

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ KISA SÜRELİ ANİ
GÜÇ SAĞLAYAN YEDEK BİR GÜÇ SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENAN SEZGİN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET SAİT CENGİZ

ŞUBAT 2025
BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ KISA SÜRELİ ANİ
GÜÇ SAĞLAYAN YEDEK BİR GÜÇ SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENAN SEZGİN
ORCID: 0009-0003-7297-0276

DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET SAİT CENGİZ

ŞUBAT 2025
BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim. Hazırlamış olduğum “Süperkapasitör Beslemeli, Kısa Süreli Ani Güç Sağlayan, Yedek Bir Güç Sistemi Geliştirilmesi” başlıklı tezde 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. 07/02/2025

İmza
Kenan SEZGİN

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ YAZIM KILAVUZU UYGUNLUK BEYANI

“Süperkapasitör Beslemeli, Kısa Süreli Ani Güç Sağlayan, Yedek Bir Güç Sistemi Geliştirilmesi” başlıklı Yüksek Lisans Tezi Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır. 07/02/2025

Tezi Hazırlayan

İmza

Kenan SEZGİN

Danışman

İmza

Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

İmza

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY SAYFASI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğrencisi Kenan SEZGİN tarafından hazırlanan “Süperkapasitör Beslemeli, Kısa Süreli Ani Güç Sağlayan, Yedek Bir Güç Sistemi Geliştirilmesi” Adlı Yüksek Lisans Tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 07/02/2025 tarihinde yapılmış ve tezin oy birliği ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

JÜRİ:

İMZA

Başkan: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Üye: Doç. Dr. Serhat Berat EFE
(Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi)

.....

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulununtarih ve sayılı kararıyla jüri tarafından kabul edilmiş bu çalışmanın yüksek lisans tezi olarak kabulü onaylanmıştır.

....../...../2025

Prof. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL
Enstitü Müdürü

T.C.

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**SÜPERKAPASİTÖR BESLEMELİ KISA SÜRELİ ANİ GÜÇ SAĞLAYAN
YEDEK BİR GÜÇ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Kenan SEZGİN

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ

Şubat 2025

ÖZET

Elektrik enerjisini depolamak için piller ve güç kaynakları kullanılır. Bu kaynaklar süperkapasitörlere göre daha düşük güç yoğunluklarına sahiptir. Elektrokimyasal depolama yöntemlerinde, düşük sıcaklıklarda kimyasal reaksiyon hızlarının yavaşlaması ve içlerindeki kimyasal viskozitelerin artması gibi nedenlerle ciddi performans kayıpları görülmektedir. Bu yapıya sahip piller ve güç kaynakları bu gibi durumlarda besledikleri sistemin ihtiyaç duyduğu gücü karşılamada yetersiz kalmaktadır. Şarj seviyesinin çok düşük olduğu veya anlık aşırı güce ihtiyaç duyulduğu durumlarda düşük enerji süperkapasitörlerle yüksek güç yoğunluğuna dönüştürülerek sistemin yüksek güç ihtiyacı kısa bir süre için karşılanmaktadır. Bu çalışmanın amacı ihtiyaç duyulduğunda süperkapasitörleri kullanarak geleneksel elektrik depolama tekniklerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmaktır. Süperkapasitörlerin ihtiyaç duyduğu güç için gereken enerji mevcut bir pilden veya harici bir kaynaktan sağlanabilir. Bu çalışmada üretilen süperkapasitör için yıllardır kullanılmayan ve minimum enerjiye sahip bir araç aküsü ile bir cep telefonu aküsü kullanılmıştır. Süperkapasitörlerin avantajlı özellikleri göz önünde bulundurularak yedek güç ünitesi olarak adlandırılabilen bir süperkapasitör imal edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada (fiziksel ölçüm), üretilen süperkapasitör sayesinde örnek bir bataryadaki güç yoğunluğu 1217 W/kg 'den 7636 W/kg değerine çıkarılmıştır. Bu şekilde süperkapasitör kullanılarak güç yoğunluğunda 5.27 kat artış sağlanmıştır. Aynı batarya için süperkapasitör ile tepe akımı 15 A 'den $264,7 \text{ A}$ değerine çıkarken, tepe akımında 16.64

kat kazanç sağlanmıştır. Deneyisel sonuçlara göre süperkapasitörlerin düşük i direnç, çok yüksek tepe akımlarına ulaşabilme, yüksek şarj-deşarj çevrimlerine sahip olma, düşük sıcaklıklarda bile kapasite kaybı yaşamama gibi üstün özellikleri sayesinde elektrokimyasal depolama yöntemlerinin zayıf yönlerini aştığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Süperkapasitör, elektrokimyasal enerji depolama, g yđunluđu, enerji yđunluđu



