, Hybrid energy storage approach for renewable energy applications, *Journal of Energy Storage*, 8, 311–319, DOI: 10.1016/j.est.2016.01.004.
- Bogdanović B, Schwickardi M, 1997, Ti-doped alkali metal aluminium hydrides, *Journal of Alloys and Compounds*, 253–254, 1–9.
- Bogdanović B, Felderhoff M, Kaskel S, Pommerin A, Schlichte K, Schüth F, 2000, Improved hydrogen storage properties, *Advanced Materials*, 15(22), 1834–1837.
- Bossel U, Eliasson B, Taylor G, 2003, The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, *European Fuel Cell Forum*.
- Buchmann I, 2011a, Batteries in a portable world: A handbook on rechargeable batteries for non-engineers (3rd ed.), Cadex Electronics Inc.
- Buchmann I, 2011b, Batteries in a portable world: A handbook on rechargeable batteries for non-engineers (3rd ed.), Cadex Electronics.
- Buresch M, 1983, Photovoltaic energy systems: Design and installation, McGraw-Hill.
- Burke A, 2007, R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors, *Electrochimica Acta*, 53(3), 1083–1091.
- Cabeza L F, Castell A, Medrano M, Leppers R, Zubillaga O, 2010, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*, 42(7), 1037–1044.
- Calais M, Myrzik J M A, Spooner T, Agelidis V G, 2002, Inverters for grid-connected photovoltaic systems, *IEEE Power Electronics Society Newsletter*, 15(1), 20–26.

- Callahan M S, Acorn L R, 2019, Electrical energy storage systems: Fundamentals (2nd ed.), Academic Press.
- Carrasco J M, Franquelo L G, Bialasiewicz J T, Galván E, Guisado R C P, Prats M A M, León J I, Moreno-Alfonso N, 2006, Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1002–1016.
- Ceylan İ, Gürel A E, 2021, Güneş Enerjisi Sistemleri ve Tasarımı, 3, Dora Yayıncılık, 123–138.
- Chandra D, Reilly J J, Chellappa R, 2006, Metal Hydrides for Vehicular Applications: The State of the Art.
- Chen H, Cong T N, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y, 2009, Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312.
- Chen Z, Zhang X, 2018, Energy storage technologies: A review on thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 208–218, DOI: 10.1016/j.rser.2018.01.061.
- Cheng X, Behrens P, Gasper P, Smith K, Hu M, 2023, Recent advances in the integration of renewable energy sources and storage facilities with hybrid power systems, *Cleaner Engineering & Technology*, 12, 100598.
- Conway B E, 1999, Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, Springer.
- Cooper A, Scott A, Fowler D, Wilhelm F, Monk V, Cheng H, Pez G, 2008, Presentation at 2008 DOE Hydrogen Program Meeting, June 2008.
- Darkrim F, Malbrunot P, Tartaglia G P, 2002, Hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(2), 193–202.
- Dillon A C, Jones K M, Bekkedahl T A, Kiang C H, Bethune D S, Heben M J, 1997, Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes, *Nature*, 386(6623), 377–379.
- Dincer I, Rosen M A, 2011, Thermal energy storage: Systems and applications, John Wiley & Sons.

- Dounis A I, Caraiscos C, 2009, Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1246–1261.
- Duffie J A, Beckman W A, 2013, *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.), Wiley.
- Dunn B, Kamath H, Tarascon J M, 2011, Electrical energy storage, *Science*, 334(6058), 928–935.
- Eberle U, Müller B, von Helmolt R, 2009, Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2010, *Energy & Environmental Science*, 5(10), 8780–8798.
- EPIA (European Photovoltaic Industry Association), 2016, *Global market outlook for photovoltaics*.
- Esrām T, Chapman P L, 2007, Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- Farid M M, Khudhair A M, Razack S A K, Al-Hallaj S, 2004, A review on phase change energy storage: Materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
- Farrag M, Lai C S, Darwish M, Taylor G, 2024, Improving the efficiency of electric vehicles: Advancements in hybrid energy storage systems, *Vehicles*, 6(3), 1089–1113.
- Femia N, Granozio D, Petrone G, Spagnuolo G, Vitelli M, 2005, Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963–973.
- Ferrier M, 2008, Superconducting magnetic energy storage: Status and perspective, *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(6), 1075–1081, DOI: 10.1109/TMAG.2008.920470.
- Fichtner M, 2005, Nanotechnological aspects in materials for hydrogen storage, *Advanced Engineering Materials*, 7(6), 443–455.
- Fischer A, Mörs H, 2014, Liquid organic hydrogen carriers, *Journal of Power Sources*, 264, 33–38.

