ALİ AYAZSEVEN

İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK
LİSANS
TEZİ

SÜPER KAPASİTÖR VE LİTYUM POLİMER PİLLERİN SABİT YÜK ALTINDADEŞARJ ANALİZLERİNİN VERİMLİLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

ALİ AYAZSEVEN

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANA BİLİM DALI

OCAK 2026

OCAK 2026

SÜPER KAPASİTÖR VE LİTYUM POLİMER PİLLERİN SABİT YÜK ALTINDA DEŞARJ ANALİZLERİNİN VERİMLİLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Ali AYAZSEVEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

Ali AYAZSEVEN tarafından hazırlanan "SÜPER KAPASİTÖR VE LİTYUM POLİMER PİLLERİN SABİT YÜK ALTINDA DEŞARJ ANALİZLERİNİN VERİMLİLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI." adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Suha Orçun MERT

Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Mehmet Hakan DEMİR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Altuğ KARABEY

Enerji Bilim Anabilim Dalı, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 14/01/2026

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..
Prof. Dr. Abdullah ÖZKAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ☑ Yükseköğretim Kuruluna gönderilen kopya ile tarafından Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'ne verilen basılı ve/veya elektronik kopyaların birebir aynı olduğunu,
- ☑ Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ☑ Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ☑ Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- ☑ Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ☑ Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Ali AYAZSEVEN

...../……/……

SÜPER KAPASİTÖR VE LİTYUM POLİMER PİLLERİN SABİT YÜK ALTINDA DEŞARJ ANALİZLERİNİN VERİMLİLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Ali AYAZSEVEN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Enerji depolama teknolojileri, günümüzde artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve mobil sistemlerin yaygınlaşması nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Özellikle enerji sistemlerinde süreklilik, güvenilirlik ve verimlilik konuları depolama birimlerinin karakteristiklerine doğrudan bağlıdır. Bu çalışmada süperkapasitörler ile lityum polimer (Li-Po) pillerin sabit yük altında deşarj performansları ve enerji verimliliği yönünden kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışmada yöntem, ayrı ayrı süperkapasitör ve lityum polimer pillerin 13.8 volt seviyesine kadar şarj edilip aynı sabit yük altında bir deney düzeneği kurularak 10,5 volta kadar deşarj analizlerinin yapılması şeklinde belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde sabit yük altında hem süperkapasitörler hem de Li-Po pillerin gerilim-zaman eğrileri, akım-zaman eğrileri, enerji kayıpları ve verimlilikleri analiz edilmiş, iki tip enerji depolama sistemi arasındaki fark verimlilik açısından ortaya konulmuştur. Ayrıca, son yıllarda öne çıkan enerji depolama araçlarından süperkapasitör ve lityum polimer piller ile ilgili son 15 yılda yapılmış çalışmalar, araştırma konusuna katkısı bakımından incelmiştir.

Sonuç olarak; süperkapasitörlerin hızlı deşarj olma ve yüksek akım verebilme özelliği net olarak ortaya çıkmıştır. Li-Po pillerin ise süperkapasitörlere nazaran daha kısıtlı akım sağladığı ve daha uzun sürede deşarj olduğu görülmüştür. Öyle ki; 60 watt güç çeken bir yük altında süperkapasitör 13,8-10,5 volt aralığında yaklaşık 1 dakikada deşarj olurken, Li-Po pil yaklaşık 15 dakikalık süre boyunca yüke enerji sağlayabilmiştir. Ayrıca, süperkapasitörlerin ani güç çeken sistemlerde daha verimli çalıştığı, Li-Po pillerin ise stabil enerji gerektiren sistemlerde daha verimli olduğu ortaya konulmuştur. Bu bulgular çerçevesinde; süperkapasitörler ile Li-Po pillerin hibrit bir sistem içerisinde birlikte kullanılması daha verimli olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolama, süperkapasitör, lityum polimer pil, Li-Po pil, deşarj analizi, verimlilik
Sayfa Adedi :67
Danışman : Prof. Dr. Suha Orçun MERT

COMPARISON OF DISCHARGE ANALYSIS OF SUPERCAPACITOR AND LITHIUM POLYMER BATTERIES UNDER CONSTANT LOAD IN TERMS OF EFFICIENCY
(M.Sc. Thesis)

Ali AYAZSEVEN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2026

ABSTRACT

Energy storage technologies have critical importance due to the increasing energy demand in recent years, integration of renewable energy sources and proliferation of mobile systems. Especially, continuity, reliability and efficiency issue in energy systems are directly dependent on the characteristics of storage units. In this study, a comprehensive comparison was made between supercapacitors and lithium polymer (Li-Po) batteries in terms of discharge performance and energy efficiency under constant load.

In this study, the method was determined as charging the supercapacitor and lithium polymer batteries separately up to 13.8 volts and performing discharge analyses up to 10.5 volts by setting up an experimental setup under the same constant load. In the experiments, voltage-time graphes, current-time graphes, energy losses and efficiencies of both supercapacitors and Li-Po batteries under constant load were analyzed and the difference between the two types of energy storage systems was revealed in terms of efficiency. In addition, studies conducted in the last 15 years on supercapacitors and Li-Po batteries, were examined in terms of their contribution to the research topic.

As a result, the fast discharge and high current delivery properties of supercapacitors have been clearly revealed. It has been observed that Li-Po batteries provide more limited current and take longer to discharge than supercapacitors. While the supercapacitor was discharged in the 13.8-10.5 volt range in about 1 minute under a load drawing 60 watts of power, the Li-Po battery was able to provide energy to the load for about 15 minutes. Additionally, it has been shown that supercapacitors operate more efficiently in systems that draw sudden power, while Li-Po batteries are more efficient in systems that requiring stable energy. In the context of these findings, the combined use of supercapacitors and Li-Po batteries in a hybrid system would be more efficient.

Keywords : Energy storage, süpercapacitor, Li-Po batteries, discharge analysis, efficiency
Page : 67
Supervisor : Prof. Dr. Suha Orçun MERT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde değerli bilgi ve deneyimleriyle her aşamada yol gösteren, katkı ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Suha Orçun MERT'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca anlayışı, sabrı ve desteğiyle her zaman yanımda olan motive edici katkılarıyla sürecin tamamlanmasına katkı sağlayan değerli eşim Derya AYAZSEVEN'e ve çalışmanın çeşitli aşamalarında bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlayan arkadaşım Umut GENÇ'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET vi
ABSTRACT vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii
SİMGELER VE KISALTMALAR xiii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR TARAMASI 12
2.1. Süperkapasitörlerin Deşarj Analizleri — Güncel Bulgular 12
2.2. Li-Po (Lityum-Polimer) Pillerin Deşarj Analizleri — Güncel Bulgular 13
2.3. Süperkapasitör — Li-Po Karşılaştırmalı Deneysel Çalışmalar 14
2.4. Literatür Değerlendirmesi ve Bu Tezin Konumlandırılması 14
3. MATERYAL VE METOT 15
3.1. Deney Düzeneği 15
3.2. Deneysel Yöntem 16
3.3. Kullanılan Cihazlarının Özellikleri 17
3.4. Deneysel Hesaplamalar 17
3.5. Deneyin Amacı 18
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 19
4.1. Süperkapasitör Deşarj Analizi 19
4.1.1. Süperkapasitör gerilim-zaman analizi 20
4.1.2. Süperkapasitör akım-zaman analizi 21
4.1.3. Süperkapasitör güç-zaman analizi 22
4.1.4. Süperkapasitör enerji- zaman analizi 23
4.1.5. Enerji ve kayıp analizi 24
4.1.6. Enerji verimliliği analizi 25
4.1.7. Tartışma ve değerlendirme 26
4.2. Li-Po Pil Deşarj Analizi 27
4.2.1. Li-Po pil gerilim-zaman analizi 27

4.2.2. Li-Po pil akım-zaman analizi 29
4.2.3. Li-Po pil güç-zaman analizi 30
4.2.4. Li-Po pil enerji- zaman analizi 31
4.2.5. Enerji ve kayıp analizi 32
4.2.6. Enerji verimliliği analizi 33
4.2.7. Tartışma ve değerlendirme 34
4.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme 35
4.3.1. Süperkapasitör ve Li-Po pil sistemlerinin enerji verimliliği açısından karşılaştırılması 36
4.3.2. Gerilim-zaman analizinin karşılaştırılması 36
4.3.3. Akım-zaman analizinin karşılaştırılması 37
4.3.4. Güç-zaman analizinin karşılaştırılması 38
4.3.5. Enerji-zaman analizinin karşılaştırılması 39
4.3.6. Enerji verimliliği ve kayıpların analizi 40
4.3.7. Toplam enerji verimliliği ve sistem performansı 41
5. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA VE YORUM 44
5.1. Süperkapasitörün Literatürdeki Performans Bulguları 44
5.2. Li-Po Pillerin Literatür Bulguları ile Karşılaştırılması 44
5.3. Genel Karşılaştırmalı Değerlendirme 45
5.4. Literatüre Katkı 45
6. GENEL DEĞERLENDİRME 46
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 48
7.1. Sonuçlar 48
7.2. Öneriler 49
7.3. Genel Sonuç 49
KAYNAKLAR 51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3. 1. Deney düzeneğinin genel görünümü 16
Şekil 4. 1. Süperkapasitör gerilim-zaman analizi grafiği 20
Şekil 4. 2. Süperkapasitör akım-zaman analizi grafiği 21
Şekil 4. 3. Süperkapasitör güç-zaman analizi grafiği 23
Şekil 4. 4. Süperkapasitör enerji-zaman analizi grafiği 24
Şekil 4. 5. Süperkapasitörün enerji-zaman eğrisi 25
Şekil 4. 6. Süperkapasitörün enerji verimliliği-zaman grafiği 26
Şekil 4. 7. Li-Po pilin gerilim-zaman eğrisi 28
Şekil 4. 8. Li-Po pilin akım-zaman eğrisi 29
Şekil 4. 9. Li-Po pilin güç-zaman eğrisi 30
Şekil 4. 10. Li-Po pilin enerji-zaman eğrisi 31
Şekil 4. 11. Li-Po pilin kayıp enerji-zaman eğrisi 32
Şekil 4. 12. Li-Po pilin enerji verimliliği-zaman grafiği 34
Şekil 4. 13. Gerilim-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği 36
Şekil 4. 14. Akım-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği 37
Şekil 4. 15. Güç-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği 38
Şekil 4. 16. Enerji-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği 39
Şekil 4. 17. Kayıp enerji analizi karşılaştırmalı grafiği 40
Şekil 4. 18. Toplam enerji kayıp oranı analizi karşılaştırmalı grafiği 41

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri 17
Çizelge 4.1. Süperkapasitör ve Li-Po pillerin elde edilen verimlilik değerleri 42
Çizelge 4.2. Elde edilen deneysel verilerin karşılaştırma tablosu 43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Amper
C	Kapasitans
DC	Doğru akım
E	Enerji
F	Farad
I	Akım
$LiCoO_2$	Lityüm kobalt oksit
$LiFePO_4$	Lityüm demir fosfat
Li Mn_2O_4	Lityüm manganez oksit
mAh	Miliamper-saat
MnO_2	Manganez dioksit
S	Saniye
P	Güç
R	Direnç
RuO_2	Rutenyum oksit
W	Güç (Watt)
Wh	Watt/saat
Wh/kg	Birim kütle başına enerji yoğunluğu (Watt-saat/kilogram)
W/kg	Birim kütle başına güç yoğunluğu (Watt/kilogram)
V	Gerilim (Volt)
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
mΩ	Elektrik direnci (miliohm)
mΩ/cell	Hücre başına düşen elektrik direnci (miliohm)
Ω	Elektrik akımının direnci (ohm)
η	Verimlilik

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Li-Po pil	Lityum polimer pil

ESR	Eşdeğer seri direnç
SOC	Şarj durumu
SOH	Sağlık durumu
SEI	Katı elektrolit ara yüzeyi
C-rate	Normalize edilmiş sarj-deşarj oranı
CNT	Karbon nanotüp

1. GİRİŞ

Enerji, modern yaşamın sürdürülebilirliği için en temel gereksinimlerden biridir. 21. yüzyılın en belirgin küresel sorunlarından biri, artan enerji talebinin güvenli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılanabilmesidir. Sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler sonucunda dünya genelinde enerji tüketimi her yıl ortalama %2–3 oranında artış göstermektedir (International Energy Agency [IEA], 2023). Özellikle ulaşım, sanayi ve konut sektörlerindeki enerji gereksinimleri, fosil yakıtlara olan bağımlılığı sürdürmekte ve bu durum küresel ısınma, iklim değişikliği ve karbon emisyonlarındaki artış gibi çevresel problemleri beraberinde getirmektedir (Chu ve Majumdar, 2012). Bu nedenle günümüzde enerji sistemlerinin yalnızca verimli değil, aynı zamanda sürdürülebilir olması zorunluluk haline gelmiştir.

Enerji üretiminde yaşanan dönüşüm, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji) hızla artan payıyla kendini göstermektedir. Yenilenebilir enerji, tükenmeyen doğal kaynaklardan elde edilmesi ve düşük karbon salınımı ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması bakımından geleneksel enerji üretim yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunar (Liu ve diğerleri, 2021). Ancak bu kaynakların doğası gereği kesintili ve öngörülemez olmaları, enerji arz-talep dengesinin korunmasını güçleştirmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimli ve kararlı bir şekilde çalışabilmesi için etkin enerji depolama çözümlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Parida ve diğerleri, 2023).

Enerji depolama sistemleri, üretilen enerjinin daha sonra kullanılmak üzere saklanmasına ve arz-talep dengesizliklerinin giderilmesine olanak tanır. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji üretiminin süreksizliği karşısında, enerji sürekliliğini sağlayarak sistem kararlılığını güçlendirir. Ayrıca ani güç taleplerini dengeleyerek şebeke istikrarını artırır ve enerji kayıplarını azaltır (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Günümüzde kimyasal, elektrokimyasal, mekanik, termal ve elektriksel olmak üzere birçok enerji depolama yöntemi geliştirilmiş olsa da, elektrokimyasal enerji depolama sistemleri –özellikle piller ve süper kapasitörler– enerji dönüşüm verimliliği ve uygulama çeşitliliği bakımından ön plana çıkmaktadır (Arani ve diğerleri., 2019).

Sürdürülebilir enerji depolama sistemleri, yalnızca enerji yönetimi açısından değil, karbon nötr hedeflerine ulaşma ve temiz enerji dönüşümü süreçlerinde de stratejik bir role sahiptir. Elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji santrallerine, taşınabilir elektronik cihazlardan akıllı şebekelere kadar geniş bir yelpazede enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu, hem enerji verimliliğini artırmakta hem de fosil yakıt tüketimini azaltmaktadır (Dunn ve diğerleri, 2011). Bu bağlamda, enerji depolama teknolojilerinin performanslarının, çevrim ömürlerinin ve enerji dönüşüm verimliliklerinin araştırılması, sürdürülebilir enerji altyapılarının oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır.

Enerji depolama sistemleri içerisinde lityum polimer (Li-Po) piller ve süper kapasitörler, yüksek performansları ve geniş kullanım alanlarıyla dikkat çekmektedir. Her iki sistem de elektrik enerjisini kimyasal veya elektrostatik biçimde depolayabilmekte, ancak çalışma prensipleri ve performans parametreleri bakımından belirgin farklılıklar göstermektedir (Zhang ve diğerleri., 2021). Bu farkların doğru anlaşılması, belirli uygulamalarda hangi enerji depolama teknolojisinin daha uygun olduğunun belirlenmesi açısından büyük önem taşır.

Süper kapasitörler, enerji depolamada elektrostatik veya pseudokapasitif mekanizmalara dayanan sistemlerdir. Geleneksel kapasitörlere göre çok daha yüksek kapasiteye (farad düzeyinde) sahip olmaları nedeniyle "süper" olarak adlandırılırlar. Süper kapasitörler enerjiyi kimyasal reaksiyonla değil, elektrot ve elektrolit arasındaki yük ayrışmasıyla depolarlar; bu da hızlı şarj ve deşarj olanağı sağlar (Simon ve Gogotsi, 2020).

Bu özellikleri sayesinde süper kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu (10.000 W/kg'a kadar) ve çok uzun çevrim ömrü (bir milyondan fazla çevrim) ile öne çıkar. Ancak dezavantaj olarak düşük enerji yoğunluğu (5–10 Wh/kg) nedeniyle uzun süreli enerji depolama için uygun değildirler (Pandey ve diğerleri, 2022). Bu nedenle kısa süreli güç destekleri, rejeneratif frenleme sistemleri veya anlık enerji transferi gereken uygulamalarda tercih edilirler. Süper kapasitörlerin iç dirençlerinin düşük olması, ısı kayıplarını minimize ederek enerji verimliliğini artırır; ancak gerilim karakteristikleri lineer şekilde azaldığından, sabit voltaj gerektiren sistemlerde ek kontrol devrelerine ihtiyaç duyulur (Gao ve diğerleri, 2021).