Republic of Türkiye

Bitlis Eren University Graduate School

Department of Electrical and Electronics Engineering

**DEVELOPMENT OF A SUPERCAPACITOR-FED, SHORT-TERM
INSTANTANEOUS BACKUP POWER SYSTEM**

Master's Thesis

Kenan SEZGİN

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Sait CENGİZ

February 2025

ABSTRACT

Batteries and power supplies are used to store electrical energy. These sources have lower power densities than supercapacitors. In electrochemical storage methods, serious performance losses are observed due to reasons such as slowing down the chemical reaction rates at low temperatures and increasing chemical viscosities inside them. Batteries and power supplies with this structure are insufficient to meet the power required by the system they feed in such cases. In cases where the charge level is very low or when instantaneous excessive power is needed, low energy is converted to high power density with supercapacitors and the high power requirement of the system is met for a short time. The aim of this study is to eliminate the disadvantages of traditional electrical storage techniques by using supercapacitors when needed. The energy required for the power required by supercapacitors can be provided from an existing battery or an external source. In this study, a vehicle battery that has not been used for years and has minimum energy and a mobile phone battery were used for the supercapacitor produced. A supercapacitor that can be called a backup power unit was manufactured considering the advantageous features of supercapacitors. In the experimental study (physical measurement), the power density in a sample battery was increased from 1217 W/kg to 7636 W/kg thanks to the supercapacitor produced. In this way, a 5.27-fold increase in power density was achieved by using the supercapacitor. For the same battery, the peak current increased from 15 A to 264.7 A with the supercapacitor, and a 16.64-fold gain in peak current was achieved. According

to the experimental results, it is seen that supercapacitors overcome the weaknesses of electrochemical storage methods thanks to their superior features, such as low internal resistance, the ability to reach very high peak currents, having high charge-discharge cycles, and not experiencing capacity loss even at low temperatures.

Keywords: Supercapacitor, electrochemical energy storage, power density, energy density



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve yazmış olduğum tezin tüm aşamalarında gösterdiği destek ve yardımlarından dolayı değerli tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ hocama, değerli meslektaşım Kasım ÖNAL'a, Güroymak Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi ailesine ve desteğini benden asla esirgemeyen fedakâr eşime teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
KISALTMALAR	XII
SİMGELER.....	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Enerji Depolamanın Önemi	3
1.3. Kondansatörler	4
1.3.1. Tanımı ve İşlevi	5
1.3.2. Çalışma Prensibi	6
1.3.3. Kondansatörlerde Enerji Depolama Sistemi.....	7
1.4. Kondansatör Çeşitleri.....	7
1.4.1 Seramik Kondansatörler.....	7
1.4.2. Elektrolitik (Alüminyum) Kondansatörler	8
1.4.3. Tantal Kondansatör	8
1.4.4. Mika Kondansatör	9
1.4.5. Trimer Kondansatör	9
1.4.6. Güç Kondansatörleri.....	9
1.4.7. Süperkapasitörler.....	10
1.5. Elektrokimyasal Depolama Yöntemleri.....	13
1.5.1. Kurşun Asit Aküler	13
1.5.2 Nikel Kadmiyum Bataryalar (NiCd).....	14
1.5.3. Nikel Metal Hibrit Bataryalar (NiMH)	15
1.5.4. Lityum (Li-ion) Bataryalar	15
1.5.6. Akışkan Bataryalar	16
1.5.7. Sodyum Sülfür Bataryalar (NaS)	17
1.5.8. Sodyum Nikel Klorid Bataryalar ($NaNiCl_2$)	17

1.6. Süperkapasitörlerin Elektrokimyasal Depolama Yöntemleri İle Karşılaştırılması	17
1.7. DC-DC Dönüştürücüler.....	20
1.7.1. DC-DC Buck Dönüştürücü (Düşürücü)	20
1.7.2. DC-DC Boost Dönüştürücü(Yükseltici)	20
1.7.3. DC-DC Buck Boost Dönüştürücü (Düşürücü-Yükseltici)	21
1.8. DC Motorlar	21
1.8.1. Marş Motoru	21
2. MATERYAL VE YÖNTEM	23
2.1. Sistemin Tasarlanması	23
2.2. Sistemin Genel Yapısı.....	24
2.3. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	25
2.3.1. Süperkapasitörler ve Denge Kartı.....	25
2.3.2. DC-DC Yükseltici.....	30
2.3.2.1. 250 W DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül.....	30
2.3.2.2. MT3608 28V 2A DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül	32
2.3.2.3. 4A XL6009 DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül	33
2.3.3. Röle	34
2.3.4. Diyot.....	36
2.3.5. Dijital DC Voltmetre Ampermetre.....	36
2.3.6. Born Klemens (100 A)	37
2.3.7. İki Yollu Mini Anahtar	37
2.3.8. KCD1 On-Off Anahtar	38
2.3.9. IC-186 Buton	38
2.3.10. Akım Sınırlayıcı Elemanlar	39
2.3.11. Daralan Makaron.....	42
2.3.12. Soğutucu Panel	42
2.3.13. DC Barrel Jak	43
2.3.14. Sigorta ve Yuvası (12mm Sigorta Yuvası)	43
2.3.15. USB Type-C Konnektör	44
2.3.16. Akü Maşası ve Bağlantı Kabloları	44
2.4. Yedek Güç Ünitesi Dış Tasarımı	45
2.5. Devre Şeması ve Sistemin Tanıtılması	46