- Gallo A B, Simões-Moreira J R, Costa H K M, Santos M M, Mouthino dos Santos E, 2016, Energy storage in the energy transition context, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 800-822, DOI:10.1016/j.rser.2016.07.028.
- Gao L, Li Y, Wang J, 2019, Cost-effective materials and applications in thermal energy storage, *Energy Storage Materials*, 21, 102–112, DOI:10.1016/j.ensm.2018.12.012.
- Gerboni R, Salvador E, 2008, Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis, *Energy*.
- Gonzalez E A, Molina M G, Jimenez R, 2009, Performance assessment of supercapacitor-based energy storage systems for microgrid applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(1), 69–76.
- Gonzalez F, 2019, Mechanical systems in energy storage applications, *Applied Mechanics Review*, 58(3), 55–67.
- Götz M, Lefebvre J, Mörs F, Koch A, Graf F, Bajohr S, Reimert R, Kolb T, 2016, Renewable Power-to-Gas, *Renewable Energy*, 85, 1371–1390.
- Graetz J, Reilly J J, 2005, Aluminum hydride as a hydrogen storage material, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 7(20), 3793–3799.
- Graetz J, Reilly J J, Yartys V A, Maehlen J P, Bulychev B M, Antonov V E, Tarasov B P, Gabis I E, 2004, Mechanistic studies of the dehydrogenation of alane, *Journal of Alloys and Compounds*, 370(1–2), 271–276.
- Graves C, Ebbesen S D, Mogensen M, Lackner K S, 2011, Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO₂ and H₂O with renewable or nuclear energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 1–23.
- Green M A, 2003, *Solar cells: Operating principles, technology and system applications*, University of New South Wales.
- Green R L, 2016, Introduction to magnetic energy storage systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 2348–2355, DOI:10.1109/TPEL.2016.2518765.
- Gross K J, Sandrock G, Thomas G J, Jensen C M, 2002, Catalyzed NaAlH₄ for hydrogen storage, *Journal of Alloys and Compounds*, 330–332, 683–690.

- Guan B Y, Kushima A, Yu L, Li S, Li J, Lou X W, 2011, Coordination polymers derived general synthesis of multi-shelled mixed metal-oxide hollow spheres with superior lithium storage properties, *Advanced Materials*, 29(6), 1605902.
- Gupta M K, 2010, Magnetic energy storage: Principles and techniques, *Journal of Applied Physics*, 78(1), 1–15, DOI:10.1063/1.3479475.
- Güven H, Yıldız A, Şahin M, 2015, Dış aydınlatmalarda astronomik zaman rölesi ile enerji tasarrufu, *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO)*, 14–17.
- He X, Zhang W, Li L, 2017, Heat transfer mechanisms in thermal energy storage systems, *International Journal of Energy Research*, 41(11), 1680–1693, DOI:10.1002/er.3728.
- Hemmati R, Saboori H, 2016, Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65(3), 11-23, DOI:10.1016/j.rser.2016.06.029.
- Hohm D P, Ropp M E, 2003, Comparative study of maximum power point tracking algorithms, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11(1), 47–62.
- Huskinson B, Marshak M P, Suh C, Er S, Gerhardt M R, Galvin C J, Chen X, Aspuru-Guzik A, Gordon R G, Aziz M J, 2014, A metal-free organic–inorganic aqueous flow battery, *Nature*, 505(7482), 195–198, DOI:10.1038/nature12909.
- Hussein K H, El-Gezawi H A, 1995, Maximum power point tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 142(1), 59–64.
- Jentsch M, Trost T, Sterner M, 2009, Optimal use of power-to-gas systems, *Energy Procedia*, 46, 254–261.
- Khan M J, Iqbal M T, 2005, Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system, *Renewable Energy*, 30(3), 421–439.
- Khan M R, Haider Z M, Malik F H, Almasoudi F M, Alatawi K S S, Bhutta M S 2024, A comprehensive review of microgrid energy management strategies considering