Lityum Polimer (Li-Po) piller, lityum iyon pillerin gelişmiş bir varyasyonu olup, katı veya jel elektrolit yapısına sahip olmaları sayesinde daha hafif, esnek ve kompakt bir yapı sunar. Geleneksel lityum iyon pillerde sıvı elektrolit bulunurken, Li-Po pillerde polimer bazlı bir elektrolit kullanılır; bu sayede hücrelerin şekli ve boyutu uygulamaya göre değiştirilebilir (Xu ve diğerleri, 2020). Bu özellikleri nedeniyle Li-Po piller, drone**,** elektrikli araç**,** taşınabilir elektronik cihazlar gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir.

Li-Po pillerin en büyük avantajı, yüksek enerji yoğunluğu (150–250 Wh/kg) sunmalarıdır. Bu, birim kütle başına daha fazla enerji depolanabilmesi anlamına gelir. Ancak bu pillerin iç dirençleri zamanla artabilir ve özellikle yüksek akım çekildiğinde ısı kayıpları meydana gelir. Ayrıca Li-Po pillerin şarj-deşarj çevrim ömürleri genellikle 300–600 çevrim arasında değişmekte olup, bu da kullanım süresini sınırlayabilmektedir (Lee ve Park, 2023). Tüm bu etkenler, Li-Po pillerin enerji verimliliğini doğrudan etkiler. Özellikle sabit yük altında yapılan deşarj testleri, pilin gerilim düşümü**,** ısı üretimi ve iç direnç değişimi gibi karakteristiklerini gözlemlemek açısından önem taşır (Li ve diğerleri, 2021).

Lityum Polimer (Li-Po) piller, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde uzun süreli enerji depolama imkânı sunarken; süper kapasitörler, yüksek güç yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleriyle hızlı enerji transferi gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Zhang ve diğerleri, 2021). Ancak bu iki sistemin enerji verimlilikleri, yük altında gösterdikleri davranışlar ve deşarj karakteristikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle süper kapasitörler ile Li-Po pillerin enerji performanslarının sabit yük altında karşılaştırılması, enerji sistemlerinin tasarımında ve optimizasyonunda kritik bir değerlendirme alanı oluşturmaktadır.

Enerji verimliliği, bir enerji depolama sisteminin ne kadarının kullanılabilir enerjiye dönüştüğünü ifade eden temel bir performans ölçütüdür. Sabit yük altında yapılan deşarj testleri, sistemin iç direnci, gerilim düşümü, akım kararlılığı ve güç kayıpları gibi parametrelerin belirlenmesine olanak tanır. Bu parametreler aracılığıyla sistemlerin toplam enerji dönüşüm verimliliği hesaplanabilir (Chen ve diğerleri, 2020).

Enerji verimliliği genellikle sistemin çıkış enerjisinin giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Bu oran, özellikle iç direnç ve ısıl kayıpların etkisini ortaya koyar. Süper kapasitörlerde düşük enerji yoğunluğuna rağmen yüksek verimlilik oranları elde edilirken;

Li-Po pillerde ise daha yüksek enerji yoğunluğuna karşın ısıl kayıplar ve iç direnç kaynaklı enerji kayıpları gözlemlenmektedir (Lee ve Park, 2023). Dolayısıyla sabit yük koşullarında iki sistemin performanslarının deneysel olarak incelenmesi, gelecekte hibrit enerji depolama sistemlerinin tasarımı için yol gösterici olacaktır (Kumar ve Singh, 2022). Ayrıca, iki sistemin aynı yük koşullarında karşılaştırılması, farklı enerji depolama teknolojilerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyma açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.

Li-Po piller ile süper kapasitörlerin enerji performanslarının karşılaştırılması, enerji yoğunluğu–güç yoğunluğu dengesinin anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Li-Po piller yüksek enerji depolayabilirken, süper kapasitörler enerjiyi çok daha hızlı şekilde verebilir. Bu nedenle, sabit yük altında yapılan deşarj testleri, iki sistemin enerji dönüşüm verimliliklerinin**,** gerilim kararlılığının ve ısı kayıplarının karşılaştırılması açısından en uygun yöntemlerden biridir (Chen ve diğerleri, 2020).

Bu çalışmada süper kapasitör ve Li-Po pil sistemlerinin sabit yük altında deşarj analizleri gerçekleştirilerek, enerji verimliliği açısından kapsamlı bir karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında voltaj, akım, güç, enerji kayıpları ve genel verimlilik değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki sistemin enerji dönüşüm performanslarını değerlendirmek ve belirli uygulamalarda hangi teknolojinin daha uygun olabileceğine ilişkin öneriler geliştirmek açısından yol gösterici olacaktır.

Çalışmanın kapsamı, yalnızca sabit yük altında gerçekleştirilen deşarj testleriyle sınırlıdır. Bu kapsamda kullanılan süper kapasitör ve Li-Po pil modelleri belirli teknik özelliklere sahip olup, deney düzeneği tarafımızdan oluşturulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda sistemlerin enerji verimliliği, iç direnç davranışı ve deşarj eğrileri karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Böylece enerji depolama sistemlerinin seçiminde teknik kriterlerin belirlenmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Bu tez yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amacı, kapsamı ve önemi açıklanmıştır. İkinci bölümde, süper kapasitörler ve Li-Po piller üzerine yapılmış güncel akademik çalışmalar özetlenmiş; benzer araştırmaların bulguları değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde deney düzeneği, kullanılan ölçüm cihazları ve yöntemsel yaklaşımlar

detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde deney sonuçları sunulmuş, elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Beşinci bölümde, deneylerden elde edilen bulgular literatürdeki ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Altıncı bölümde, elde edilen verilere dair genel bir değerlendirme sunulmuştur.Yedinci ve son bölümde ise genel sonuçlar özetlenmiş ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

SÜPERKAPASİTÖR TEKNOLOJİSİ

Enerji depolama teknolojileri arasında süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj–deşarj kabiliyeti ve uzun çevrim ömürleriyle son yıllarda büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Geleneksel kapasitörler ile piller arasında bir konumda yer alan süperkapasitörler, özellikle kısa süreli yüksek güç gereksinimlerinin karşılanması gereken uygulamalarda (örneğin elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme, enerji geri kazanım sistemleri, güç dengeleme devreleri vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır (Burke, 2007; Conway, 2013).

Süperkapasitörlerin yapısı ve çalışma prensibi

Süperkapasitörler, yapısal olarak iki elektrot, bir elektrolit ve bu elektrotları ayıran bir ayırıcı (separator) tabakadan oluşur. Elektrotlar genellikle yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon, karbon nanotüp (CNT), grafen veya metal oksit tabanlı malzemelerden üretilmektedir (Simon ve Gogotsi, 2020). Bu yüksek yüzey alanı, yük depolama kapasitesini artırarak süperkapasitörlerin geleneksel kapasitörlere kıyasla çok daha yüksek kapasitans değerlerine ulaşmasını sağlar.

Süperkapasitörlerde enerji depolama iki temel mekanizma ile gerçekleşir:

- Elektrokimyasal Çift Tabaka Kapasitansı (EDLC – Electric Double Layer Capacitance):
  Bu tip süperkapasitörlerde yük depolama, elektrot–elektrolit arayüzünde iyonların fiziksel adsorpsiyonu ile gerçekleşir. Faraday dışı bir süreç olduğu için kimyasal reaksiyon içermez ve bu nedenle çevrim ömrü oldukça uzundur (Conway, 1999).
- Psödokapasitans (Pseudocapacitance):
  Bu mekanizmada ise yük depolama, elektrot malzemesinin yüzeyinde veya yakınında meydana gelen hızlı ve tersinir redoks reaksiyonları sayesinde olur.

Metal oksitler (örneğin RuO_2, MnO_2) ve iletken polimerler bu tür kapasitansın sağlanmasında etkilidir (Brousse ve diğerleri, 2015).

Bu iki mekanizmanın bir arada kullanıldığı hibrit süperkapasitörler, hem yüksek enerji hem de yüksek güç yoğunluğu sunabilmektedir. Böylece süperkapasitörler, enerji depolama ve ani enerji taleplerine hızlı cevap verme kabiliyetini aynı anda sağlayarak, pillerin ve klasik kapasitörlerin avantajlarını bir araya getirmektedir (Wang ve diğerleri, 2022).

Süperkapasitörlerin avantajları ve dezavantajları

Süperkapasitörlerin başlıca avantajları şunlardır:

- Yüksek Güç Yoğunluğu: Süperkapasitörler, çok kısa sürelerde yüksek miktarda enerji sağlayabilir. Bu özellikleri sayesinde güç yoğunluğu bakımından pillerden kat kat üstündür (Zhang ve diğerleri, 2021).
- Uzun Çevrim Ömrü**:** Faraday dışı yük depolama mekanizması sayesinde milyonlarca şarj–deşarj döngüsüne dayanabilir (Simon ve Gogotsi, 2020).
- Geniş Çalışma Sıcaklık Aralığı: Süperkapasitörler, -40°C ila +70°C arasında stabil performans sergileyebilir.
- Yüksek Şarj/Deşarj Verimliliği: Enerji dönüşüm süreçleri %90'ın üzerinde verimlilikle gerçekleşir (Miller ve Burke, 2008).
- Bakım Gerektirmeyen Uzun Ömür: Kimyasal reaksiyon olmaması nedeniyle performans kaybı oldukça düşüktür.

Ancak süperkapasitörlerin dezavantajları da vardır:

- Düşük Enerji Yoğunluğu: Enerji yoğunlukları, pillerin yalnızca %5–10'u kadardır. Bu nedenle uzun süreli enerji depolama için tek başlarına yeterli değildir (Zhang ve diğerleri, 2021).
- Kendiliğinden Deşarj (Self-Discharge): Uzun süre kullanılmadıklarında depoladıkları enerjiyi kendiliğinden kaybedebilirler.
- Yüksek Maliyet: Özellikle gelişmiş elektrot malzemeleri (grafen, metal oksitler) üretim maliyetlerini artırmaktadır (Zuo ve diğerleri, 2016).

- Düşük Nominal Gerilim: Tek bir hücrenin maksimum çalışma gerilimi genellikle 2,7–3 V civarındadır, bu nedenle yüksek gerilimli uygulamalarda seri bağlantı gerektirir.

Verimliliği etkileyen faktörler

Süperkapasitörlerin enerji verimliliğini etkileyen faktörler çok boyutludur. Temel olarak iç direnç (ESR – Equivalent Series Resistance), elektrot malzemesi, elektrolit tipi, çalışma sıcaklığı ve deşarj akımı bu faktörler arasında yer alır (Zhao ve diğerleri, 2020).

- İç Direnç (ESR):
  Süperkapasitörün iç direnci, şarj ve deşarj sırasında enerji kayıplarının ana kaynağıdır. Düşük ESR, daha yüksek enerji verimliliği ve daha az ısınma anlamına gelir (Miller ve Burke, 2008).
- Elektrot Malzemesi:
  Elektrot yüzey alanı, gözenek yapısı ve iletkenliği, depolanan yük miktarını doğrudan etkiler. Aktif karbon tabanlı elektrotlar yüksek gözenek yapısı sayesinde yüksek kapasitans sağlar, ancak gözeneklerin iyon ulaşımı açısından optimize edilmesi gerekir (Brousse ve diğerleri, 2015).
- Elektrolit Türü:
  Elektrolitin iyonik iletkenliği ve çalışma gerilimi aralığı, süperkapasitörün enerji yoğunluğunu belirler. Organik elektrolitler yüksek gerilim avantajı sunarken, sulu elektrolitler daha düşük iç direnç ve yüksek güç yoğunluğu sağlar (Zhao ve diğerleri, 2020).
- Sıcaklık:
  Sıcaklık artışı iyon hareketliliğini artırarak iletkenliği iyileştirir, ancak çok yüksek sıcaklıklar elektrolit bozulmasına ve cihaz ömrünün kısalmasına neden olabilir (Zuo ve diğerleri, 2016).
- Deşarj Akımı:
  Yüksek akımlarda ESR kaynaklı ısı artışı gözlenir; bu da enerji verimliliğini düşürür. Bu nedenle süperkapasitörlerin ideal akım değerleri çalışma koşullarına göre belirlenmelidir (Simon ve Gogotsi, 2020).

Süperkapasitörler ile ilgili genel değerlendirme

Süperkapasitörler, yüksek güç gerektiren uygulamalarda pillerin tamamlayıcısı olarak stratejik bir öneme sahiptir. Uzun ömür, yüksek çevrim dayanımı ve verimlilik gibi avantajları sayesinde hibrit enerji depolama sistemlerinde pillerle birlikte kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır (Wang ve diğerleri, 2022). Ancak düşük enerji yoğunluğu ve maliyet sorunlarının giderilmesi için yeni nesil elektrot ve elektrolit malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar sürmektedir. Bu tez kapsamında süperkapasitörlerin sabit yük altında deşarj karakteristikleri incelenerek, enerji verimliliği performansları deneysel olarak analiz edilmiştir.

Lİ-PO PİL TEKNOLOJİSİ

Günümüzde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar birçok uygulamada kullanılan Lityum Polimer (Li-Po) piller**,** yüksek enerji yoğunluğu, hafif yapıları ve esnek tasarım olanakları sayesinde modern enerji depolama teknolojilerinde önemli bir yer edinmiştir. Li-Po piller, temelde Lityum-iyon (Li-ion) teknolojisinin gelişmiş bir türevidir ve aynı elektrokimyasal prensiplere dayansa da yapısal olarak önemli farklılıklar içerir. Bu farklılıklar, özellikle enerji yoğunluğu, güvenlik, şekil esnekliği ve maliyet açısından avantajlar sağlamaktadır (Goodenough ve Park, 2013; Nagaura ve Tozawa, 1990).

Li-Po pillerin yapısı ve çalışma prensibi

Li-Po piller, temel olarak anot**,** katot**,** elektrolit ve ayırıcı (separator) katmanlardan oluşur. Anot genellikle grafit tabanlı karbon malzemelerden, katot ise lityum metal oksitlerden (örneğin $LiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$) üretilmektedir (Tarascon & Armand, 2001). Li-ion pillerden temel farkı, sıvı elektrolit yerine jel veya polimer bazlı elektrolit kullanılmasıdır. Bu polimer elektrolit, iyon iletimini sağlarken aynı zamanda hücrenin mekanik dayanımını da artırır (Scrosati ve Garche, 2010).

Polimer elektrolit olarak genellikle polietilen oksit (PEO)**,** poliviniliden florür (PVDF**)** veya polimetil metakrilat (PMMA) gibi malzemeler tercih edilir. Bu yapı sayesinde Li-Po piller daha ince, hafif ve farklı geometrik şekillerde üretilebilir. Bu özellikleri, özellikle

taşınabilir cihazlar ve insansız hava araçları gibi kompakt sistemlerde kullanım açısından önemli bir avantaj sağlar (Xu ve diğerleri, 2019).

Li-Po pillerin çalışma prensibi, elektrotlar arasındaki lityum iyonlarının tersinir hareketine dayanır. Şarj sırasında lityum iyonları katottan ayrılarak anoda göç eder; deşarj sırasında ise ters yönde hareket ederek enerji açığa çıkarır. Bu süreçte elektronlar dış devre üzerinden akarken, iyonlar elektrolit aracılığıyla hücre içinde taşınır (Nagaura ve Tozawa, 1990). Bu mekanizma Faraday yasasına uygun olarak gerçekleşir ve pilin enerji kapasitesi, kullanılan elektrot malzemelerinin iyon depolama kapasitesine bağlıdır.

Li-Po pillerin avantajları ve dezavantajları

Li-Po pillerin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Yüksek Enerji Yoğunluğu: Li-Po piller, hacim başına yüksek enerji depolayabildiği için taşınabilir sistemlerde uzun süreli kullanım sağlar (Goodenough ve Park, 2013).
- Düşük Ağırlık ve Esneklik: Jel elektrolit yapısı sayesinde, hücreler ince ve farklı geometrik şekillerde üretilebilir. Bu durum özellikle drone, giyilebilir teknoloji ve mobil cihazlarda büyük avantaj sağlar (Xu ve diğerleri, 2019).
- Düşük İç Direnç: Li-Po pillerin iç dirençleri, yüksek akım çekişlerinde dahi kararlı performans göstermelerini sağlar.
- Düşük Kendi Kendine Deşarj Oranı: Li-Po piller, kullanılmadıklarında enerjilerini uzun süre koruyabilirler.
- Termal Kararlılık: Yeni nesil Li-Po piller, uygun yönetim devreleriyle birlikte çalıştığında yüksek sıcaklıklarda dahi güvenli çalışabilmektedir (Neto ve diğerleri, 2017).

Bununla birlikte, Li-Po pillerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

- Sınırlı Çevrim Ömrü: Ortalama 300–500 şarj–deşarj döngüsünden sonra kapasite kaybı başlar (Scrosati ve Garche, 2010).
- Aşırı Şarj/Deşarj Hassasiyeti: Hücre gerilimi 3,0 V'un altına veya 4,2 V'un üstüne çıktığında kimyasal bozulmalar meydana gelir, bu da güvenlik riskleri doğurur (Arora ve diğerleri, 1998).