2.6. Tasarlanan Sistemin Çalışma Prensibi	48
2.7. Yedek Güç Ünitesinin Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması.....	50
2.8. Ters Bağlantı Koruması	50
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
3.1. Düşük Güç Yoğunluğunun, Yüksek Güç Yoğunluğuna Dönüştürülmesi	51
3.2. Süperkapasitörlerin Şarj Edilmesi.....	53
3.3. Yedek Güç Ünitesinin 250 W DC-DC Yükseltici Üzerinden Şarj Edilmesi .	54
3.4. Sistemin Type-C Giriş Üzerinden Cep Telefonu Şarjı İle Şarj Edilmesi.....	55
3.5. Yedek Güç Ünitesinin Test Edilmesi.....	56
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kondansatörün iç yapısı ve sembolleri	5
Şekil 1.2. Şarjlı kondansatörde elektrik yükleri	7
Şekil 1.3. Seramik kondansatör	8
Şekil 1.4. Elektrolitik kondansatör	8
Şekil 1.5. Değişik tipte tantal kondansatörler	8
Şekil 1.6. Mika kondansatör	9
Şekil 1.7. Trimer kondansatör	9
Şekil 1.8. Güç kondansatörü	9
Şekil 1.9. Enerji depolama cihazlarının enerji ve güç yoğunlukları (Ragone Grafiği) ..	11
Şekil 1.10. Süperkapasitör yapısı	11
Şekil 1.11. 2.7 V 500 F Süperkapasitör	12
Şekil 1.12. Kurşun asit akü	14
Şekil 1.13. NiCd batarya	14
Şekil 1.14. NiMH batarya	15
Şekil 1.15. Li-ion batarya	16
Şekil 1.16. Akışkan bataryanın yapısı	16
Şekil 1.17. NaS bataryanın yapısı	17
Şekil 1.18. Farklı kapasitörlerin ve 18650 – 2500 mAh bataryaya ait enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması	18
Şekil 1. 19. Temel DC-DC düşürücü devre	20
Şekil 1.20. Temel DC-DC yükseltici devre	21
Şekil 1.21. Temel DC-DC düşürücü yükseltici devre	21
Şekil 1.22. İçten yanmalı motorlarda kullanılan marş motoru	22
Şekil 2.1. Yedek güç ünitesinin genel diyagramı	24
Şekil 2.2. Süperkapasitörler ve denge kartı	25
Şekil 2.3. Kapasite ölçüm grafiği	26
Şekil 2.4. Eşdeğer Seri Direnç (ESR) hesaplama grafiği	27
Şekil 2.5. Sızıntı akımı grafiği	28
Şekil 2.6. Kendi kendine deşarj grafiği	28
Şekil 2.7. EDLC süperkapasitör çevrim ömrü test grafiği	28
Şekil 2.8. Sistemde kullanılan 250 W DC-DC yükseltici devre	30
Şekil 2.9. 250 W DC-DC yükseltici devre şeması	31

Şekil 2.10. MT3608 DC-DC yükseltici devresi	32
Şekil 2.11. MT3608 DC-DC yükseltici devre şeması	33
Şekil 2.12. XL6009 DC-DC yükseltici devre	33
Şekil 2.13. XL6009 DC-DC Yükseltici devre şeması	34
Şekil 2.14. 12 V - 200 A güç rölesi.....	35
Şekil 2.15. 12 V - 10 A röle.....	35
Şekil 2.16. Yedek güç ünitesinde kullanılan diyotlar ve diyot sembolü	36
Şekil 2.17. Yedek güç ünitesinde kullanılan dijital voltmetre-ampermetre.....	36
Şekil 2.18. Born klemens	37
Şekil 2.19. İki yönlü mini anahtar ve sembolü	38
Şekil 2.20. On-Off anahtar ve sembolü	38
Şekil 2.21. Yedek güç ünitesinde kullanılan buton ve sembolü.....	39
Şekil 2.22. Yedek güç ünitesinde kullanılan süperkapasitörlere ait eşdeğer devre	40
Şekil 2.23. Süperkapasitör ESR + akım sınırlayıcı direnç eşdeğer devresi	41
Şekil 2.24 2.2 Ω 100 W direnç.....	41
Şekil 2.25. PTC	42
Şekil 2.26. Daralan Makaron	42
Şekil 2.27. Yedek güç ünitesinde kullanılan soğutucu panel.....	43
Şekil 2.28. DC Barrel Jak	43
Şekil 2.29. Sigorta yuvası ve cam sigorta.....	44
Şekil 2.30. USB Type-C konektör.....	44
Şekil 2.31. Akü maşası ve kablosu	44
Şekil 2.32. Yerleşim krokisi (üstten ve arkadan görünüm)	45
Şekil 2.33. Dış tasarımın hazırlanmasına ait resimler	45
Şekil 2.34. Yedek güç ünitesinin devre şeması.....	46
Şekil 2.35. Yedek güç ünitesinin üstten görünüşü ve tanıtılması.....	47
Şekil 2.36. Sistemin arkadan ve bitmiş görünüşü	47
Şekil 2.37. Sistemin iç görünüşü	48
Şekil 3.1. 3x18650 batarya ile 14.5 V 83 F süperkapasitörün güç yoğunluğu ve tepe akımlarının karşılaştırılması	52
Şekil 3.2. Süperkapasitörün beklemede deşarj kayıpları	53
Şekil 3.3. 250W DC-DC yükseltici devreye ait giriş çıkış gerilimi grafiği.....	54
Şekil 3.4. Yedek güç ünitesinin araç üzerinde test edilmesi	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1. Benzinli motorlarda motor hacmine göre katalog, teorik ve deneysel değerler.....	22
Tablo 2. 1. Enerji depolama ürünlerinin karakteristik özellikleri	26
Tablo 2. 2. Üretici firmaya ait süperkapasitörlerin karakteristik özellikleri	40