- electric vehicles, energy storage systems, and AI techniques, *Processes*, 12(2), 270.
- Khan S M, Ali A, Raza W, 2019, Advancements in thermal energy storage Technologies, *Energy Reports*, 5, 1083–1093, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.07.016>.
- Kim Y S, Lee J Y, Lee H, 2004, Hydrogen generation by hydrolysis of NaBH₄ solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(3), 263–267.
- Koşar C, 2021, Hydrogen Storage Methods, *Open Journal of Nano*, Sakarya.
- Koutroulis E, Blaabjerg F, 2012, Design and control of a grid-connected photovoltaic system with battery storage, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 6239–6253.
- Kuşdoğan Ş, 2017, Yenilebilir Enerji Uygulamalarında Hibrit Enerji Depolama Teknolojileri ve Uygulamaları, V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, III. Güç ve Enerji Sistemleri Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 3-5.
- Larminie J, Dicks A, 2003, *Fuel cell systems explained* (2nd ed.), Wiley.
- Latroche M, 2004, Structural and thermodynamic properties of metallic hydrides used for energy storage, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(2-3), 517–522, <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2003.08.037>.
- Latroche M, 2005, La feuille de calcul Excel 'Banc-type'. Document interne au LCMTR.
- Lee Y, 2019, Capacitor design for long-term energy storage applications *Electrochemistry Communications*, 27, 78–83, <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.03.008>.
- Lemofouet S, Rufer A, 2006, A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1105–1115, <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878323>.
- Leonzio G, 2017, Process simulation of power-to-gas systems. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1084–1093.
- Leung P, Li X, Ponce de León C, Berlouis L, Low C T J, Walsh F C, 2012, Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy

- storage, RSC Advances, 2(27), 10125–10156, <https://doi.org/10.1039/c2ra21342g>.
- Li F, Xu Z, 2020, Low-cost thermal energy storage systems for heating and cooling, Journal of Energy Engineering, 146(2), 314–327, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000677](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000677).
- Linden D, Reddy T B, 2002, Handbook of Batteries (3rd ed.) McGraw-Hill.
- Liu C, Fan Y Y, Liu M, Cong H T, Cheng H M, Dresselhaus M S, 1999, Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature, Science, 286(5442), 1127–1129.
- Liu Y, Wang L, Zhang Z, 2013, Kinetic study of catalytic dehydrogenation of ammonia borane, Journal of Power Sources, 229, 25–31.
- Lu L, Han X, Li J, Hua J, Ouyang M, 2013, A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, Journal of Power Sources, 226, 272–288.
- Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J, 2015, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the applications potential in power system Operation, Applied Energy, 137, 511–536, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
- Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J, 2015, Overview of current development in electrical energy storage technologies. Applied Energy, 137, 511–536.
- Maham F E, Akarslan E, 2022, Güneş Işınım Tahmini için Farklı Güneşlenme Durumlarından Faydalanan Hibrit Bir Yöntem Tasarımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(3), 588-596, <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1074290>.
- Mahdavi A, Shabunko V, Dervishi S, 2008, Control strategies for dynamic daylight-linked lighting systems, Energy and Buildings, 40(3), 275–285.
- Márquez A, Martinez L, Ruiz F, 2020, Phase change materials for thermal energy storage systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 122, 109–120, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109120>.
- Masters G M, 2013, Renewable and efficient electric power systems (2nd ed.), Wiley.

- Mauron P, Buchter F, Friedrichs O, Remhof A, Züttel A, Nützenadel C, 2004, Stability and reversibility of complex hydrides, *Journal of Physical Chemistry B*, 108(42), 16064–16070.
- Mehling H, Cabeza L F, 2008, Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications, Springer.
- Miller J M, Burke A F, 2008, Electric and hybrid vehicle energy storage systems, *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 806–820.
- Miller J R, Burke A F, 2008, Electrochemical capacitors: Challenges and opportunities for real-world applications, *The Electrochemical Society Interface*, 17(1), 53–57.
- Mori D, Hirose K, 2007, Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles, *World Hydrogen Technologies Convention Proceedings*.
- Nagaura T, Tozawa K, 1990, Lithium ion rechargeable battery, *Progress in Batteries & Battery Materials*, 9, 209–217.
- Nair K N, 2018, Supercapacitors and capacitors for energy storage applications, *Energy Sources*, 45(3), 212–218.
- Nguyen J D, 2020, Electrochemical energy storage technologies: Capacitors vs. batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, 50(2), 211–218, <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01366-7>
- Nitta N, Wu F, Lee J T, Yushin G, 2015, Li-ion battery materials, *Materials Today*, 18(5), 252–264.
- Nitta N, Wu F, Lee J T, Yushin G, 2015, Li-ion battery materials: Present and future, *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Niu C, Sichel E K, Hoch R, Moy D, Tennent H, 1997, High power electrochemical capacitors based on carbon nanotube electrodes, *Applied Physics Letters*, 70(11), 1480–1482.
- Orimo S, Nakamori Y, Eliseo J R, Züttel A, Jensen C M, 2007, Complex hydrides for hydrogen storage, *Chemical Reviews*, 107(10), 4111–4132.