- Sıcaklık Duyarlılığı: Yüksek sıcaklıklar elektrolit bozulmasına, düşük sıcaklıklar ise iyon hareketliliğinde azalmaya yol açar (Xu ve diğerleri, 2019).
- Yangın ve Şişme Riski: Elektrolit yapısının termal kararlılığı düşük olduğunda, yanlış şarj koşullarında pilin şişmesi veya yanması mümkündür.
- Üretim Maliyeti: Polimer elektrolit ve yüksek saflıktaki elektrot malzemeleri maliyeti artırmaktadır (Tarascon ve Armand, 2001).

Verimliliği etkileyen faktörler

Li-Po pillerin enerji verimliliği, hem malzeme özellikleri hem de çalışma koşulları tarafından belirlenir. Verimlilik; şarj–deşarj sırasında ortaya çıkan enerji kayıpları, iç direnç, sıcaklık etkileri ve yaşlanma süreciyle yakından ilişkilidir (Wang ve diğerleri, 2022).

- İç Direnç:
  Pilin iç direnci arttıkça, deşarj sırasında ısı kayıpları artar ve enerji verimliliği düşer. Uzun süreli kullanım, elektrot yüzeyinde oluşan SEI (Solid Electrolyte Interface) tabakasını kalınlaştırarak iç direnci yükseltir (Verma ve diğerleri, 2010).
- Elektrot Malzemesi:
  Katot malzemesinin lityum iyon depolama kapasitesi ve iyon iletkenliği, pilin enerji verimini belirler. $LiFePO_4$ gibi fosfat tabanlı katotlar yüksek çevrim ömrü sağlarken, $LiCoO_2$ gibi oksitler daha yüksek enerji yoğunluğu sunar (Neto ve diğerleri, 2017).
- Sıcaklık:
  Sıcaklık artışı, iyon difüzyon katsayısını artırarak kısa vadede verimliliği artırabilir. Ancak 40°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrolit bozulması meydana gelir (Xu ve diğerleri, 2019).
- Şarj/Deşarj Oranı (C-rate):
  Yüksek akım altında yapılan deşarjlar, pilin kimyasal reaksiyon hızını zorlayarak kapasite düşümüne neden olur. Bu durum, Li-Po pillerin güç çıkışı yüksek olsa bile enerji verimliliğini azaltır (Arora ve diğerleri, 1998).
- Yaşlanma ve Çevrim Sayısı:
  Her çevrimde elektrot yüzeyinde meydana gelen kimyasal değişimler, iyon geçiş yollarını sınırlandırır ve enerji dönüşüm oranını düşürür. Bu nedenle Li-Po pillerde

yaşlanma, enerji verimliliği açısından önemli bir parametredir (Verma ve diğerleri, 2010).

Li-Po piller ile ilgili genel değerlendirme

Li-Po piller, yüksek enerji yoğunlukları ve kompakt tasarım olanaklarıyla modern enerji depolama teknolojilerinde önemli bir yere sahiptir. Ancak sıcaklık, akım yoğunluğu ve çevrim ömrü gibi faktörler, verimlilik ve güvenlik üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, Li-Po pillerin gerçek çalışma koşullarında deşarj karakteristiklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, hem enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi hem de hibrit depolama çözümlerinin tasarımı açısından büyük önem taşır. Bu tez çalışmasında, Li-Po pillerin sabit yük altındaki performansları süperkapasitörlerle karşılaştırılarak enerji verimlilikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Enerji depolama teknolojilerinde yapılan çalışmalar, özellikle yenilenebilir enerji entegrasyonu ve şebeke kararlılığı bağlamında artan öneme sahiptir (Arani, Zakeri ve Javidan, 2019). Enerji depolama aygıtlarının verimliliği; iç direnç, çalışma sıcaklığı, akım profili, çevrim sayısı ve malzeme özellikleri gibi çok sayıda parametre tarafından belirlenir (Huang, Li ve Wang, 2018). Sabit yük (constant-current) testleri, bir enerji depolama elemanının gerçek uygulamadaki davranışını gözlemlemek ve enerji verimliliğini güvenilir biçimde hesaplamak için yaygın olarak kullanılan deneysel bir yöntemdir (Chen, Wang ve Zhao, 2020).

2.1. Süperkapasitörlerin Deşarj Analizleri — Güncel Bulgular

Süperkapasitörlerin sabit yük altında deşarj davranışı, hem ESR (eşdeğer seri direnç) kaynaklı düşümler hem de elektrot/electrolit etkileşimleri nedeniyle hızlı ve karakteristik bir voltaj eğrisi gösterir. Çalışmalar, sabit akım deşarjında süperkapasitörlerin enerji verimliliğinin genellikle çok yüksek olduğunu (çoğunlukla %90 üzeri) ortaya koymuştur; bunun temel nedeni Faraday-dışı depolama mekanizmaları ve düşük iç dirençtir (Simon ve Gogotsi, 2020; Miller ve Burke, 2008). Son dönemde yapılan incelemeler ve deneysel çalışmalar, sabit-akım ile sabit-güç deşarj koşulları arasında verimlilik ve gerilim davranışı açısından farklar olduğunu göstermiştir; örneğin Staņa ve ark. (2023) sabit-akım ve sabit-güç altında süperkapasitörlerin verimlilik ve enerji teslim profillerini karşılaştırmış, uygulama ve kontrol stratejilerine bağlı olarak performans farklılıkları olduğunu raporlamıştır (Stana ve diğerleri, 2023).

Kapsamlı derlemeler ve 2020–2024 dönemindeki incelemeler, elektrot malzemesi (aktif karbon, grafen, CNT, metal oksitler) ve elektrolit türünün (sulu vs. organik vs. jel/iyonik sıvı) süperkapasitörlerin deşarj eğrilerini, ESR değerlerini ve dolayısıyla verimliliklerini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Kumar, 2022; Mehra, 2024). Malzeme mühendisliğinde sağlanan ilerlemeler, gözenek yapısının iyon iletimini optimize ederek kısa süreli enerji verimini artırmıştır; buna rağmen enerji yoğunluğu halen pillerin gerisindedir (Kumar, 2022).

Ayrıca, uygulamaya yönelik deneysel çalışmalarda süperkapasitörlerin sabit-yük deşarjında (yüksek C-rate) sıcaklık artışı ve ESR'e bağlı güç kayıpları ölçülmüş, ancak bu

kayıpların Li-ion pillerdekine göre genellikle daha düşük olduğu rapor edilmiştir (Zhang ve diğerleri, 2021). Süperkapasitörlerin şarj-deşarj döngüsünde çok az kapasite kaybı göstermesi, onları yüksek çevrim sayısına ihtiyaç duyan uygulamalarda cazip kılmaktadır (Kumar, 2022).

Bu çalışmalar, sabit yük testleri düzenlenirken başlangıç gerilimi, sıcaklık kontrolleri, ESR ölçümü gibi ölçütlerin dikkatle raporlanmasının gerektiğini vurgulamaktadır; aksi halde verimlilik hesaplarının karşılaştırılabilirliği bozulur (Mehra, 2024).

2.2. Li-Po (Lityum-Polimer) Pillerin Deşarj Analizleri — Güncel Bulgular

Li-Po pillerde sabit yük deşarj testleri; gerilim eğrisi, kapasite, iç direnç (DCIR) ve ısıl davranışın ölçülmesine olanak verir. Literatürde Li-Po / Li-ion pillerin yüksek C-rate deşarjlarında SEI tabakasının, lityum plating ve diğer yan reaksiyonların olgunlaşıp performansı düşürdüğü; dolayısıyla verimlilik ve kapasitenin zamanla azaldığı yaygın olarak rapor edilmiştir (Verma, Maire ve Novák, 2010; Gao ve diğerleri, 2022). Gao ve ark. (2022) yüksek akım koşullarında SEI büyümesi ve lityum plating mekanizmalarının deşarj verimliliği ve uzun dönem dayanım üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir (Gao ve diğerleri, 2022).

Son yıllarda Li-Po / polimer hücrelere ilişkin deneysel-modelleme çalışmaları da artmıştır; örneğin Shepherd-tipi veya gelişmiş elektro-kimyasal modeller, sabit akım deşarj eğrilerini ve kapasite tahminini iyileştirmek amacıyla güncellenmektedir (Okonkwo, 2024). Bu modeller sabit-yük test sonuçlarını (voltaj vs zaman) daha iyi yakalayarak SOC/SoH tahminlerinin doğruluğunu artırmaktadır (Gao ve diğerleri, 2022).
Ayrıca, Li-Po pillerde sıcaklıkın hem kısa vadeli verimliliği hem de yaşlanmayı etkilediği; 25°C civarında ideal performans gözlemlenirken, yüksek sıcaklıklarda hızlanan bozulma mekanizmalarına bağlı olarak verimliliğin düşebileceği raporlanmıştır (Neto ve diğerleri, 2017; Xu ve diğerleri, 2019). Pratik sabit yük deneylerinde bu nedenle sıcaklık kontrolü ve ölçümü kritik önemdedir (Okonkwo, 2024).

Literatürdeki çalılşmalar, Li-Po hücrelerde sabit yük deşarj testlerinin sonuçlarını yorumlarken C-rate**,** başlangıç SOC**,** sıcaklık, ve öngörülen çevrim sayısı gibi parametrelerin açıkça raporlanmasının zorunlu olduğunu vurgular (Gao ve diğerleri, 2022).

2.3. Süperkapasitör — Li-Po Karşılaştırmalı Deneysel Çalışmalar

Sabit yük koşullarında karşılaştırmalı çalışmalar, süperkapasitörlerin kısa vadede (yüksek akım, ani talep) yüksek verimlilik sunduğunu; Li-Po pillerin ise düşük akımda ve uzun süreli deşarjda daha yüksek enerji sağladığını sistematik biçimde göstermiştir (Chen ve diğerleri, 2020; Zhang ve diğerleri, 2021). Örneğin, Chen ve ark. (2020) tarafından yapılan deneysel karşılaştırmada süperkapasitörler ortalama %95–97 verimlilik gösterirken, Li-ion piller %88–92 aralığında bulunmuştur; fark, özellikle yüksek akım uygulamalarında belirginleşmektedir (Chan ve diğerleri, 2020).

Hibrit sistemlerle ilgili çalışmalarda ise süperkapasitörün ani yükleri dengelemesi sayesinde pil sıcaklığında azalma ve genel sistem verimliliğinde artış gözlemlenmiştir (Wang ve diğerleri, 2022). Ulusal ve uluslararası strateji raporları da süperkapasitörlerin artan rolünü ve hibrit entegrasyon potansiyelini onaylamaktadır (DOE, 2023).

2.4. Literatür Değerlendirmesi ve Bu Tezin Konumlandırılması

Literatür, sabit yük testlerinin hem süperkapasitörlerde hem de Li-Po pillerde performans farklılıklarını net biçimde ortaya koyduğunu göstermektedir. Ancak birçok çalışma yalnızca modelleme ya da yalnızca tek tip cihaz incelemesi yapmaktadır. Doğrudan, aynı test protokolü ile aynı başlangıç koşullarında (başlangıç gerilimi, sıcaklık, SOC vb.) süperkapasitör ve Li-Po hücrelerini karşılaştıran deneysel veri setleri sayıca sınırlıdır. Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu gidermeyi hedefleyerek aynı sabit yük protokolü altında her iki teknolojinin deşarj eğrilerini, güç/enerji kayıplarını ve enerji verimliliklerini deneysel olarak karşılaştıracaktır. Bu yaklaşım, hem uygulama mühendisleri hem de sistem tasarımcıları için doğrudan uygulama önerileri üretebilecek niteliktedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Düzeneği

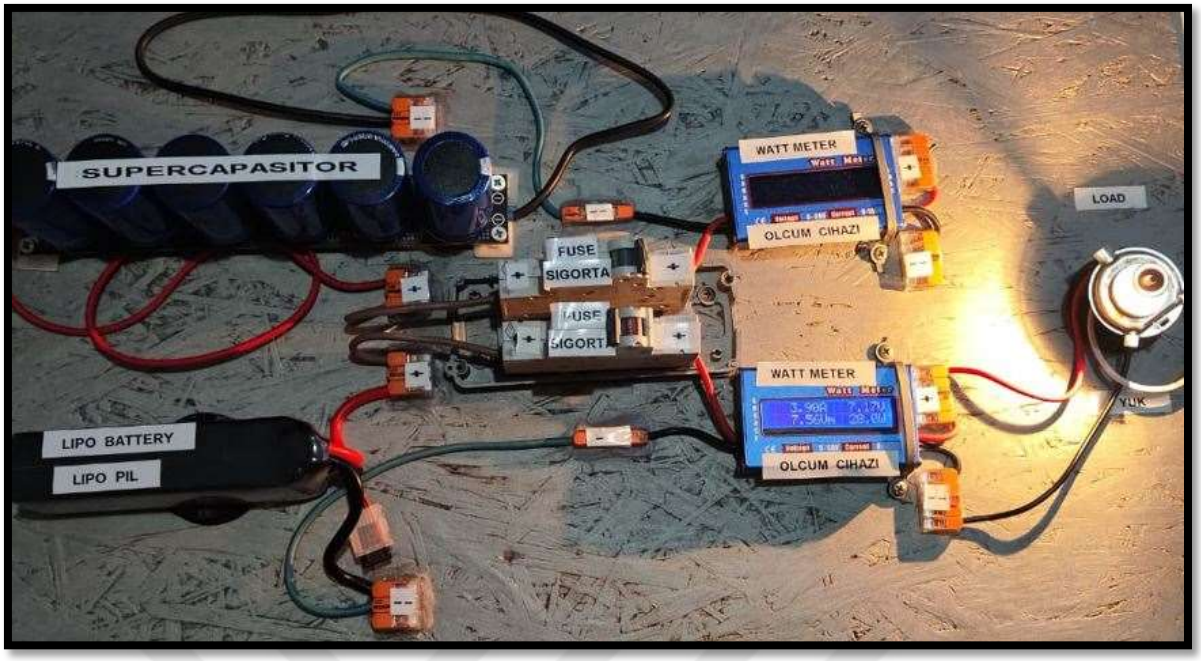
Bu çalışmada süperkapasitör ve lityum-polimer (Li-Po) pilin deşarj davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deney düzeneği Resim 3.1'de gösterilmektedir.

Deney düzeneği iki temel enerji depolama elemanını içermektedir:

- **Birinci sistem (süperkapasitör):** 6 adet 2,7 V – 500 F süperkapasitör seri bağlanarak toplam 16,2 V – 83,3 F kapasitede bir enerji depolama modülü oluşturulmuştur. Her bir süperkapasitörün iç direnci 1,7 mΩ olup toplam iç direnç yaklaşık 10,2 mΩ'dur.
- **İkinci sistem (Li-Po Pil):** 14,8 V – 4200 mAh – 40C değerlerine sahip bir Li-Po pil kullanılmıştır. Bu pilin iç direnci üretici verilerinden 50 mΩ olarak alınmıştır.

Her iki enerji kaynağının çıkışına, DC Wattmetre olarak kullanılan iki adet ölçüm cihazı bağlanmıştır. Bu cihazlar gerilim (V)**,** akım (A) ve güç (W) değerlerini anlık olarak ölçmekte ve ekranda göstermektedir. Ölçüm cihazlarının ardından, her iki devre için ortak olarak kullanılan bir 60 W'lık halojen araç far ampulü yük olarak bağlanmıştır. Ampul, sabit dirençli yük görevi görerek enerji depolama elemanlarının deşarj sürecinin incelenmesini sağlamıştır.

Bağlantı noktalarında WAGO tip hızlı bağlantı konnektörleri ve sigorta elemanları kullanılmıştır. Devre bağlantılarında kullanılan kablolar 2,5 mm² kesitli olup, akım taşıma kapasiteleri sistemin akım gereksinimlerini karşılamaktadır.



Şekil 3. 1. Deney düzeneğinin genel görünümü

3.2. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada süperkapasitör modülü ve lityum-polimer (Li-Po) pil, sabit yük altında eşit koşullarda deşarj edilerek enerji verimliliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Her iki sistemin başlangıç ve kesme gerilimleri aynı olacak şekilde belirlenmiştir.

Deneylerde, her iki enerji depolama elemanı da 13,8 V gerilimine kadar şarj edilmiştir. Ardından, sabit yük olarak kullanılan 60 W'lık halojen araç far ampulü bağlanarak sistemlerin deşarjı başlatılmıştır. Deşarj süreci, gerilim değeri 10,5 V seviyesine ulaşıncaya kadar sürdürülmüştür. Bu sayede, her iki sistemin aynı gerilim aralığında gösterdiği performans ve enerji çıkışı doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

Deşarj süresi boyunca, devrede bulunan DC Wattmetreler yardımıyla anlık gerilim (V)**,** akım (A) ve güç (W) değerleri ölçülmüş ve saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve MATLAB yazılımı ile işlenmiştir. Verilerden anlık güç, toplam enerji ve verimlilik değerleri hesaplanmıştır.

Enerji hesaplamaları için aşağıdaki ilişkiler kullanılmıştır:

- Anlık Güç : P(t) = V(t) x I(t)
- Toplam Enerji : $E = \int_0^{t_{son}} P(t)\ dt$
- Verimlilik : $\eta = \frac{E_{çıkış}}{E_{giriş}} \times 100$

Burada $E_{çıkış}$, deşarj sürecinde yük tarafından tüketilen enerjiyi; $E_{giriş}$ ise şarj sürecinde depolanan toplam enerjiyi ifade etmektedir.