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
AGM	: Emdirilmiş Cam Elyaf Akü
DC	: Doğru Akım
EDL	: Elektrikli Çift Katman
EDLC	: Elektrikli Çift Katmanlı Kapasitör
EFB	: Geliştirilmiş Sulu Akü
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
ESR	: Eşdeğer Seri Direnç
NC	: Normalde kapalı kontak
NO	: Normalde açık kontak
PTC	: Pozitif Katsayılı Direnç
RF	: Radyo Frekansı
SLI	: Start-Stop, Işık, Ateşleme
SMD	: Yüzey Montajlı Komponent

SİMGELER

ε_0	: Hava boşluğu sabiti
ε_r	: Dielektrik sabiti
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
μF	: Mikrofarad
Ah	: Amper-saat
C	: Kapasite
F	: Farad
I	: Akım
J	: Joule
L	: Litre
Q	: Elektrik yükü
T	: Sıcaklık
V	: Gerilim
W	: Watt
Wh	: Watt saat
Ws	: Watt saniye
g	: Gram
kF	: Kilofarad
kg	: Kilogram
mAh	: Mili amper saat
mF	: Milifarad
nF	: Nanofarad
pF	: Pikofarad
s	: Saniye
sa	: Saat

1. GİRİŞ

Teknolojide meydana gelen çok hızlı gelişmelerle birlikte, teknolojik aletler her geçen gün yaşantımızda daha fazla yer almaktadır. Bu cihazların birçoğu bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bu tür sistemler ihtiyaç duyduğu enerjiyi, genelde elektrokimyasal yöntemlerle elektrik enerjisini depolayan bir kaynaktan karşılamaktadır. Kablosuz cihazların ve özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, elektrik enerjisini depolamanın önemi her geçen gün artmaktadır.

Dünya nüfus artış hızına bağlı olarak günlük hayatımızda ihtiyacımız olan enerjide meydana gelebilecek kesintiler nedeniyle, aksaklıkların yaşanmaması için enerji depolama sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalar önemli ölçüde ivme kazanmıştır. Enerji depolama sistemleri farklı işlevlerle üretim süreçlerine katkıda bulunsada, esas amaçları enerjiyi depolamak ve sistemin esnekliğini sağlamaktır [1].

Elektrik enerjisini hiçbir kimyasal tepkimeye sokmadan direkt depolayan yöntemler kondansatörler ve süper iletken manyetik enerji depolama (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES) sistemleridir. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi (SMES), elektrodinamik ilkelerine göre çalışır [2]. Bu sistemler maliyetlerinin yüksek olması, boyutlarına göre kapasitelerinin az olması gibi nedenlerden dolayı sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Geleneksel kondansatörlerin kapasitelerinin kısıtlı olması, enerji depolanma sistemlerinde kullanılmalarına engel olmaktadır. Süperkapasitörlerle bu kapasite sorunu kısmen aşılmış olsa da halen yeterli değildir. 1957 yılında ilk süperkapasitör patenti General Elektrik tarafından alınmıştır [3]. Süperkapasitörlerle ilgili gelişmeler XX. Yüzyılın sonlarına doğru hızlanmıştır. Bunun yanında elektrik enerjisini depolamak için en fazla kullanılan yöntem elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolamaktır. Elektrokimyasal yöntemle üretilen depolama cihazları piller, birden fazla pilin bir araya getirilmesi ile oluşturulan bataryalar ve akülerdir. Halen bu depolama yöntemleri çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Süperkapasitörler düşük enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle elektrokimyasal depolama yöntemlerinin yerini alamamaktadır. Fakat sahip oldukları yüksek güç yoğunlukları sayesinde büyük tepe akımlarını çok rahat bir şekilde karşılayabilmektedirler. Buda süperkapasitörleri elektrokimyasal depolama türlerine göre üstün kılmaktadır. Aslında süperkapasitörler geleneksel pillerin veya akülerin

eksik yönlerini çok rahat tamamlayacak özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri süperkapasitörleri batarya veya akülerle yapılacak depolama sistemleriyle birleştirilerek daha üstün özelliklere sahip bir depolama sistemi yapılabilmesini mümkün kılacaktır.

Kondansatörlerin kapasite sorunu büyük miktarda aşılmış olsa dahi bataryalar ve akülere kıyasla halen sınırlı kalmaktadır. Ancak günümüzde yaygınlaşmaya başlayan süperkapasitörler çok yüksek şarj-deşarj döngüsüne sahip olmaları, saniyeler içinde şarj edilebilmeleri, tepe akımlarının yüksek olmaları, kısa devreye maruz kalması durumunda daha az sorun çıkarmaları, kolay şarj edilebilmeleri, ortam sıcaklığından etkilenmemeleri veya aşırıdeşarj edilmelerinde bir sorun teşkil etmemesi gibi öne çıkan özellikleriyle gelecek vaat etmektedir.