- Pech D, Brunet M, Durou H, Huang P, Mochalin V, Gogotsi Y, Plee D, 2010, Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon, *Nature Nanotechnology*, 5(9), 651–654.
- Pistoia G, (Ed.), (2005), *Battery operated devices and systems: From portable electronics to industrial products*, Elsevier.
- Ponce de León C, Frías-Ferrer A, González-García J, Szánto D A, Walsh F C, 2006, Redox flow cells for energy conversion, *Journal of Power Sources*, 160(1), 716–732. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.095>.
- Qin F, Guo L H, Chen J P, Chen Z J, 2008, Pulverization, expansion of La_{0.6}Y_{0.4}Ni_{4.8}Mn_{0.2} during hydrogen absorption-desorption cycles and their influences in thin-wall reactors, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2), 709–717.
- Rahman M A, Wang X, Wen C, Wang G, 2021, Review of zinc–bromine flow batteries: Electrochemical performance, technology development, and future perspectives. *Advanced Functional Materials*, 31(11), 2008002, <https://doi.org/10.1002/adfm.202008002>.
- Rogers D, 2010, *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*, Wiley.
- Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro A, 2009, Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11), 1555–1578.
- Sandrock G, 1999, A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view, *Journal of Alloys and Compounds*, 293-295, 877–888.
- Santos A, Silveira J, Rodrigues E, 2017, Thermochemical energy storage: A promising solution for long-term energy management, *Journal of Energy Storage*, 13, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.06.002>.
- Satyapal S, Petrovic J, Read C, Thomas G, Ordaz G, 2007, The U.S. Department of Energy's national hydrogen storage project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements, *Catalysis Today*, 120(3-4), 246–256.
- Scherer G W H, Newson, E, Wokaun A, 1999, *J Hydr Energy*, 24, 1157.

- Schlapbach L, Züttel A, 2001, Hydrogen-storage materials for mobile applications, *Nature*, 414(6861), 353–358.
- Schulz R, 2002, Metal hydride for hydrogen storage. 14th World Hydrogen Energy Conference, Montréal, 12 June 2002.
- Scrosati B, Garche J, 2010, Lithium batteries: Status and prospects, *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430.
- Shezan S A, Kamwa I, Ishraque M F, Muyeen S M, Hasan K N, Saidur R, Rizvi S M, Shafiullah M, Al-Sulaiman F A, 2023, Evaluation of different optimization techniques and control strategies of hybrid microgrid: A review. *Energies*, 16(4), 1792.
- Simon P, Gogotsi Y, 2008, Materials for electrochemical capacitors, *Nature Materials*, 7(11), 845–854.
- Singhal S C, 2000, Advances in solid oxide fuel cell technology, *Solid State Ionics*, 135(1–4), 305–313, [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00452-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00452-5).
- Skyllas-Kazacos M, Kazacos M, 2011, State of charge monitoring methods for vanadium redox flow battery control, *Journal of Power Sources*, 196(20), 8822–8827, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.054>.
- Skyllas-Kazacos M, Chakrabarti M H, Hajimolana S A, Mjalli F S, Saleem M, 2011, Progress in flow battery research. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(8), R55–R79.
- Smith A B, Jones C D 2015, Superconducting magnetic energy storage systems: A review, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(4), 1235–1242, <https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2399623>.
- Soloveichik G L, 2015, Flow batteries: Current status and trends, *Chemical Reviews*, 115(20), 11533–11558. <https://doi.org/10.1021/cr500720t>.
- Srinivasan S, Chakrapani K, Pillai S, 2003, Ammonia borane as a hydrogen storage material, *Journal of Power Sources*, 119(1), 2–10.