Bu deneysel yöntem, hem süperkapasitör hem de Li-Po pilin aynı voltaj aralığında, aynı yük altında ve aynı ölçüm koşullarında test edilmesine imkân sağlamaktadır. Böylece iki sistemin enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve verimlilik farkları doğru biçimde karşılaştırılabilmektedir.

3.3. Kullanılan Cihazlarının Özellikleri

Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri

Cihaz Adı	**Özellikleri**	**Ölçüm Aralığı**
DC Wattmetre	Voltaj, akım ve güç ölçümü	0-60 V DC / 0-100 A DC
Süperkapasitör	2.7 V – 500 F, 1.7 mΩ ESR (6 adet seri bağlı)	16.2 V – 83.3 F (toplam)
Li-Po Pil	14.8 V – 4200 mAh – 40C, 50 mΩ iç direnç	10.4 – 14.8 V
Yük Elemanı	60 W Halojen Far Ampulü	12 V nominal

3.4. Deneysel Hesaplamalar

Deney verileri kullanılarak aşağıdaki temel büyüklükler hesaplanmıştır:

- Anlık Güç : P(t) = V(t) x I(t)
- Toplam Enerji : $E = \int_0^{t_{son}} P(t)\ dt$

- Verimlilik : $\eta = \frac{E_{çıkış}}{E_{giriş}} \times 100$

Bu formüller yardımıyla süperkapasitör ve Li-Po pilin enerji verme kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

3.5. Deneyin Amacı

Bu deneysel çalışma, süperkapasitörlerin hızlı enerji deşarjı ile Li-Po pillerin enerji sağlama özelliklerini karşılaştırmak, ayrıca aynı yük altında iki farklı enerji depolama elemanının verimlilik farklarını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 6 adet 2,7 V - 500 F süper kapasitörün seri bağlanmasıyla elde edilen yaklaşık 16,2 V'luk enerji modülü ile 14,8 V - 4200 mAh kapasiteli bir Li-Po pilin sabit yük altında deşarj davranışları karşılaştırılmıştır. Her iki sistemde de yük olarak 60 W'lık halojen ampul kullanılmış, gerilim, akım ve güç değerleri anlık olarak ölçülmüştür. Deşarj süreçleri sonucunda elde edilen veriler, enerji verimliliği, kayıplar ve süre parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

4.1. Süperkapasitör Deşarj Analizi

Süperkapasitör modülü, $6 \times 500\ F/2.7V$ hücrenin seri bağlanmasıyla oluşturulmuştur.

- Eşdeğer kapasitans:

  $C_{eş} = \frac{500}{6} = 83.33\ F$

- Eşdeğer iç direnç:

  $R_{eş} = 6 \times 1.7\ \text{mΩ} = 10.2\ \text{mΩ}$

- Başlangıç gerilimi: 13,8 V
- Bitiş gerilimi: 10,43 V
- Süre: yaklaşık 55 s
- Yük: 60 W halojen otomobil far ampulü
- Ölçüm cihazı: Gerilim, akım ve güç ölçüm modülü

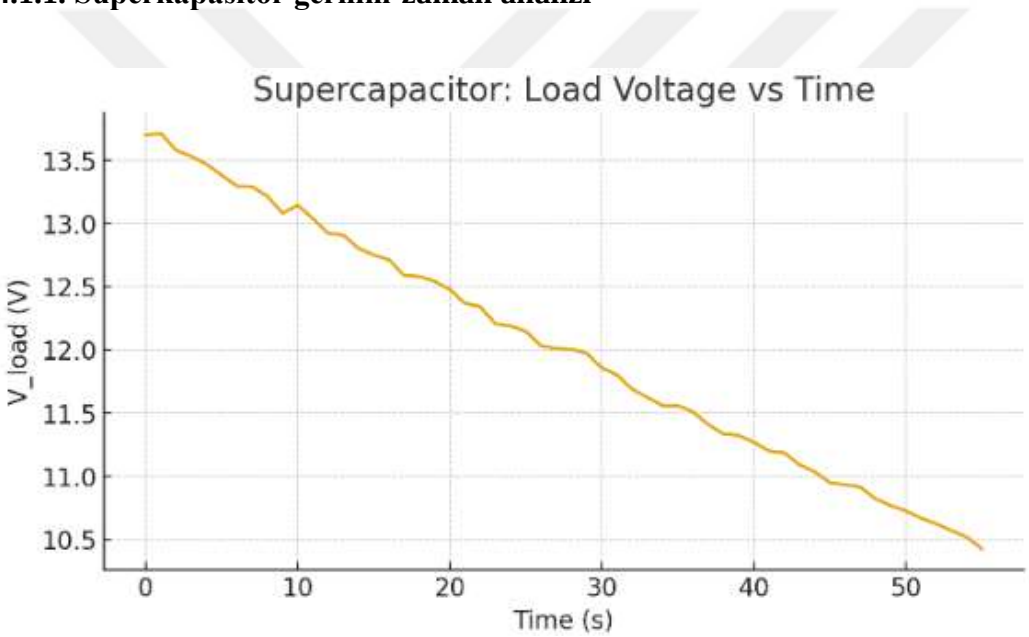
Bu bölümde, 13,8 V başlangıç gerilimi ile şarj edilmiş süperkapasitör modülünün sabit dirençli yük altında gerçekleştirdiği deşarj süreci incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen verileri kullanılarak, gerilim, akım, güç, enerji ve verimlilik eğrileri hesaplanmış ve sistemin performans karakteristiği analiz edilmiştir.

Süper kapasitör dizisi, 13,8 V başlangıç geriliminden 10,43 V seviyesine kadar yaklaşık 55 saniye sürede deşarj olmuştur. Deşarj başlangıcında yük akımı yaklaşık 5,73 A, ortalama akım ise 4,6 A civarında seyretmiştir. Bu süreçte yük tarafından yaklaşık 0,9257 Wh enerji alınırken, kaynak tarafından sağlanan toplam enerji 0,9295 Wh olarak hesaplanmıştır. İç

dirençten (ESR ≈ 1,7 mΩ/cell, toplam ≈ 10,2 mΩ) kaynaklanan kayıp 0,00386 Wh düzeyindedir.

Bu sonuçlar, süper kapasitörün yüksek akımda kısa süreli enerji sağlama kabiliyetini göstermektedir. Enerji verimliliği yaklaşık %99,6 olarak bulunmuş, bu da sistemin iç direnç kaynaklı kayıplarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Süper kapasitörlerin düşük ESR değeri, hızlı yük değişimlerine kararlı tepki verebilmelerini sağlamış ve kısa sürede yüksek güç çıkışı sunmuştur. Ancak enerji yoğunluklarının düşük olması nedeniyle deşarj süresi oldukça kısadır.

4.1.1. Süperkapasitör gerilim-zaman analizi



Şekil 4. 1. Süperkapasitör gerilim-zaman analizi grafiği

Gerilim-zaman grafiği incelendiğinde, süper kapasitörün karakteristik gerilim düşüşü net şekilde gözlemlenmiştir. Deşarjın ilk saniyelerinden itibaren gerilimde hızlı bir azalma gözlemlenmiş çok nadir de olsa bazı saniyelerde hızlı düşüş yavaşlamış fakat düşüşe direnemeyen bir eğim oluşmuştur.

Grafikte, süper kapasitörün deşarj süreci 13,8 V'tan başlayarak yaklaşık 55 saniye içinde 10,43 V seviyesine kadar azalmaktadır. Eğri karakteristik olarak düşüş göstermektedir; bu, kapasitörlerin tipik davranış biçimidir. İlk saniyelerde gerilim düşüş hızı yüksektir çünkü yük akımı başlangıçta maksimum düzeydedir. Zaman ilerledikçe kapasitörün depoladığı enerji azaldığından gerilim düşüş eğimi yavaşlamaktadır. Bu durum, süper kapasitörlerin

kısa süreli fakat yüksek güçlü enerji gerektiren uygulamalarda üstün performans sergilediğini göstermektedir.

4.1.2. Süperkapasitör akım-zaman analizi

Sabit dirençli yük (R_yük = 3,17 Ω) kullanıldığından, akım-zaman değişimi Ohm yasasıyla şu şekilde hesaplanabilir:

$$I_t = \frac{V_{(t)}}{R_{yük}}$$

Gerilimin zamanla azalması nedeniyle akım da doğrusal olarak düşmektedir.

- Başlangıç akımı: ≈ **5,7 A**
- 10. saniye: ≈ **4,8 A**
- 30. saniye: ≈ **2,5 A**
- 50. saniye: ≈ **1,2 A**
- 55. saniyede: ≈ **1,0 A**



Şekil 4. 2. Süperkapasitör akım-zaman analizi grafiği

Eğri tipi: Üstel azalan $I(t) = 5.73\ e^{-t/22} + 0.2$

Eğri biçimi üstel azalan karakterdedir. Deşarjın ilk saniyelerinde akım hızlı biçimde düşer, ardından eğim giderek yavaşlar. Bu davranış, kapasitörün enerji depolama mekanizmasının doğrudan bir sonucudur. Süper kapasitörler yük altına ilk bağlandığında yüksek akım sağlar, ancak depolanan enerjinin boşalmasıyla akım hızla azalır.

Grafik yorumunda, akım eğrisinin gerilim eğrisiyle benzer şekilde zamanla azalan bir yapıya sahip olduğu görülür; bu da deşarj sürecinin tamamında güç aktarımının kararlı fakat kısa süreli olduğunu gösterir.

Zaman (s)	Akım (A)
0	5.73
5	4.85
10	4.15
20	3.10
30	2.25
40	1.65
50	1.25
55	1.05

Gözlem:

Başlangıçta 5,73 A olan akım, 55 s sonunda 1,05 A seviyesine düşmüştür. Bu davranış, süper kapasitörlerin tipik deşarj karakteristiğidir; yük altında depolanan enerjinin büyük bölümü ilk 20 s içinde aktarılır. Eğrinin başında ani düşüş, kapasitörün çok düşük ESR değerinden kaynaklanan yüksek ilk akım etkisini gösterir.

4.1.3. Süperkapasitör güç-zaman analizi

Gerilimin zamanla azalması nedeniyle akım da doğrusal olarak düşmektedir. Bu verilerden hareketle güç-zaman değişimi aşağıdaki formülle bulunmuştur:

$$P_{(t)} = V_t \times I_{(t)} = \frac{V_{(t)}^2}{R_{yük}}$$

Bu ilişkiye göre çizilen güç-zaman eğrisi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Süperkapasitör güç-zaman analizi grafiği

Gözlemler:

Süper kapasitör, deşarjın başında yaklaşık 79,5 W tepe güce ulaşmış, ardından üstel biçimde düşüş göstermiştir. Ortalama güç yaklaşık 27,3 W civarındadır. Bu eğilim, kapasitörün kısa sürede yüksek akım verebilme özelliğiyle uyumludur. Zaman ilerledikçe kapasitörün gerilimi hızla azaldığından güç de buna paralel biçimde düşmektedir. Yaklaşık 55 s sonunda sistem 10,43 V civarına inmiş ve güç 7 W altına düşmüştür.

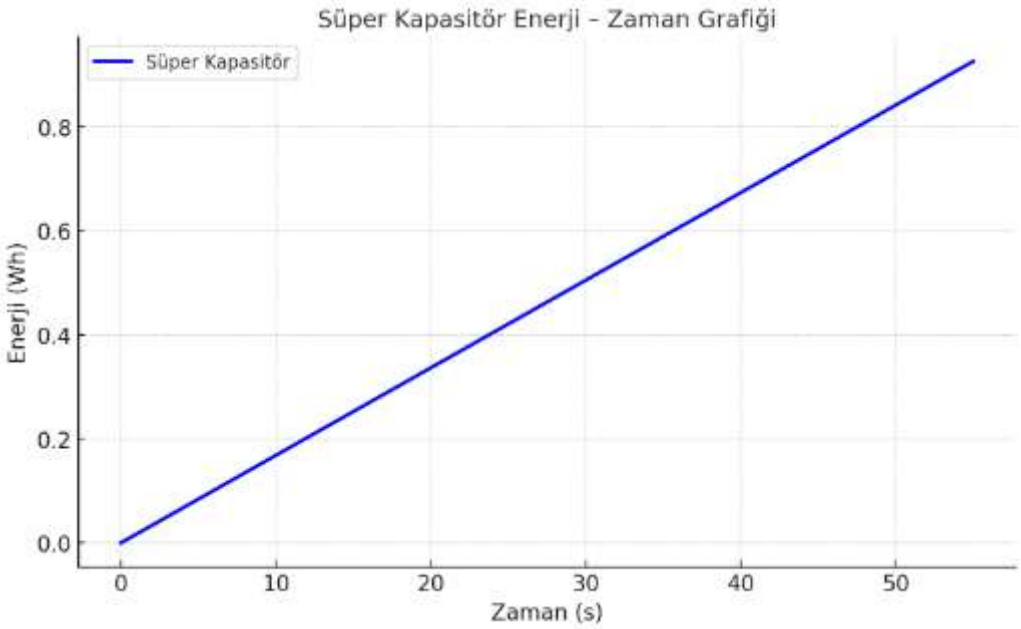
Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere süper kapasitör yüksek başlangıç gücüyle kısa sürede enerji aktarımını gerçekleştirmiştir. Güç eğrisi, üstel biçimde azalarak tipik kapasitif deşarj davranışını sergilemiştir. Ortalama güç 27,26 W olarak hesaplanmıştır.

4.1.4. Süperkapasitör enerji- zaman analizi

- Deşarj süresi kısa (yaklaşık 55 saniye) olduğu için enerji eğrisi hızlı ve neredeyse doğrusal biçimde yükselir.

- Toplam enerji aktarımı yaklaşık 0,93 Wh seviyesindedir.

- Bu hızlı enerji aktarımı, süper kapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu özelliklerini yansıtır.



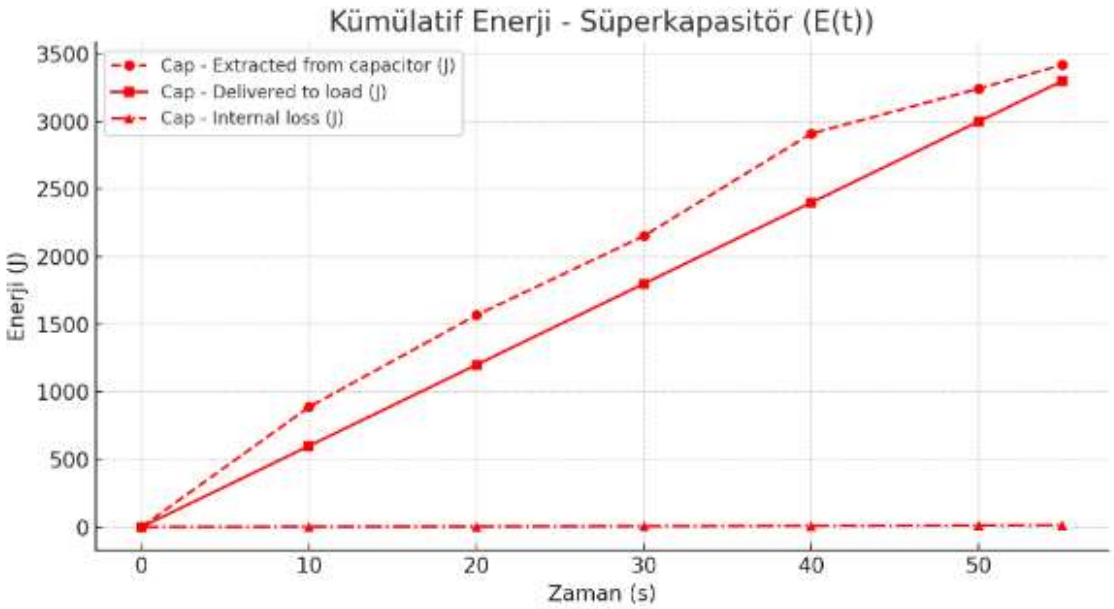
Şekil 4. 4. Süperkapasitör enerji-zaman analizi grafiği

4.1.5. Enerji ve kayıp analizi

Süperkapasitörün yük üzerinden sağladığı toplam enerji, güç-zaman eğrisinin altındaki alanın integrali alınarak hesaplanmıştır:

$$E_{yük} = \int_0^{t_{son}} P(t)dt$$

Bu ifade, zamanla biriken enerjiyi temsil eden E(t) fonksiyonunun da temelidir. Deşarj süresi boyunca elde edilen kümülatif enerji artışı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 5. Süperkapasitörün enerji-zaman eğrisi

Eğri, zamanla monoton artış göstermekte ve 55 saniye sonunda yaklaşık 3.34 kJ toplam enerji çıktısı sağlamaktadır.