Özellikle yüksek güç gerektiren elektrikli makine ve cihazların ihtiyaçlarını karşılamak için büyük kapasiteli batarya ve aküler kullanılmaktadır. Elektrik motorları gibi ilk hareket esnasında normalden daha fazla akım çeken cihazlarda bu sorun daha da artmaktadır. Elektrik motorları kalkış esnasında sistemden nominal yükte çektikleri akımın 4-8 katına kadar akım çekebilmektedir. Bu büyük akımları karşılayabilmek için büyük kapasite değerlerine sahip akü veya bataryalar kullanılması zorunludur. Ancak bu akımlar kısa süreli yüklerdir. Elektrokimyasal depolama yöntemine sahip batarya ve aküler yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen güç yoğunları süperkapasitörlere oranla daha düşüktür. Son zamanlarda yaygınlaşmaya başlayan süperkapasitörler sahip oldukları yüksek güç yoğunlukları sayesinde geleneksel depolama yöntemlerinin bu açığını kapatmada önemli yere sahip olmaya başlamıştır. Çok yüksek tepe akımları sayesinde sistemlerin ihtiyacı olan büyük güçleri kısa süreliğine karşılamada oldukça başarılıdır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı; süperkapasitörlerin geleneksel elektrik depolama yöntemlerinin yerini almasından ziyade onların eksik yanlarını tamamlamak ve gerektiğinde yardımcı bir güç kaynağı olarak kullanıldığında ortaya çıkacak verileri değerlendirmektir. Elektrokimyasal depolama yöntemleri uzun süre kullanılmadıklarındadeşarj olmakta, şarjdeşarj döngüleri arttıkça ve zamanla yaşanan bazı kimyasal olaylardan dolayı kapasite kayıpları yaşanmaktadır. Elektrokimyasal depolama yöntemlerinde düşük sıcaklıklarda kapasitör içindeki kimyasalların reaksiyon hızları düştüğünden ciddi oranda kapasite kayıpları yaşanmaktadır [4]. Bu gibi

durumlarda besledikleri bataryaların gereksinim duydukları gücün başka bir kaynaktan sağlanması gerekebilir. Özellikle içten yanmalı motorlarda kullanılan kurşun asit akülerde sık karşılaşılan bu gibi durumlar için bir süperkapasitörün geliştirilmesi yararlı olacaktır. İçten yanmalı motorlarda motorların ilk hareketi bir DC motor tarafından sağlanır. Bu motorlar ilk çalışma esnasında sistemden çok yüksek akım çekerler [5]. İlk çalışma esnasında ihtiyaç duyulan akım bir yedek güç tarafından yani akü tarafından sağlanır. Akülerde değişik nedenlerden kaynaklanan kapasite kayıplarında motorların çalıştırılması için genelde harici bir kaynaktan takviye işlemi yapılır. Akü takviye işlemi gücü zayıflayan bir aküyü, başka bir kaynaktan besleyerek ihtiyaç duyulan gücü karşılama işlemidir [6]. Ancak güç ihtiyacı her koşulda sağlanmayabilir.

Bu çalışmada tasarlanan süperkapasitör sayesinde (bundan sonraki kısımlarda “yedek güç ünitesi” olarak adlandırılacaktır), bu ve buna benzer elektriksel cihazların ihtiyaç duyduğu gücü, güvenli bir şekilde karşılayabilecek bir süperkapasitör amaçlanmıştır. Yedek güç ünitesi birkaç farklı yöntemle şarj edilebilecektir. Bu şarj yöntemlerinden biri bir DC-DC yükseltici devresi kullanılarak belirli sınırlar içerisinde, şarj seviyesi düşük bir aküden beslenerek kapasitörlerin şarj edilmesidir. Yedek güç ünitesi içinde yer alan süperkapasitörler, kapasitesi yetersiz akülerden şarj edilerek akünün veya bataryanın içinde yer alan yüksek enerji ve düşük güç yoğunluğunu, düşük enerji yüksek güç yoğunluğuna dönüştürerek sistemlerin marş akımı gibi kısa süreli ihtiyacı olan yüksek akımları karşılayabilecektir. Ayrıca akülerin çok zayıflaması durumunda harici bir kaynaktan veya uygun bir cep telefonu şarj aletinden şarj edilerek kullanılabilir. Yedek güç ünitesinde yer alan ters beslemenin önlenmesi sayesinde, yanlış bağlantı gibi nedeniyle bağlanılan cihazda elektronik elemanların arızalanması önlenebilir. Tasarlanan yedek güç ünitesi (süperkapasitör) özellikle içten yanmalı motorların ilk hareketini sağlayan DC motorların ihtiyacı olan yüksek akımları sağlayabilmek için kullanılacaktır.