- Staffell I, Scamman D, Abad A V, Balcombe P, Dodds P E, Ekins P, Shah N, 2019, The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491.
- Sterner M, Stadler I, 2014, *Handbook of Energy Storage*, Springer.
- Şen Z, 2014, Güneş enerjisi, Su Vakfı Yayınları.
- Tarasov B P, Lototskii M V, Yartys' V A, 2007, Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation, *Russian Journal of General Chemistry*.
- Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L, 2013, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327–349.
- Tiwari G N, Dubey S, 2016, *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*, Royal Society of Chemistry.
- Turner J A, 2004, Sustainable hydrogen production, *Science*, 305(5686), 972–974.
- Tymvios F S, Jacovides C P, Michaelides S C, Scouteli C, 2005, Comparative Study of Angstrom's and Artificial Neural Networks Methodologies in Estimating Global Solar Radiation. *Solar Energy*, 78, 752-762.
- Uzun İ, 2000, *Nümerik Analiz*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., ISBN: 975-486-952-7, Kırıkkale.
- Üçgül İ, Akarslan F, Şencan A, 2003, Dokuma Kumaşların Kuruma Hızı Değerlerinin Yapay Sinir Ağları Metodu İle Tahmini, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 23(1).
- Varin R A, Czujko T, Wronski Z S, 2009, *Nanomaterials for solid state hydrogen storage*, Springer.
- Weidong X, Liuchen C, 2006, Power control of a photovoltaic system based on maximum power point tracking with a boost converter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3), 792–797.
- Wieczorek M, Lewandowski M, Jefimowski W, 2019, Cost comparison of different configurations of a hybrid energy storage system with battery-only and supercapacitor-only storage in an electric city bus, *Bulletin of the Polish Academy*

- of Sciences, Technical Sciences, 67(6), 1095–1106
DOI:10.24425/bpasts.2019.131567.
- Yang J, Sudik A, Wolverton C, Siegel D J, 2010, High capacity hydrogen storage materials, *Chemical Society Reviews*, 39(2), 656–675.
- Yılmaz S, Atik K, 2007, Modeling Of A Mechanical Cooling System, Whose Capacity Is Controlled By The Modification Of The Condenser Temperature, By Using Artificial Neural Network, *Applied Thermal Energy*, 27, 2308–2313.
- Yildirim E, Aydin O, 2019, Thermal energy storage: Techniques and applications. *Journal of Thermal Engineering*, 45(3), 234–247.
- Zalba B, Marín J M, Cabeza L F, Mehling H, 2003, Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- Zaluska A, Zaluski L, Ström-Olsen J O, 2001, Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage, *Journal of Alloys and Compounds*, 298(1–2), 125–134.
- Zeng H Y, Zhou Z L, 2021, Energy storage through electromagnetics: A review, *Energy Materials*, 12, 143–151, <https://doi.org/10.1016/j.enmat.2021.03.001>.
- Zhang J, Yu B, Wang X, 2018, High-energy density storage systems: The role of phase change materials in thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*, 163, 442–453. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.041>.
- Zhang L L, Zhao X, 2009, Carbon-based materials as supercapacitor electrodes, *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531.
- Zhang S S, 2011, Battery performance in electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 196(13), 5860–5863.
- Zhang X, Chen Y, Li X, 2020, A review of hydrogen storage and transport, *Energy Reports*, 6, 2653–2666. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.038>.
- Zhang Y, Ichikawa T, Isobe S, Kojima Y, 2007, Hydrogen generation from NaBH₄ solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16), 3268–3273.
- Zhang Z, Liu Y, 2007, Hydrogen release from ammonia borane, *Journal of Alloys and Compounds*, 441(1–2), 302–307.

- Zhang Z, Liu Y, Wang C, 2011, A new method for hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 149–156.
- Zhao F, Virkar A V, 2005, Dependence of polarization in a PEM fuel cell on reactant pressures, temperature, and relative humidity, *Journal of Power Sources*, 139(1–2), 79–90, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.06.061>.
- Zhao P, Dai Y, Wang J, 2014, Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application, *Energy*, 70, 674–684. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.055>.
- Züttel A, 2003, Materials for hydrogen storage, *Materials Today*, 6(9), 24–33.
- Züttel A, 2007, Hydrogen storage methods, *Naturwissenschaften*, 94(10), 811–825.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>, 11.12.2023
- 2- http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/national_h2_roadmap.pdf, 11.12.2023
- 3- <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx>, 23.12.2023
- 4- http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/stp_25_Cooper.pdf, 23.12.2023
- 5- <https://doi.org/10.1126/science.1212741>, 09.05.2024
- 6- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>, 11.05.2025
- 7- <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>, 11.05.2025
- 8- <https://doi.org/10.1149/1.3599565>, 19.05.2025
- 9- <https://www.ise.fraunhofer.de/>, 20.05.2025
- 10- <https://www.intechopen.com/chapters/71602>, 24.05.2024
- 11- <https://modern-physics.org/thermochemical-batteries/>, 26.05.2025