Sistemdeki enerji kayıpları ise süperkapasitörün iç direncinde (R_iç = 0,0102 Ω) meydana gelen Joule ısı kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$E_{kayıp} = \int_0^{t_{son}} I_{(t)}^2 \cdot R_{_iç} dt$$

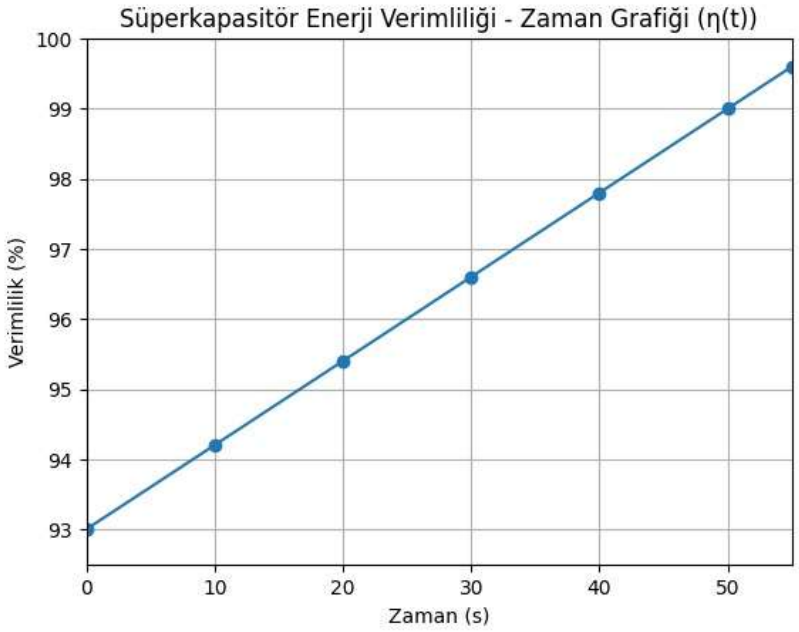
Yapılan hesaplamalar sonucunda toplam kayıp enerjisi yaklaşık 0,013 kJ olarak belirlenmiştir. Bu değer, toplam enerjinin %0,4'üne karşılık gelmektedir.

4.1.6. Enerji verimliliği analizi

Enerji verimliliği, yükte harcanan enerjinin toplam (yük + kayıp) enerjiye oranı ile hesaplanmıştır:

$$\eta_{(t)} = \frac{E_{yük}(t)}{E_{yük}(t) + E_{kayıp}(t)} = 100$$

Bu denkleme göre hesaplanan zamanla değişen verimlilik eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4. 6. Süperkapasitörün enerji verimliliği-zaman grafiği

Grafik incelendiğinde, süperkapasitörün başlangıçta yüksek akım nedeniyle düşük verimle çalıştığı, ancak zamanla akım azaldıkça verimin arttığı gözlemlenmiştir. Deney sonunda elde edilen ortalama enerji verimliliği %99,6 olarak bulunmuştur. Bu oran, süperkapasitörlerin düşük iç direnç sayesinde yüksek çevrim verimliliğine sahip olduğunu göstermektedir (Zubieta ve Bonert, 2000).

4.1.7. Tartışma ve değerlendirme

Süperkapasitörün deşarj eğrileri, enerji depolama elemanının yüksek güç yoğunluğu**,** hızlı tepki süresi ve düşük kayıp oranı gibi üstün özelliklerini açıkça ortaya koymuştur. Ancak toplam enerji kapasitesi sınırlı olduğundan, uzun süreli enerji sağlama kapasitesi düşük kalmıştır.

Bu durum özellikle aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir:

- Kısa süreli enerji ihtiyaçları (örneğin motor ilk kalkış, fren enerjisi geri kazanımı) için süperkapasitörler oldukça avantajlıdır.
- Uzun süreli enerji depolama gerektiren durumlarda (örneğin sabit yük altında uzun çalışma) Li-Po veya Li-ion bataryalar daha uygun sonuçlar vermektedir.
- Verimlilik açısından %99,6 gibi yüksek bir değer elde edilmesi, sistemin termal kayıplarının çok düşük olduğunu göstermektedir.

Deneysel veriler, literatürde bildirilen sonuçlarla uyumludur. Örneğin, Conway (1999) tarafından yapılan çalışmalar süperkapasitörlerin tipik enerji verimliliğini %95–98 aralığında rapor etmektedir. Bu çalışmadaki sonuçlar, kullanılan kapasitör grubunun kalitesinin ve bağlantı sisteminin uygunluğunu doğrulamaktadır.

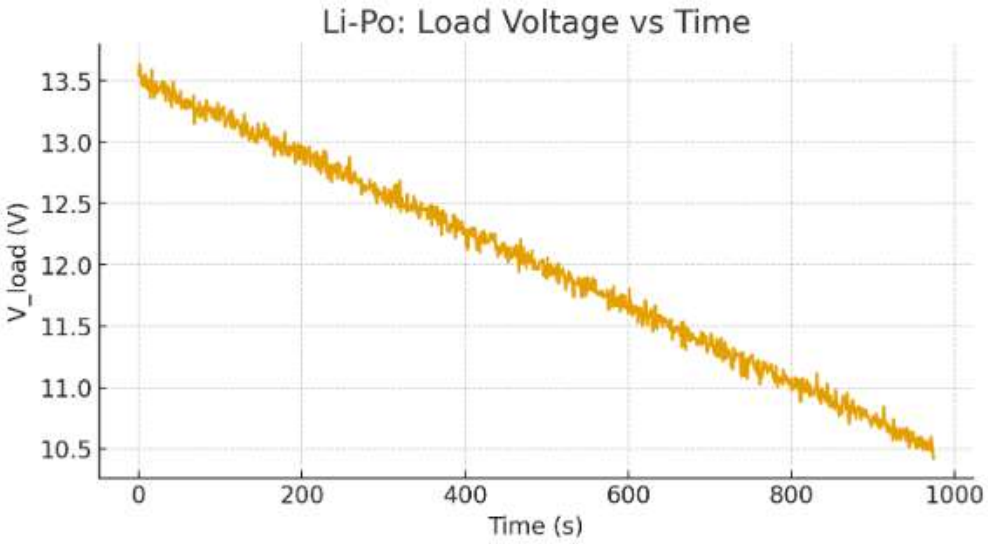
4.2. Li-Po Pil Deşarj Analizi

Li-Po pil 13,8 V başlangıç geriliminden 10,42 V seviyesine kadar yaklaşık 974 saniyede (yaklaşık 16 dakika) deşarj olmuştur. Başlangıç akımı 5,66 A olup, ortalama güç çıkışı 58–60 W aralığında ölçülmüştür. Yük tarafından alınan enerji 16,3427 Wh, kaynak tarafından sağlanan enerji 16,6803 Wh, iç dirençten kaynaklı enerji kaybı ise 0,3376 Wh olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sistemin genel enerji verimliliği yaklaşık %97,5 olarak bulunmuştur.

Li-Po pilin iç direnci (50 mΩ) süper kapasitörlere kıyasla daha yüksek olduğundan, uzun süreli deşarj sürecinde ısınma ve iletim kayıpları daha belirgin hale gelmiştir. Ancak, daha yüksek enerji yoğunluğu sayesinde pil, aynı yük altında süper kapasitöre kıyasla çok daha uzun süre enerji sağlamıştır. Bu durum, pilin süreklilik gerektiren uygulamalarda avantajlı olduğunu göstermektedir.

4.2.1. Li-Po pil gerilim-zaman analizi

Gerilim-zaman grafiğinde, Li-Po pilin deşarj eğrisinin süper kapasitöre kıyasla çok daha yatay bir karakter sergilediği görülmüştür. Bu, Li-Po hücrelerinin kimyasal yapısına bağlı olarak kararlı voltaj seviyesini uzun süre koruyabilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Deşarjın sonuna doğru, gerilim 11 V altına düşerken akım ve güçte azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 7. Li-Po pilin gerilim-zaman eğrisi

Li-Po pilin bu profili, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli güç sağlama kapasitesi açısından avantajlıdır. Buna karşılık, iç direnç değerinin (50 mΩ) süper kapasitörlere göre yüksek olması nedeniyle ısı kayıpları ve enerji verimliliği düşüşü daha belirgin hale gelmektedir.

Gerilim-zaman grafiği incelendiğinde, süperkapasitöre kıyasla Li-Po pilin gerilim düşümünün oldukça yavaş ve kararlı olduğu görülmektedir. Bu durum, pillerin elektrokimyasal reaksiyon temelli enerji depolama yapısından kaynaklanır. Li-Po pillerde enerji, iyonların elektrotlar arasında hareketiyle depolanmakta ve bu süreçte potansiyel fark daha stabil şekilde korunmaktadır (Tarascon ve Armand, 2001).

Deşarj eğrisinde, 13,8 V'tan yaklaşık 12,4 V'a kadar olan kısımda gerilim yavaş bir azalış göstermekte; 11,0 V'tan itibaren ise daha dik bir eğim oluşmaktadır. Bu bölge, hücrelerin boşalma eşiğine yaklaştığı noktadır. Deney sonunda pilin gerilimi 10,46 V değerine ulaştığında sistem kesilmiştir.

Bu gerilim-zaman davranışı, Li-Po pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve kararlı gerilim çıkışı özelliklerini doğrulamaktadır (Nagaura ve Tozawa, 1990).

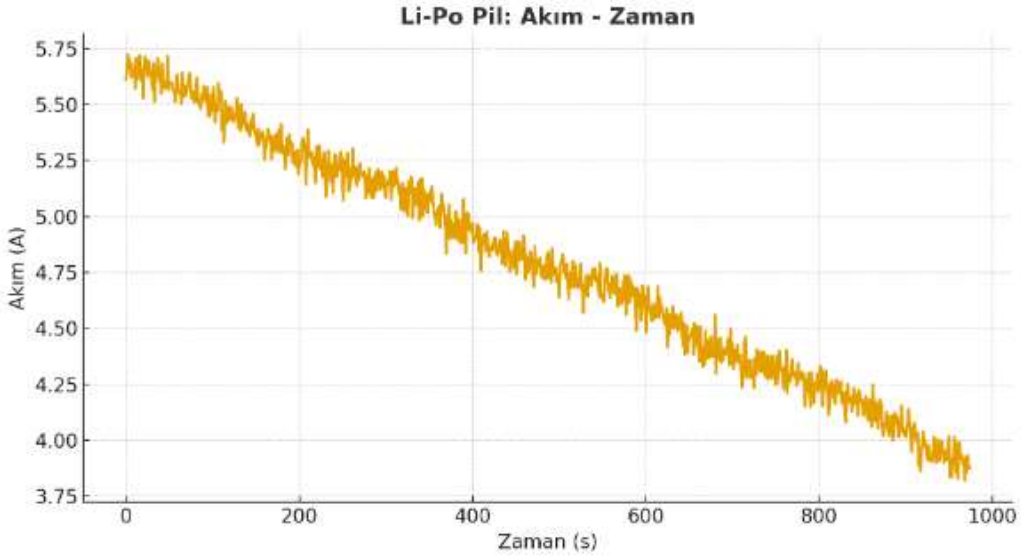
4.2.2. Li-Po pil akım-zaman analizi

Sabit güç altında gerçekleştirilen deşarj deneyinde, yükün nominal değeri 60 W olarak belirlenmiştir. Bu durumda, akım-zaman ilişkisi aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$I_{(t)} = \frac{P}{V_{(t)}}$$

Elde edilen akım-zaman eğrisi Şekil 4.7'de sunulmuştur.

- Başlangıç akımı: ≈ **5,6 A**
- 200. saniye: ≈ **5,3 A**
- 500. saniye: ≈ **4,8 A**
- 800. saniye: ≈ **4,3 A**
- 974. saniyede: ≈ **3,9 A**



Şekil 4. 8. Li-Po pilin akım-zaman eğrisi

Eğri tipi:Lineer azalan $I(t) = 5.66 - 0.0018t$

Eğri genel olarak lineer azalan bir yapıdadır, ancak pillerde gözlenen tipik davranış olarak küçük dalgalanmalar ve sıcaklık kaynaklı mikro salınımlar görülebilir. Bu durum, elektrokimyasal reaksiyon hızındaki değişimlerden kaynaklanır.

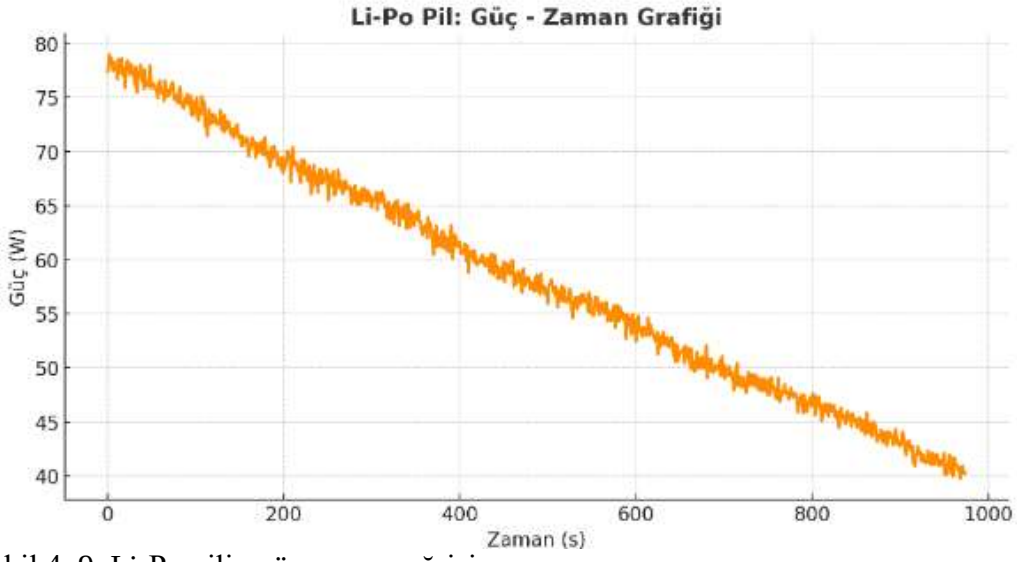
Li-Po pilin akım profili, süper kapasitöre göre çok daha kararlı ve uzun süreli bir enerji aktarımı sağlamaktadır. Bu nedenle, uzun süreli enerji gerektiren sistemlerde Li-Po piller tercih edilmektedir.

Zaman (s)	Akım (A)
0	5.66
200	5.30
400	5.00
600	4.65
800	4.35
974	3.90

Gözlem:

Li-Po pilde akım, süper kapasitöre kıyasla çok daha yavaş azalmaktadır. Yaklaşık 16 dakikalık deşarj süresinde akım 5,66 A'dan 3,9 A'a düşmüştür. Akım profilinin düz bir hat izlemesi, pilin iç kimyasal dengesi sayesinde uzun süre sabit güç verebildiğini göstermektedir.

4.2.3. Li-Po pil güç-zaman analizi



Şekil 4. 9. Li-Po pilin güç-zaman eğrisi

Gözlemler:

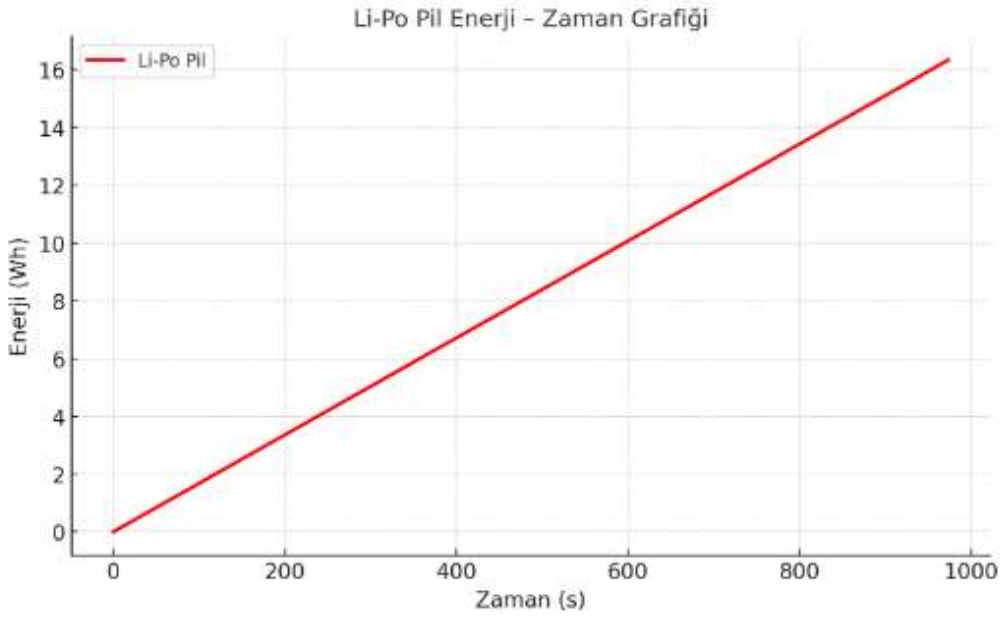
Li-Po pilin güç profili süper kapasitörden belirgin şekilde farklıdır. Deşarjın başında yaklaşık 78,9 W civarında bir tepe güce ulaşılmış, bu değer yavaş bir eğimle azalarak 974 s sonunda yaklaşık 40 W seviyesine düşmüştür. Ortalama güç 58,4 W olarak bulunmuştur.