1.2. Enerji Depolamanın Önemi

Yeryüzünde enerji talebi gün geçtikçe daha fazla artış göstermektedir. Bu enerji gereksiniminin önemli bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Enerji üretiminin hızı, tüketim hızının gerisinde kalmaktadır. Dünyamızdaki fosil yakıtlar sınırlıdır ve hızla tükenmektedir [7]. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi hızla artmaktadır [8]. Son zamanlarda ülkemizde ve dünyada yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi doğa koşullarına bağımlı

olduğundan enerji üretimi de sürekli kesintilere uğramaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin verimliliğinin artırılabilmesi için depolanması son derece önemlidir. Dolayısıyla hayatımızda yaygınlaşan kablosuz elektrikli cihazlar ve elektrikli arabalar, elektrik enerjinin depolanmasıyla ilgili çalışmaların hız kazanmasını sağlamaktadır. Elektrik enerjisini en hızlı, en güvenli ve en verimli şekilde depolamak için birçok çalışma yapılmaktadır [9].

Elektrik enerjisini depolamada yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri elektrik enerjisini doğrudan depolayan kondansatörler diğeri ise elektrik enerjisini birtakım kimyasal tepkimelerden geçirerek depolayan farklı türlerdeki elektrokimyasal depolama sistemlerine sahip pil, batarya ve akülerdir [9].

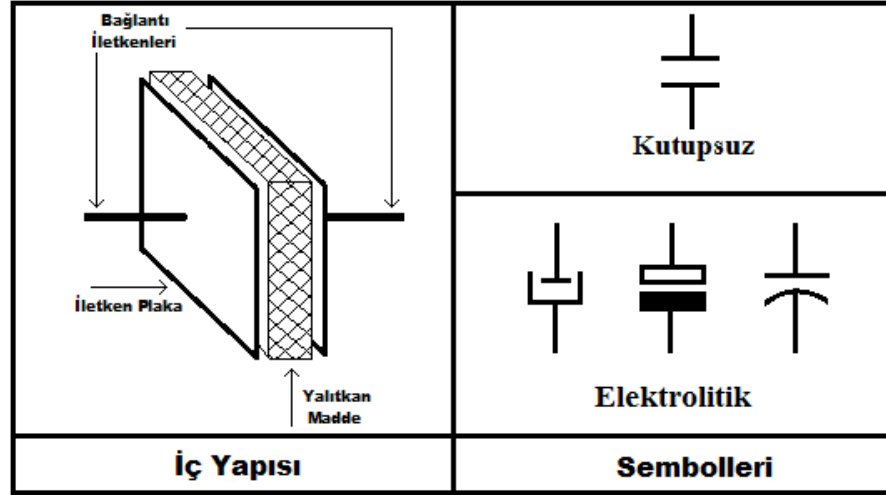
1.3. Kondansatörler

İki iletken levha arasına bir yalıtkan bırakarak, insanlığın icat ettiği kondansatörler, sanayide çok geniş kullanım alanına ulaşmış ve dünyada büyük bir pazar haline gelmiştir. Günümüzde temel yapı olarak teknolojik gelişmelerden fazla etkilenmeyen bu devre elemanların temel yapılarından öte boyutları ve kapasitelerinde değişiklikler olmuştur [10], [11].

Kondansatörler, elektrik ve elektronik devrelerde sıkça kullanılan temel bileşenlerden biridir ve aynı zamanda kapasite, kapasitör veya sığaç gibi isimlerle de bilinir. İlk kez 18. yüzyılda geliştirilen bu cihaz, günümüzde elektrik ve elektronik teknolojisinin ayrılmaz bir parçası olarak kullanılmaktadır. İlk kondansatör, 1745 yılında Hollandalı bilim adamı Pieter Van Musschenbroek tarafından keşfedilmiştir. Musschenbroek “Leyden kavanozu” diye adlandırdığı deney düzeneğinde su veya cıva dolu cam kavanozun içi metal yüzeyle kaplanmış bu yüzey bir metal iletken ile kavanozun kapağına bağlanmıştır. Kavanozun dış yüzeyi de metalle kaplanmıştır. Bu kavanoz hızlı bir şekilde döndürüldüğünde elektrik yükü biriktiği görülmüştür. Bu gelişmeyi takiben, Alman fizikçi Von Helmholtz, 1853 yılında elektrik yüklerinin yalnızca elektrot yüzeyinde değil, aynı zamanda elektrot ve elektrolit ara yüzeyinde de birikebileceğini öne sürmüştür. Helmholtz’un teorisine göre, elektrot üzerindeki yüklerle zıt yükler, elektrot-elektrolit ara yüzeyinde atomik ölçekli bir mesafede yer alır [12].

1.3.1. Tanımı ve İşlevi

Kondansatör en basit tanımı ile iletken iki plaka arasına dielektrik adı verilen bir yalıtkan madde yerleştirilerek veya sadece hava boşluğu bırakılarak elde edilen, elektrik yükünü doğrudan, elektrostatik olarak depo eden devre elemanlarıdır [13]. 18. yüzyılda icat edilip geliştirilmeye başlanan bu bileşen, günümüzde teknolojinin gelişiminde önemli bir rol oynayarak elektrik ve elektronik devrelerin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Kondansatörün elektrik yüklerini depolayabilme özelliğine kapasite denir. Elektrik devrelerinde C harfi ile gösterilir ve birimi faraddır (F). Pratikte, farad oldukça büyük bir birim olduğundan, genellikle daha küçük alt birimleri tercih edilir. Bunlar, pikofarad (pF), nanofarad (nF), milifarad (mF), mikrofara (d) (μF) şeklindedir. Şekil 1.1’de kondansatörün iç yapısı ve sembolleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Kondansatörün iç yapısı ve sembolleri

Kondansatör uçlarına bir kaynaktan gerilim uygulamaya başlandığı anda şarj olmaya başlar. Şarj işlemi tamamlanana kadar kondansatör uçlarında giderek azalan bir I_c akımı geçer. Kaynak gerilimi ile kondansatör gerilimi eşitlenince, şarj tamamen gerçekleşir ve bu akım kesilir [14].