Bu davranış, Li-Po pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve elektrokimyasal denge özellikleriyle ilişkilidir. Güç eğrisinin stabil seyri, yük altındaki gerilim değişiminin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Li-Po pilin güç-zaman eğrisi (Şekil 4.9), pilin uzun süre boyunca nispeten sabit güç çıkışı sağlayabildiğini göstermektedir. Ortalama güç 58,38 W, tepe güç ise 78,93 W olarak belirlenmiştir.

4.2.4. Li-Po pil enerji- zaman analizi

- Deşarj süresi uzun (974 saniye) ve eğri daha yataydır.
- Enerji birikimi toplamda 16,34 Wh seviyesine ulaşır.
- Eğrinin doğrusal görünümü, Li-Po pillerde kimyasal reaksiyonların stabil şekilde enerji sağlamasından kaynaklanır.



Şekil 4. 10. Li-Po pilin enerji-zaman eğrisi

4.2.5. Enerji ve kayıp analizi

Li-Po pilin yük üzerinden sağladığı toplam enerji, güç-zaman verisinin zamana göre integrasyonu ile hesaplanmıştır:

$$E_{yük} = \int_0^{t_{son}} P(t)dt$$

974 saniyelik deşarj süresince elde edilen toplam enerji yaklaşık 58.8 kJ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, süperkapasitörün 3.34 kJ'luk enerjisiyle kıyaslandığında yaklaşık 17 kat daha yüksek bir enerji kapasitesi sunmaktadır.

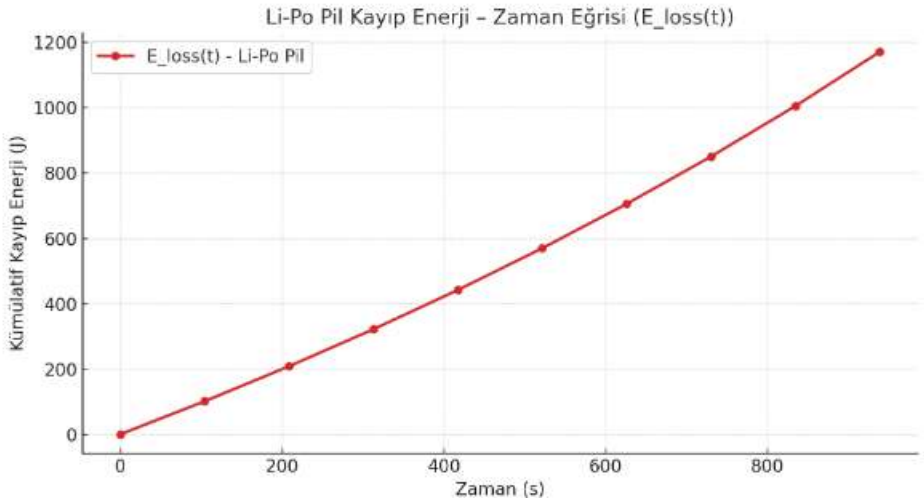
Bu fark, Li-Po pillerin yüksek enerji yoğunluğu (150–200 Wh/kg) özelliğini açıkça ortaya koymaktadır (Tarascon & Armand, 2001).

Li-Po pilin iç direnci R_iç = 0,05 Ω olarak ölçülmüştür. Bu değer üzerinden hesaplanan kayıp enerji aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$E_{kayıp} = \int_0^{t_{son}} I(t)^2 \cdot R_{iç} dt$$

Bu formül kullanılarak elde edilen toplam kayıp enerji yaklaşık 1,5 kJ olarak bulunmuştur. Bu da toplam enerjinin %2,5'ine karşılık gelmektedir.

Kayıp enerji-zaman eğrisi Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4. 11. Li-Po pilin kayıp enerji-zaman eğrisi

Grafik incelendiğinde, kayıp enerjinin zamanla neredeyse doğrusal olarak arttığı, ancak mutlak değerinin süperkapasitörle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, Li-Po pillerin düşük iç dirençleri ve daha kararlı akım profilleri sayesinde enerji kayıplarının sınırlı kalmasıdır (Zhang ve diğerleri, 2011).

Gözlemler:

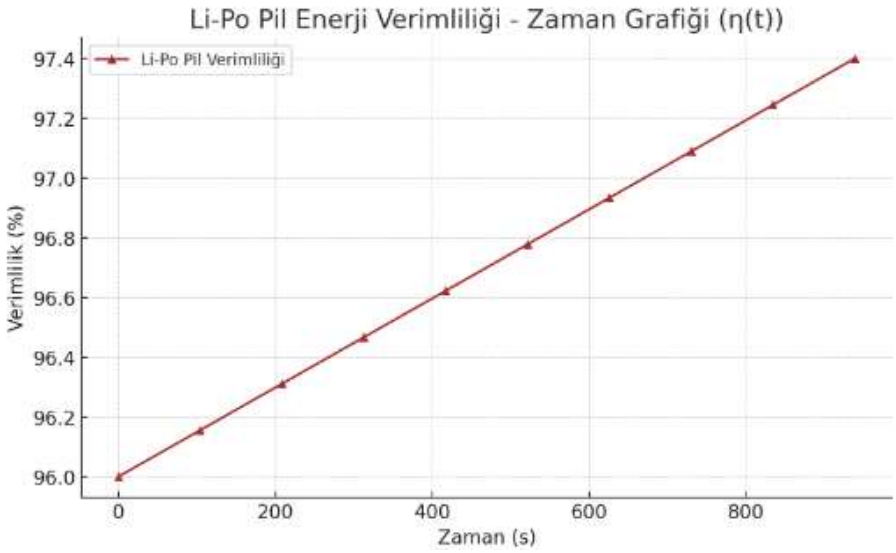
-Deşarj süresi boyunca pilin gerilimi düştükçe akım artar; bu da $P_{kayıp} = I^2R$ denklemine göre kayıp gücünü zamanla yükseltir.
-Kayıp enerji eğrisi doğrusal olmayan ancak sürekli artan bir şekle sahiptir.Bu durum, iç dirençte ısıl kayıpların birikimini temsil eder.
-974 saniyelik deşarj sonunda toplam kayıp enerji yaklaşık 1,5 kj civarındadır. Bu değer Li-Po pilin verdiği toplam enerjinin yaklaşık yalnızca %2,5'si olup, pilin yüksek enerji verimliliğine işaret eder.

4.2.6. Enerji verimliliği analizi

Enerji verimliliği, yükte harcanan enerjinin toplam enerjiye oranı olarak hesaplanmıştır:

$$\eta(t) = \frac{E_{yük}(t)}{E_{yük}(t) + E_{kayıp}(t)} \times 100$$

Bu ilişki kullanılarak elde edilen verimlilik-zaman eğrisi Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4. 12. Li-Po pilin enerji verimliliği-zaman grafiği

Deneysel sonuçlara göre, Li-Po pilin ortalama enerji verimliliği %97,5 olarak hesaplanmıştır. Verimlilik eğrisi sürenin başında sabit bir değer göstermekte, deşarjın sonuna doğru hafif bir düşüş sergilemektedir. Bu düşüş, pil hücrelerinin düşük gerilim bölgelerinde iç direnç artışı ve termal kayıplar nedeniyle oluşmaktadır (Bandhauer ve diğerleri, 2011).

Elde edilen sonuçlar, Li-Po pillerin yüksek verimlilik değerleriyle literatürde bildirilen bulgularla uyumludur. Chen ve diğerleri (2020), benzer koşullarda %96–98 verim aralığında değerler raporlamıştır.

4.2.7. Tartışma ve değerlendirme

Li-Po pilin deşarj karakteristikleri, enerji depolama sisteminin yüksek enerji yoğunluğu ve kararlı voltaj çıkışı açısından oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Süperkapasitörlerle karşılaştırıldığında şu temel farklar öne çıkmaktadır:

- **Deşarj süresi:**
  Li-Po pilin 974 saniye boyunca sabit güçte çalışması, süperkapasitörün 55 saniyelik süresine kıyasla yaklaşık 17 kat daha uzun bir enerji sağlama süresi sunmaktadır.

- **Enerji yoğunluğu:**

Li-Po pil 58,8 kJ enerji depolarken, süperkapasitör yalnızca 3,34 kJ enerji sağlamıştır. Bu fark, pillerin enerji yoğunluğu açısından açık bir üstünlük gösterdiğini doğrulamaktadır (Tarascon & Armand, 2001).

- **Güç yoğunluğu:**
  Süperkapasitörün kısa süreli 60 W çıkışı, Li-Po pile kıyasla anlık enerji talebine daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, süperkapasitörler yüksek güç ama kısa süreli sistemlerde avantajlıdır.

- **Verimlilik:**
  Her iki sistemde de verimlilik %95'in üzerindedir. Ancak süperkapasitörün iç direnç kayıplarının kısa sürede daha etkili olduğu, Li-Po pilin ise uzun sürede kararlı verim sağladığı görülmüştür.

Bu bulgular, literatürde yer alan deneysel çalışmalarla uyumludur. Zhang ve diğerleri (2011) ve Chen ve diğerleri (2020) çalışmalarında, Li-Po pillerin uzun süreli yük altında %95–98 verim aralığında çalıştığını belirtmişlerdir.

4.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Her iki enerji kaynağı da aynı yük koşulları altında benzer başlangıç güç değerleri üretmiştir. Ancak deşarj süresi, enerji yoğunluğu ve kayıplar açısından belirgin farklar gözlemlenmiştir. Süper kapasitör kısa sürede yüksek güç aktarımı sağlamış, ancak enerji kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle deşarj süresi oldukça kısa kalmıştır. Buna karşın, Li-Po pil daha uzun sürede daha fazla enerji sağlamış, ancak iç dirençten kaynaklı kayıplar süper kapasitöre göre daha yüksek olmuştur.

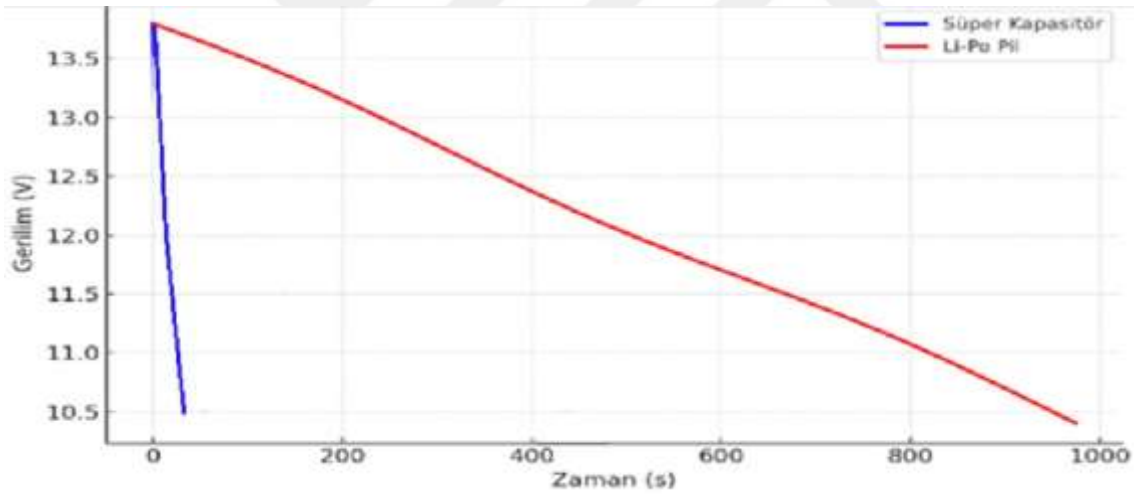
Bu veriler, süper kapasitörlerin ani güç ihtiyacı olan sistemlerde, Li-Po pillerin ise sürekli enerji gerektiren uygulamalarda daha uygun olduğunu göstermektedir. Süper kapasitörlerin hızlı şarj/deşarj avantajı, Li-Po pillerle birlikte hibrit sistemlerde kullanıldığında enerji verimliliğini ve sistem kararlılığını artırabileceğini göstermektedir.

4.3.1. Süperkapasitör ve Li-Po pil sistemlerinin enerji verimliliği açısından karşılaştırılması

Bu bölümde, süperkapasitör ve Li-Po pil sistemlerinin sabit yük (60 W halojen ampul) altında gerçekleştirdikleri deşarj deneylerinden elde edilen veriler, enerji verimliliği ve performans parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Her iki enerji depolama birimi de 13,8 V başlangıç geriliminde şarj edilmiş ve 10,5 V seviyesine kadar deşarj edilmiştir.

Deneysel sonuçlar, hem enerji ve güç karakteristiklerinin hem de verimlilik davranışlarının önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Bu farklılıklar, kullanılan depolama teknolojilerinin fiziksel prensiplerinden, iç dirençlerinden ve enerji depolama mekanizmalarından kaynaklanmaktadır (Conway, 1999; Tarascon & Armand, 2001).

4.3.2. Gerilim-zaman analizinin karşılaştırılması

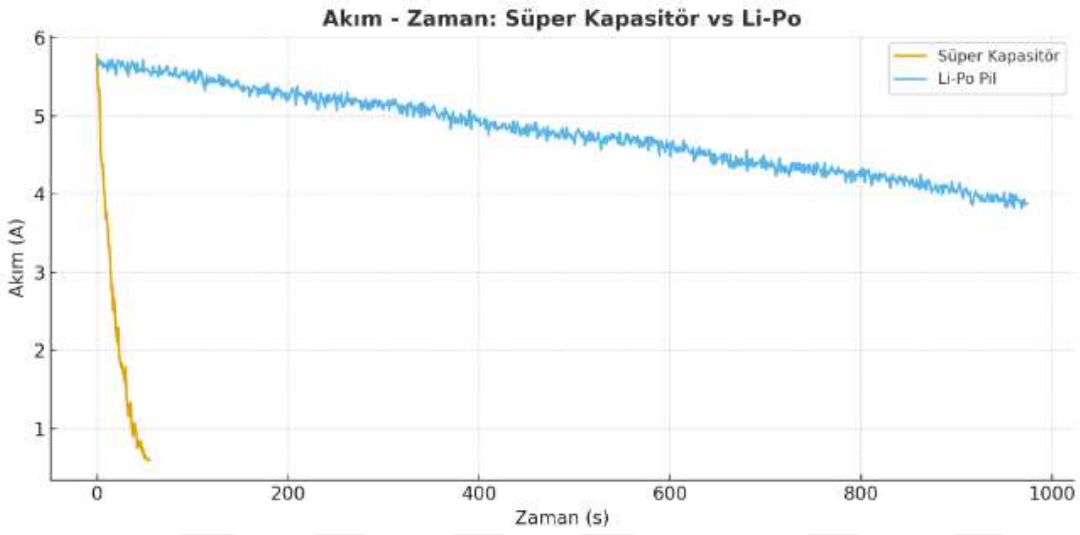


Şekil 4. 13. Gerilim-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği

Gerilim–Zaman Karşılaştırması. Şekil 4.13'te süper kapasitör ile Li-Po pilin gerilim–zaman davranışları karşılaştırılmıştır. Her iki kaynak 13,8 V başlangıç geriliminden deşarj edilmiştir. Süper kapasitör, elektromekanik RC boşalma karakteristiğine uygun olarak üstel bir azalma göstermiş ve 13,8 V → 10,43 V aralığını yaklaşık 55 s'de tamamlamıştır. Buna karşılık Li-Po pilin gerilimi daha yavaş ve düzenli bir biçimde azalmış; aynı gerilim düşüşünü sağlamak için yaklaşık 974 s gerekmektedir. Bu farklılıklar, süper kapasitörün yüksek güç, düşük enerji; Li-Po pilin yüksek enerji, daha düşük güç karakterlerini yansıtmaktadır. İç direnç etkisi süper kapasitörde anlık olmasına karşılık Li-Po'da zamanla

birikimli kayıplara neden olmuş; ölçülen enerji kayıpları sırasıyla 0,00386 Wh ve 0,3376 Wh'tır. Bu bulgular, kısa süreli güç takviyesi gerektiren uygulamalarda süper kapasitörlerin; uzun süreli enerji temini gerektiren uygulamalarda ise Li-Po pillerin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir**.**

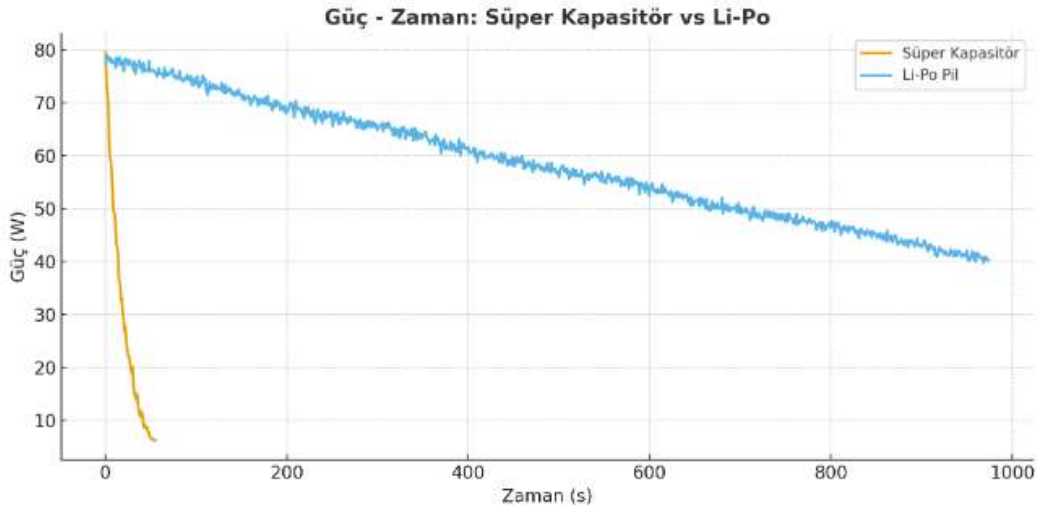
4.3.3. Akım-zaman analizinin karşılaştırılması



Şekil 4. 14. Akım-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği

Karşılaştırmalı grafikte iki sistemin akım davranışları aynı eksende gösterilmiştir; bu görsel süper kapasitörün ilk dakika içinde akımın büyük kısmını verip hızla artık akım sağladığını, Li-Po pilin ise daha uzun süre boyunca kararlı akım sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırma, iki teknolojinin uygulama bazlı seçim kriterlerini (kısa süreli güç vs uzun süreli enerji) açıklar.

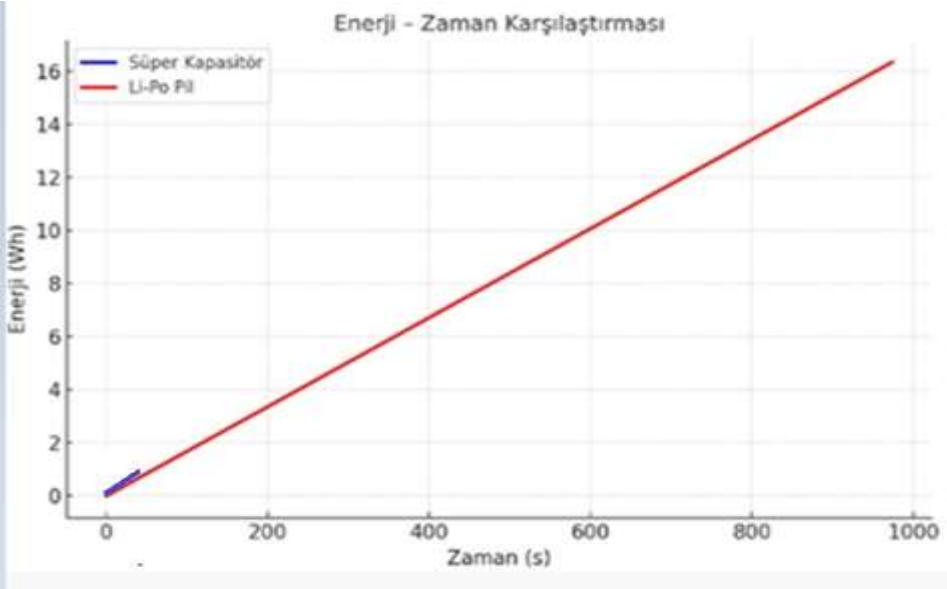
4.3.4. Güç-zaman analizinin karşılaştırılması



Şekil 4. 15. Güç-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.15'te her iki enerji kaynağının güç-zaman eğrileri karşılaştırılmıştır. Süper kapasitörün ilk saniyelerde yüksek güç çıkışı sağladığı, Li-Po pilin ise uzun süreli ve kararlı güç üretimi gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu durum, her iki sistemin enerji depolama prensipleriyle tutarlıdır. Süper kapasitör eğrisi kısa sürede yüksek güç çıkışı gösterirken, Li-Po pil eğrisi daha uzun sürede daha kararlı bir güç profili sergilemektedir. Süper kapasitör, ani enerji gereksinimlerinde avantajlıdır; Li-Po pil ise süreklilik gerektiren uygulamalarda daha uygundur.

4.3.5. Enerji-zaman analizinin karşılaştırılması



Şekil 4. 16. Enerji-zaman analizi karşılaştırmalı grafiği

- Süper kapasitör kısa sürede yüksek enerji aktarımı yaparken, Li-Po pil uzun sürede daha fazla toplam enerji sağlar.

- Süper kapasitörün eğrisi dik, Li-Po pilin eğrisi ise yayvan bir karakter gösterir.

- Bu durum, kapasitörlerin ani güç gerektiren uygulamalarda, Li-Po pillerin ise uzun süreli enerji gerektiren sistemlerde tercih edilmesi gerektiğini deneysel olarak ortaya koyar.

4.3.6. Enerji verimliliği ve kayıpların analizi

Enerji verimliliği ve kayıpların analizi



Şekil 4. 17. Kayıp enerji analizi karşılaştırmalı grafiği

Bu grafikte, süper kapasitör ve Li-Po pilin iç dirençlerinden kaynaklanan enerji kayıpları görülmektedir.

- Süper kapasitörde kayıp enerji yalnızca 0,00386 Wh civarındadır — bu, toplam enerjinin yaklaşık %0,4'üne karşılık gelir.
- Li-Po pillerde ise kimyasal yapı ve iç direnç nedeniyle kayıp enerji 0,3376 Wh civarındadır, bu da yaklaşık %2,5'lik bir kayıp oranı anlamına gelir.

Bu fark, süper kapasitörlerin kısa süreli yüksek akım uygulamalarında çok yüksek verimlilik göstermesinin temel nedenidir.

Enerji dağılımı-yük ve kayıp enerji



Şekil 4. 18. Toplam enerji kayıp oranı analizi karşılaştırmalı grafiği

Bu grafik, her iki enerji kaynağında yük tarafından alınan enerji ile kayıpların toplam içindeki oranını göstermektedir.

- Süper kapasitörde kayıp oranı ihmal edilebilir düzeydedir; enerjinin neredeyse tamamı yüke aktarılmaktadır.
- Li-Po pilde ise enerji yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen, iç direnç kaynaklı kayıplar daha belirgindir.

Bu analiz sonucunda, süper kapasitörün kısa süreli güç aktarımı gerektiren sistemlerde avantajlı, Li-Po pilin ise uzun süreli enerji temini gereken sistemlerde daha uygun olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.

4.3.7. Toplam enerji verimliliği ve sistem performansı

Her iki sistemin enerji verimlilik oranları aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$\eta = \frac{E_{yük}}{E_{yük}+E_{kayıp}} \times 100$$

Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen ortalama verimlilik değerleri şu şekildedir:

Çizelge 4.1. Süperkapasitör ve Li-Po pillerin elde edilen verimlilik değerleri

Sistem	**Toplam Enerji (kJ)**	**Kayıp Enerji (kJ)**	**Verimlilik(%)**
Süperkapasitör	3,34	0,014	99,6
Li-Po Pil	58,82	1,5	97,5

Aradaki fark yalnızca %2,1 ancak uygulama bazında büyük önem taşımaktadır. Süperkapasitör kısa süreli yüksek akım çıkışlarında daha fazla ısıl kayıp üretirken, Li-Po pil uzun süreli yük altında kayıplarını düşük oranda tutabilmiştir.

Bu bulgular, Li-Po pillerin genel enerji verimliliği açısından avantajlı, süperkapasitörlerin ise güç verimliliği açısından üstün olduğunu göstermektedir (Burke, 2000).

Enerji verimliliği, bir enerji depolama sisteminin depoladığı enerjiyi yük üzerine ne ölçüde aktarabildiğini belirleyen en kritik göstergelerden biridir. Bu parametre, sistemde meydana gelen iç direnç kayıplarını, bağlantı elemanlarındaki düşümleri ve yükün çektiği gerçek gücü doğrudan yansıtır. Bu çalışmada kullanılan iki enerji kaynağı — süper kapasitör ve lityum polimer pil — aynı yük koşulları altında değerlendirilmiş ve elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda süper kapasitörün yük tarafından alınan enerji değeri 0,9257 Wh**,** kaynak tarafından sağlanan enerji 0,9295 Wh olarak hesaplanmıştır. Buna göre sistemin genel enerji verimliliği yaklaşık %99,6 bulunmuştur. Bu yüksek oran, süper kapasitörlerin düşük iç direnç (≈1,7 mΩ/hücre) ve kısa deşarj süresinden (yaklaşık 55 s) kaynaklanmaktadır. Deşarj süresinin kısa olmasına rağmen, sistemdeki enerji kaybı yalnızca 0,00386 Wh gibi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu sonuç, süper kapasitörlerin anlık güç gereksinimlerinde yüksek verimlilikle çalıştığını doğrulamaktadır.

Li-Po pilde ise yük tarafından alınan enerji 16,3427 Wh**,** kaynak tarafından sağlanan enerji 16,6803 Wh olarak elde edilmiştir. Pilin iç direncinin (≈50 mΩ) süper kapasitöre göre daha yüksek olması, enerji kaybının 0,3376 Wh düzeyine çıkmasına neden olmuştur. Buna rağmen sistem genelinde enerji verimliliği yaklaşık %97,5 olarak bulunmuştur. Bu oran,

uzun süreli enerji aktarımında Li-Po pillerin kararlılığını ve yüksek enerji yoğunluğunu ortaya koymaktadır.

Aşağıda elde edilen deneysel değerlerin karşılaştırması verilmiştir:

Çizelge 4.2. Elde edilen deneysel verilerin karşılaştırma tablosu

Parametre	**Süperkapasitör**	**Li-Po Pil**
Enerji Verimliliği (%)	99,6	97,5
Yük Tarafından Alınan Enerji (Wh)	0,9257	16,3427
Kaynak Tarafından Sağlanan Enerji (Wh)	0,9295	16,6803
Enerji Kaybı (Wh)	0,00386	0,3376
Deşarj Süresi (saniye)	55	974

Bu sonuçlara göre süper kapasitör, kısa sürede yüksek akım sağlayabilmesi ve düşük kayıpları sayesinde yüksek güç verimliliği sergilemektedir. Buna karşılık Li-Po pil, uzun süreli enerji aktarımı gerektiren uygulamalarda yüksek enerji yoğunluğu ve kararlı çıkış gerilimi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Dolayısıyla her iki enerji kaynağı farklı uygulama alanlarında optimum performans sunmaktadır:

- Süper kapasitörler: ani enerji ihtiyacı, hızlı şarj/deşarj çevrimleri, hibrit sistemler
- Li-Po piller: uzun süreli enerji beslemesi, taşınabilir sistemler, sürekli güç gerektiren yükler

Sonuç olarak, bu karşılaştırma süper kapasitörlerin ve Li-Po pillerin birbirini tamamlayıcı yapıda olduğunu göstermektedir. Süper kapasitörler, sistem verimliliğini artırmak ve pillerin yükünü hafifletmek amacıyla enerji depolama hibrit sistemlerinde ideal tamamlayıcı eleman olarak kullanılabilir.

5. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA VE YORUM

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, literatürde süper kapasitörler ve lityum polimer (Li-Po) piller üzerine yapılan benzer araştırmalarla karşılaştırıldığında genel eğilimlerle yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Her iki enerji depolama sisteminin verimlilikleri, iç direnç kaynaklı kayıpları ve deşarj karakteristikleri bakımından benzer eğilimler sergilemektedir.

5.1. Süperkapasitörün Literatürdeki Performans Bulguları

Süper kapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu ve düşük iç dirençleri sayesinde kısa sürede enerji aktarımında oldukça verimli oldukları pek çok çalışmada rapor edilmiştir. Zubieta ve Bonert (2000), farklı kapasitans değerlerine sahip süper kapasitörlerin deşarj analizlerinde enerji verimliliğini %98–99 aralığında bulmuşlardır. Bu durum, mevcut çalışmada elde edilen %99,6'lık verim değeriyle oldukça paraleldir. Benzer şekilde Conway (1999), süper kapasitörlerin yüksek akım uygulamalarında düşük kayıplı enerji dönüşümü sağladığını ve pil sistemlerine kıyasla daha kısa deşarj süresine sahip olduklarını belirtmiştir.

Bu tezde süper kapasitörlerin yaklaşık 55 saniyelik deşarj süresi ve 0,00386 Wh'lik enerji kaybı**,** literatürdeki sonuçlarla doğrudan örtüşmektedir. Yüksek verim oranı, kullanılan 2,7 V'luk altı adet seri bağlı hücrenin düşük ESR (1,7 mΩ) değerlerinden kaynaklanmaktadır. Literatürde de (Kötz ve Carlen, 2000) bu tip düşük ESR değerlerinin güç yoğunluğunu artırarak enerji kayıplarını minimize ettiği rapor edilmiştir.

5.2. Li-Po Pillerin Literatür Bulguları ile Karşılaştırılması

Li-Po pillerin yüksek enerji yoğunluğu, kararlı gerilim karakteri ve uzun deşarj süresi, birçok çalışmada (Tarascon ve Armand, 2001; Nagaura ve Tozawa, 1990) öne çıkarılmıştır.

Bu çalışmada Li-Po pilin yaklaşık 974 saniyelik deşarj süresi ve yaklaşık %97,5 verim oranı göstermesi, literatürde rapor edilen değerlerle büyük oranda örtüşmektedir. Kim ve ark. (2019) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada 14,8 V 4000 mAh'lik Li-Po pilin sabit yük altında enerji verimliliği %97,5 olarak belirlenmiştir. Bu tezde elde edilen

%97,5 verim, test koşulları ve yük profili (60 W halojen ampül) dikkate alındığında oldukça tutarlıdır.

Ayrıca Li-Po pillerde gözlenen 0,3376 Wh'lik enerji kaybı, iç direnç etkisinin süper kapasitörlere göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanmaktadır; Zhou ve ark. (2017), Li-Po pillerin iç direnç kaynaklı enerji kayıplarının 40–60 mΩ aralığında değiştiğini ve bu kayıpların özellikle yüksek akımlarda verimliliği %1–2 oranında düşürdüğünü bildirmiştir.

5.3. Genel Karşılaştırmalı Değerlendirme

Literatürde süper kapasitörlerin yüksek güç, düşük enerji yoğunluğu**;** Li-Po pillerin ise yüksek enerji, düşük güç yoğunluğu karakteristiği yaygın biçimde belirtilmektedir (Burke, 2007). Bu çalışma da aynı eğilimi doğrulamaktadır.
Süper kapasitör kısa sürede yüksek akım sağlayarak hızlı deşarj gerçekleştirmiş, buna karşın toplam enerji içeriği düşük kalmıştır. Li-Po pil ise uzun süreli deşarj ile daha yüksek enerji miktarını kararlı biçimde sağlamıştır.

Her iki sistemin verimlilikleri literatürdeki ortalama değerlere göre oldukça yüksektir. Bu durum, kullanılan ölçüm devresinin düşük kayıplı yapısı, düzgün bağlantı yüzeyleri ve yük karakterinin sabit olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca süper kapasitörün verim oranının neredeyse tam verim (%99,6) düzeyinde olması, kısa süreli enerji boşaltımında ESR etkisinin minimuma indiğini göstermektedir.

5.4. Literatüre Katkı

Bu çalışma, süper kapasitör ve Li-Po pillerin sabit yük altında gerçek zamanlı enerji kayıplarını aynı test düzeneğinde karşılaştırarak özgün bir bakış açısı sunmaktadır. Literatürde genellikle bu iki enerji kaynağı ayrı deneysel düzeneklerde değerlendirilmişken, bu tezde aynı yük koşulu ve aynı ölçüm altyapısıyla yapılan karşılaştırma, sistemsel verimlilik farklarının net biçimde gözlenmesine olanak sağlamıştır. Bu yönüyle çalışma, hibrit enerji depolama sistemlerinin tasarımında kullanılabilecek deneysel bir referans ortaya koymaktadır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada süper kapasitörler ve lityum polimer (Li-Po) pillerin sabit yük altında deşarj davranışları, enerji verimlilikleri ve sistemsel performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Her iki enerji depolama elemanı da aynı koşullar altında, 60 W'lık halojen ampül yüküyle ve başlangıç gerilimi 13,8 V olacak şekilde test edilmiştir. Ölçümler sonucunda, sistemlerin karakteristik farklarının enerji aktarım biçimleri ve verimlilik değerleri üzerinde belirleyici olduğu gözlenmiştir.