Kondansatörün uçlarına bir gerilim farkı uygulandığında devreden akım geçmeye başlar. Ancak uçlar arasındaki gerilim sabit kalırsa, kondansatör bir süre sonra tamamen dolar ve akım geçişi durur. Şarj olmuş ve akım geçirmeyen bir kondansatörün uçlarındaki gerilim değiştirildiğinde ise devreden yeniden akım geçer. Bu nedenle, kondansatörün akımı, uçlarına uygulanan gerilimdeki değişimle doğrudan ilişkilidir. Doğru gerilimde boş bir kondansatör kısa devre gibi dolu bir kondansatör ise açık devre gibi davranmaktadır. Alternatif akımda ise kondansatörler devreden sürekli akım çeken

bir yük özelliği taşımaktadır. Kondansatörlerin alternatif akıma karşı gösterdikleri direnç kapasitif reaktans denir ve frekansla ilişkilidir. Frekans arttıkça kapasitif reaktans azalır [15].

Kondansatörler, elektrik ve elektronik devrelerde oldukça önemli rol oynayan temel bileşenlerdir. Temel işlevleri elektrik enerjisi depolamak olan kondansatörler, elektrik yüklerini geçici olarak saklama kapasitesine sahiptir. Bu, birçok elektronik uygulamada büyük bir avantaj sağlar. Bir gerilim kaynağına bağlandığında, kondansatör enerjiyi depolar ve bu enerji daha sonra devre üzerindeki diğer bileşenlere veya yüklere sağlanabilir. Örneğin, kondansatörler, elektronik cihazların başlatılmasında anlık bir enerji darbesi gerektiğinde kullanılırlar [16].

Kondansatörler aynı zamanda elektrik sinyallerini geçirme, zamanlama devreleri, filtreleme, reaktif güç düzeltilmesi ve faz kaydırma gibi birçok elektronik işlemde de kullanılır. Özellikle endüstriyel sistemlerde, kondansatörler enerji dalgalanmalarını düzelter ve güç faktörünü iyileştiren önemli bileşenlerdir.

1.3.2. Çalışma Prensipleri

Kondansatörler, elektrik yüklerini içlerindeki iletken plakalara doğrudan yükleyerek elektrik enerjisini elektrostatik olarak depolayan ve istenildiğinde bu enerjiyi kullanmamızı sağlayan bir enerji depolama elemanıdır. Kondansatörlerde kapasite Denklem 1.1 ile hesaplanır [17].

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.1)$$

Burada;

C = Kapasite (Farad)

ϵ_r = Dielektrik malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği,

ϵ_0 = Boşluğun yalıtkanlık sabiti ($8,85 \cdot 10^{-12} F/m$)

A = Plakaların yüzey alanı (m^2)

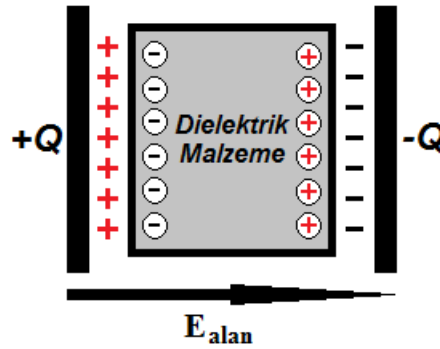
d = Plakalar arasındaki mesafe (m)

Denklem 1.1'den görüldüğü üzere kondansatör kapasitesi, plakaların yüzey alanı, plakalar arasındaki mesafeyle, aradaki boşluğun yalıtkanlık sabiti ile ve plakalar arasındaki yalıtkan maddenin cinsi ile ilişkilidir. Levhaların yüzey alanı arttıkça, kondansatörün kapasitesi yükselir. Diğer yandan, levhalar arasındaki boşluğun artması kapasitenin azalmasına yol açar. Ayrıca, levhalar arasındaki dielektrik maddenin

katsayısı arttığında kapasite de doğru orantılı olarak artar. Kapasite değeri büyüdükçe, kondansatörün fiziksel boyutları da genellikle büyür.

1.3.3. Kondansatörlerde Enerji Depolama Sistemi

Süperkapasitörlerin ve geleneksel kondansatörlerin enerji depolama mekanizması, temelde aynı özelliklere sahiptir [18]. Kapasitif olarak enerji depolama yöntemi, elektrik enerjisinin kapasitör yada kondansatör adı verilen bir sistemde tutulduğu en yaygın elektrik enerjisi depolama biçimlerinden biridir. Bir kondansatörün iç yapısı Şekil 1.2.'de gösterilmektedir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, kondansatör, dielektrik adı verilen bir yalıtkanla ayrılmış iki iletken levhadan oluşur [19].