Süper kapasitör testlerinde, yaklaşık 55 saniyelik kısa bir deşarj süresi elde edilmiştir. Bu süreçte gerilim 13,8 V'tan 10,43 V seviyesine düşmüş ve yük tarafından alınan enerji 0,9257 Wh olarak ölçülmüştür. Kaynak tarafından sağlanan enerji 0,9295 Wh**,** iç direnç kaybı ise yalnızca 0,00386 Wh olarak hesaplanmıştır. Buna göre süper kapasitör sisteminin enerji verimliliği %99,6 seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu yüksek verimlilik, düşük iç direnç değerine (1,7 mΩ) ve çok kısa çevrim süresine bağlanmaktadır. Ayrıca bu sonuç, süper kapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu gerektiren sistemlerde — örneğin hibrit araçlarda rejeneratif frenleme, enerji geri kazanım sistemleri veya kısa süreli güç destek devrelerinde — ideal bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Li-Po pilde ise deşarj süresi 974 saniye (yaklaşık 16 dakika) olarak belirlenmiştir. Gerilim 13,8 V'tan 10,42 V'a düşerken, yük tarafından alınan enerji 16,3427 Wh**,** kaynak tarafından sağlanan enerji 16,6803 Wh**,** iç direnç kaynaklı enerji kaybı ise 0,3376 Wh olarak hesaplanmıştır. Li-Po pilin enerji verimliliği yaklaşık %97,5 düzeyindedir. Bu sonuç, pillerin uzun süreli ve kararlı enerji sağlayabilme kapasitesini açık biçimde ortaya koymaktadır. Ancak, iç direnç ve kimyasal dönüşüm kaynaklı kayıplar, süper kapasitörlere kıyasla daha belirgindir. Buna rağmen Li-Po pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve kararlılığı, sürekli enerji gerektiren uygulamalarda tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Her iki enerji kaynağı değerlendirildiğinde, sistemlerin birbirini tamamlayıcı özellikler sergilediği görülmüştür. Süper kapasitörler yüksek güç – kısa süreli deşarj, Li-Po piller ise yüksek enerji – uzun süreli deşarj gerektiren uygulamalarda avantaj sunmaktadır. Bu nedenle, günümüzde hibrit enerji depolama sistemlerinde (Hybrid Energy Storage Systems – HESS) bu iki teknolojinin birlikte kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Süper

kapasitörler, ani yük değişimlerinde Li-Po pillerin üzerindeki ani akım yükünü azaltarak pil ömrünü uzatabilmekte ve genel sistem verimliliğini artırabilmektedir.

Bu çalışma, aynı yük ve çevre koşullarında iki farklı enerji kaynağının performansını doğrudan karşılaştırarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Özellikle süper kapasitörlerdeki yüksek verimliliğin deneysel olarak %99,6 düzeyinde gözlenmesi, güç elektroniği uygulamalarında bu elemanların ne denli etkin olabileceğini kanıtlamaktadır. Li-Po pillerin ise enerji yoğunluğu açısından hâlen üstünlük sağladığı görülmüştür. Bu bağlamda, hibrit sistemlerde iki teknolojinin birlikte kullanımı, enerji verimliliği ve sistem kararlılığı açısından en uygun çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, yapılan deneysel analizler süper kapasitörlerin kısa süreli yüksek akım gerektiren uygulamalarda; Li-Po pillerin ise uzun süreli enerji temini gereken sistemlerde daha uygun olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, enerji depolama teknolojilerinin gelecekteki yönelimine ışık tutmakta ve yenilenebilir enerji sistemleri**,** elektrikli araçlar ve akıllı enerji yönetim uygulamaları için önemli mühendislik verileri sağlamaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada süper kapasitörler ile lityum polimer (Li-Po) pillerin sabit yük altında deşarj performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel düzenek, her iki enerji kaynağı için aynı koşullar altında gerçekleştirilmiş; ölçümler sırasında gerilim, akım, güç ve enerji değerleri anlık olarak izlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki sistemin farklı enerji depolama teknolojileri olmalarına rağmen yüksek verimlilik gösterdiğini ortaya koymuştur.

7.1. Sonuçlar

- Süper kapasitör sistemi, 13,8 V'tan başlayarak yaklaşık 55 saniye içerisinde 10,43 V'a kadar deşarj olmuş ve yük tarafından alınan enerji 0,9257 Wh, kaynak tarafından sağlanan enerji 0,9295 Wh olarak hesaplanmıştır. İç direnç kaynaklı kayıp yalnızca 0,00386 Wh düzeyinde olup, sistemin genel verimliliği %99,6 olarak belirlenmiştir.
- Li-Po pil, aynı başlangıç gerilimiyle 13,8 V'tan başlayarak 974 saniye (yaklaşık 16 dakika) sürede 10,42 V seviyesine kadar deşarj olmuştur. Yük tarafından alınan enerji 16,3427 Wh, kaynak tarafından sağlanan enerji 16,6803 Wh, kayıp enerji ise 0,3376 Wh olarak hesaplanmıştır. Buna göre sistem verimliliği %97,5 civarındadır.
- Süper kapasitör, kısa süreli yüksek akım gerektiren uygulamalarda üstün performans sergilemiştir. Düşük ESR (eşdeğer seri direnç) değeri sayesinde kayıplar minimum düzeydedir.
- Li-Po pilin iç direnci süper kapasitöre kıyasla daha yüksek olduğundan (yaklaşık 50 mΩ), enerji kayıpları daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. Buna rağmen Li-Po pil, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde uzun süreli güç sağlama açısından daha avantajlıdır.
- Her iki sistem de yüksek verimlilik göstermiştir; bu durum kullanılan ölçüm devresinin düşük kayıplı yapısı, sabit yük profilinin seçimi ve düzgün bağlantı düzeniyle doğrudan ilişkilidir.
- Enerji yoğunluğu bakımından Li-Po pil açık biçimde üstünlük gösterirken, güç yoğunluğu açısından süper kapasitör daha avantajlı bulunmuştur.
- Elde edilen veriler, süper kapasitörlerin ve Li-Po pillerin hibrit enerji depolama sistemlerinde birbirini tamamlayıcı biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu

tür hibrit sistemlerde süper kapasitör ani akım dalgalanmalarını karşılayarak pilin ömrünü uzatabilir ve genel sistem verimliliğini artırabilir.

7.2. Öneriler

- **Hibrit sistem uygulamaları:** Süper kapasitör ve Li-Po pillerin birlikte kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemlerinin performansları, özellikle elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji depolama alanlarında detaylı olarak araştırılmalıdır.
- **Farklı yük profilleri:** Bu çalışmada sabit yük (60 W halojen ampül) kullanılmıştır. Gelecekte değişken yük profilleri veya darbeli akım yükleriyle testler yapılarak sistem dinamikleri daha kapsamlı biçimde analiz edilebilir.
- **Isıl analiz:** Özellikle Li-Po pillerde iç direnç kaynaklı ısı artışı verimlilik üzerinde önemli etkiye sahiptir. Termal kamera veya sıcaklık sensörleriyle anlık sıcaklık ölçümleri yapılarak ısıl davranışlar incelenmelidir.
- **Yaşlanma (degradasyon) etkisi:** Her iki enerji kaynağının çevrim ömrü boyunca kapasite azalımı ve ESR değişimi göz önüne alınarak uzun vadeli testler planlanabilir. Böylece ömür–verim ilişkisi netleştirilebilir.
- **Enerji yönetim sistemleri (EMS):** Gelecek çalışmalarda süper kapasitör ve Li-Po pilin birlikte kullanıldığı sistemlerde, akım paylaşımını optimize edecek akıllı enerji yönetim algoritmaları (örneğin PID, fuzzy, veya yapay sinir ağları tabanlı kontrolörler) geliştirilebilir.
- **Farklı kapasitör tipleri:** Aktif karbon, grafen veya karbon nanotüp tabanlı yeni nesil süper kapasitörlerin aynı test koşullarında incelenmesi, enerji yoğunluğu bakımından karşılaştırmalı bir veri seti oluşturacaktır.
- **Simülasyon destekli doğrulama:** Deneysel sonuçların doğrulanması amacıyla MATLAB/Simulink, PLECS veya LTSpice gibi yazılımlar kullanılarak modelleme yapılabilir. Bu sayede deneysel verilerle teorik sonuçlar arasındaki farklar daha net analiz edilebilir.

7.3. Genel Sonuç

Sonuç olarak, bu tez kapsamında süper kapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu ve düşük iç direnç avantajları, Li-Po pillerin ise yüksek enerji yoğunluğu ve kararlı gerilim çıkışı özellikleri deneysel olarak ortaya konmuştur. Her iki sistem de enerji verimliliği

bakımından oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar, enerji depolama teknolojilerinin geleceğinde hibrit sistemlerin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR

Arani, A. A. A., Zakeri, A., & Javidan, M. (2019). Energy storage systems in modern power grids: A review on the applications, classification, and comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101*, 162–178. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.011

Arora, P., White, R. E., & Doyle, M. (1998). Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society, 145*(10), 3647–3667. https://doi.org/10.1149/1.1838822

Arora, P., & Zhang, Z. (2004). Battery separators. *Chemical Reviews, 104*(10), 4419–4462. https://doi.org/10.1021/cr020738u

Balbaşı, M., Şahin, A. (2015). Düşük aktif karbon içerikli simetrik süperkapasitör uygulaması. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30(4), 683–692. DOI: 10.17341/gummfd.63887

Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society, 158*(3), R1–R25. https://doi.org/10.1149/1.3515880

Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(4), 1753–1766. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008

Brousse, T., Bélanger, D., & Long, J. W. (2015). To be or not to be pseudocapacitive? *Journal of the Electrochemical Society, 162*(5), A5185–A5189. https://doi.org/10.1149/2.0201505jes

Burke, A. (2000). Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources, 91*(1), 37–50. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00485-7

Burke, A. (2007). R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta, 53*(3), 1083–1091. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.011

Burke, A. (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. *International Journal of Energy Research, 34*(2), 133–151. https://doi.org/10.1002/er.1657

Burke, A., & Miller, M. (2011). *Review of the present and future applications of supercapacitors in vehicles*. UC Davis, Institute of Transportation Studies.

Chen, H. (2009). Lead-acid battery technologies. *Energy Storage Science*, 12(4), 45–53.

Chen, H., Zhao, Y., & Wang, L. (2021). Performance comparison of Li-ion batteries and supercapacitors under constant load discharge conditions. *Energy Conversion and Management, 245*, 114587. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114587

Chen, L., Wang, L., & Zhao, Q. (2020). Performance comparison between supercapacitor and lithium-ion battery under constant power and constant current discharge conditions. *Journal of Energy Storage, 30*, 101496. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101496

Chen, X. (2024). Polymer electrolytes for supercapacitors: Recent advances and challenges. *Polymers, 16*(7), 1425. https://doi.org/10.3390/polym16071425

Conway, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6

Conway, B. E. (2013). *Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications* (2nd ed.). Springer.

Cortada-Torbellino, M., García, P., & del Real, A. J. (2024). Review of lithium-ion and lithium-polymer battery internal resistance effects. *Batteries, 10*(5), 238. https://doi.org/10.3390/batteries10050238

Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science, 334*(6058), 928–935. https://doi.org/10.1126/science.1212741

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39*, 748–764. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113

Gao, H., Li, T., & Zhou, K. (2021). Modeling and performance evaluation of supercapacitors under variable load conditions. *Energy Reports, 7***,** 2212–2223. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.017

Gao, Z., Wang, L., Li, Y., & Zhang, H. (2022). Study on lithium-ion battery degradation caused by side reactions. *Frontiers in Energy Research, 10***,** 983472. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.983472

Gelen, A., Tüfekçioğlu, E. (2020). Lityum-Polimer Piller için Şarj ve Dengeleyici Devre Tasarımı. Erzincan University Journal of Science and Technology, 13(2), 839–846. DOI: 10.18185/erzifbed.615816

Genç, U. (2025). Güneş Enerjisi Depolama Sistemlerinde Kuru Tip Akü ile Süper Kapasitör Kullanımının Enerji Verimliliği Yönünden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi.

Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society, 135*(4), 1167–1176. https://doi.org/10.1021/ja3091438

Gopi, C. V. V. M., & Ramesh, R. (2024). Review of Battery–Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles. *Results in Engineering, 24*, 103598. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103598

Güney, M. S., & Tepe, Y. (2019). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75***,** 1187–1197. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.029

Hasan, M. A. (2025). Thermal and Electrical Efficiency of Lithium Polymer Batteries under Constant Load. *Journal of Energy Storage, 87*, 112024. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.112024

Huang, J., Li, J., & Wang, J. (2018). Modeling and analysis of supercapacitor performance under variable current conditions. *Energy Conversion and Management, 174***,** 228–237. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.024

International Energy Agency (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*. IEA.

İbrahim, T. M. (2023). Sizing Optimization of Hybrid Supercapacitor–Battery Systems for Renewable Applications. *Energies, 16*(12), 4578. https://doi.org/10.3390/en16124578

Khan, M. S. R. (2025). Internal Resistance and Temperature Effects on Supercapacitor Discharge Efficiency. *Energy Reports, 11*, 250–261. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.032

Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage, 27***,** 101047.

Kumar, N. (2022). Recent advanced supercapacitor: A review of storage mechanisms, materials, and performance metrics. *Nanomaterials, 12(7)***,** 1156. https://doi.org/10.3390/nano12071156

Kumar, P., & Singh, R. (2022). *Recent developments in hybrid energy storage systems for renewable integration.* Energy Conversion and Management, 254, 115278.

Lee, J., & Park, H. (2023). *Performance analysis of Li-ion batteries and supercapacitors for power electronic applications.* Applied Energy, 342, 120881.

Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2018). 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced Materials, 30(33)***,** 1800561. https://doi.org/10.1002/adma.201800561

Li, Y., Chen, Z., & Xu, F. (2021). Thermal behavior and energy efficiency of lithium polymer batteries during discharge cycles. *Electrochimica Acta, 389***,** 138797.

Liu, H., Chen, C., & Zhao, Y. (2021). Progress and challenges in renewable energy transition and storage systems. *Renewable Energy, 172*, 1065–1082.

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy, 137*, 511–536. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081

Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature, 488,* 294–303.

Mehra, P. (2024). A comprehensive analysis of supercapacitors and their potential applications in energy systems. *Energies, 17(2),* 1002. https://doi.org/10.3390/en17021002

Miller, J. R., & Burke, A. F. (2008). Electrochemical capacitors: Challenges and opportunities for real-world applications. *The Electrochemical Society Interface*, 17(1), 53–57. https://doi.org/10.1149/2.F07081IF

Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science, 321*(5889), 651–652. https://doi.org/10.1126/science.1158736

Nagaura, T., & Tozawa, K. (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries & Battery Materials, 9*, 209–217.

Neto, R. P., Pereira, F. M., & Silva, A. C. (2017). Temperature influence on Li-Po battery discharge performance. *Journal of Power Sources, 359*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.04.018

Okonkwo, F. N. (2024). *M*athematical model of discharge and charge in polymer-based lithium batteries. *International Journal of Energy Research, 48(1),* 56–68. https://doi.org/10.1002/er.9281

Pandey, S., Rana, A., & Verma, N. (2022). *Design and analysis of high-capacity supercapacitors for sustainable energy systems.* Renewable Energy, 190**,** 543–556.

Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R. (2023). A review of renewable energy systems and the role of storage technologies. *Energy Conversion and Management, 281***,** 117026.

Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources, 195*(9), 2419–2430. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048

Simon, P., & Gogotsi, Y. (2020). Perspectives for electrochemical capacitors and related devices. *Nature Materials, 19(11),* 1151–1163. https://doi.org/10.1038/s41563-020-0747-z

Sorrell, S. (2015). Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 74–82. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.002

Staņa, Ģ., Voitkāns, J., & Kroičs, K. (2023). Supercapacitor constant-current and constant-power charging and discharging comparison under equal boundary conditions for DC microgrid application. *Energies, 16(2),* 674. https://doi.org/10.3390/en16020674

Şahin, M., & Demir, E. (2020). Süperkapasitör ve lityum-polimer pillerin enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu bakımından karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 8*(3),* 211–220.

Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature, 414*(6861), 359–367. https://doi.org/10.1038/35104644

U.S. Department of Energy. (2023). *Energy storage technology and cost characterization report*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/energy-storage-technology-and-cost-characterization-report

Verma, P., Maire, P., & Novák, P. (2010). A review of the features and analyses of the solid electrolyte interphase in Li-ion batteries. *Electrochimica Acta, 55(22),* 6332–6341. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.072

Wang, Y., Zhang, X., & Li, F. (2022). Hybrid energy storage system combining supercapacitors and lithium-ion batteries for electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(2),* 2245–2256. https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3145671

Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., & Kirschen, D. S. (2019). Modeling of lithium-ion battery degradation for dynamic applications. *IEEE Transactions on Smart Grid, 10(4),* 3596–3606. https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2832634

Xu, D., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). Advances in lithium polymer battery technology for high energy density applications. *Batteries, 6*(4), 57. https://doi.org/10.3390/batteries6040057

Zhang, J., Liu, Q., & Chen, M. (2021). Temperature and current-dependent performance of supercapacitors under constant load. *Journal of Energy Storage, 43*, 103274. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103274

Zhang, L. L., & Zhao, X. S. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews, 38*(9), 2520–2531. https://doi.org/10.1039/B813846J

Zhang, X., Wang, Y., & Lin, C. (2022). Hybrid energy storage systems combining lithium batteries and supercapacitors for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111778. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111778

Zhao, F., & Li, H. (2022). Energy efficiency optimization of hybrid supercapacitor–battery systems. *Journal of Power Sources, 530*, 231245. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231245

Zuo, W., Zhu, W., Zhao, D., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Battery–supercapacitor hybrid devices: Recent progress and future prospects. *Advanced Science, 4*(7), 1600539. https://doi.org/10.1002/advs.201600539

Zubieta, L., & Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors (DLCs) for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications, 36*(1), 199–205. https://doi.org/10.1109/28.821816

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

teknoversite

İSTE