Şekil 1.2. Şarjlı kondansatörde elektrik yükleri

Terminaller arasına elektrik potansiyeli uygulandığında, cihaz içindeki elektrik yükleri uygulanan potansiyelin polaritesine göre plakaların yakınında birikmeye başlar ve bu şekilde kondansatörün içinde bir elektrik alanı oluşur. Plakalarda biriken net elektrik yükü (Q) ve buna karşılık gelen elektriksel potansiyel fark (V), denklem (1.1) 'de kapasite (C) adı verilen parametre ile ilişkilidir [20]. Kondansatörlerde genel kapasite denklemi Denklem 1.2'de verilmiştir.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1.2)$$

1.4. Kondansatör Çeşitleri

1.4.1 Seramik Kondansatörler

Ses ve radyo frekansı devrelerinde kullanılır. Mercimeğe benzedikleri için piyasada mercimek kondansatör olarak bilinirler. Dayanma gerilimleri yüksek, kapasiteleri stabil, kutupsuz kondansatörlerdir. Kapasiteleri pF ile μF 'da kadar değişiklik gösterir. Ucuz olmaları ve yüksek dayanma gerilimleri nedeniyle sıkça tercih edilirler [21]. Şekil 1.3'te seramik kondansatör gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Seramik kondansatör

1.4.2. Elektrolitik (Alüminyum) Kondansatörler

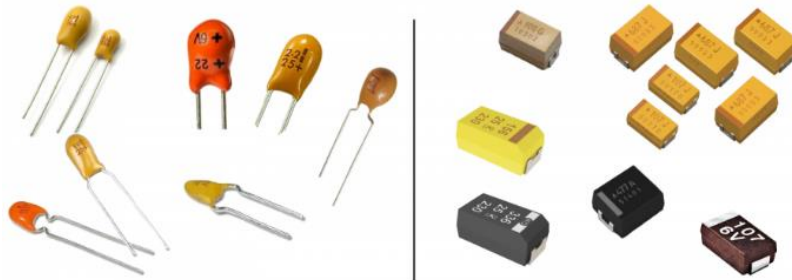
Kutuplu kondansatör olarak bilinirler, yüksek kapasite değerlerine sahiptirler ve genelde silindirik yapıda üretilirler. Güç elektroniği devrelerinde sıklıkla kullanılırlar, çalışma frekansları düşüktür. SMD (yüzey montajlı) veya through-hole (plaket montajlı) çeşitleri mevcuttur [22]. Şekil 1.4’te elektrolitik kondansatörler gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Elektrolitik kondansatör

1.4.3. Tantal Kondansatör

Elektrolitik kondansatörler gibi kutuplu yapıdadır. Boyutları küçük, kapasiteleri yüksek, sızıntı akımları düşüktür. Bu kapasitörlerin ters gerilime dayanma toleransları çok küçüktür, akım veya gerilim dalgalanmalarına maruz kaldıklarında veya yüksek frekans uygulandığında patlayabilirler. Düşük maliyetli tantal kondansatörler de SMD ve standart tipte üretilirler [23]. Şekil 1.5’te değişik tipte tantal kondansatörler gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Değişik tipte tantal kondansatörler

1.4.4. Mika Kondansatör

Günümüzde çok fazla kullanılmamaktadır, yüksek kararlılık ve yüksek frekanslarda çalışabilirler, boyutları seramik kondansatörlere kıyasla büyüktür. Kararlılıklarının yüksek olmasından dolayı özellikle kalibrasyon cihazlarında ve radyo frekansı devrelerde kullanılırlar [24]. Kapasiteleri en fazla 1000 pF civarındadır. Şekil 1.6'da mika kondansatör gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Mika kondansatör

1.4.5. Trimer Kondansatör

Ayarlı kapasiteye sahip kondansatörlerdir. Elektronik derelerde cihazların kalibrasyonu ve frekans ayarlı devrelerde kullanılırlar. Hassasiyet ve toleransları oldukça düşük olduğundan deneysel devrelerde sıklıkla tercih edilirler [25]. Şekil 1.7'de trimer kondansatör gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Trimer kondansatör

1.4.6. Güç Kondansatörleri

Özellikle büyük tesislerde güç katsayısını düzeltmek için kurulan, kompanzasyon sistemlerinde endüktif yükleri dengelemek için kullanılırlar [26]. Tek fazlı ve 3 fazlı olmak üzere farklı kapasitelerde üretilerek, reaktif güç kontrol röleleri ile birlikte sistemlerin ihtiyaçlarını karşılarlar. Şekil 1.8'de güç kondansatörü gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Güç kondansatörü

1.4.7. Süperkapasitörler

Süperkapasitör, elektrikli çift katmanlı kapasitör (Electrical Double Layer Capacitor-EDLC)) yapıya sahip yüksek güç yoğunluğuna sahip bir kapasitör türüdür. Süperkapasitörlerde enerji depolanırken kimyasal bir tepkime gerçekleşmez, depolama tamamen elektrostatiktir [27].

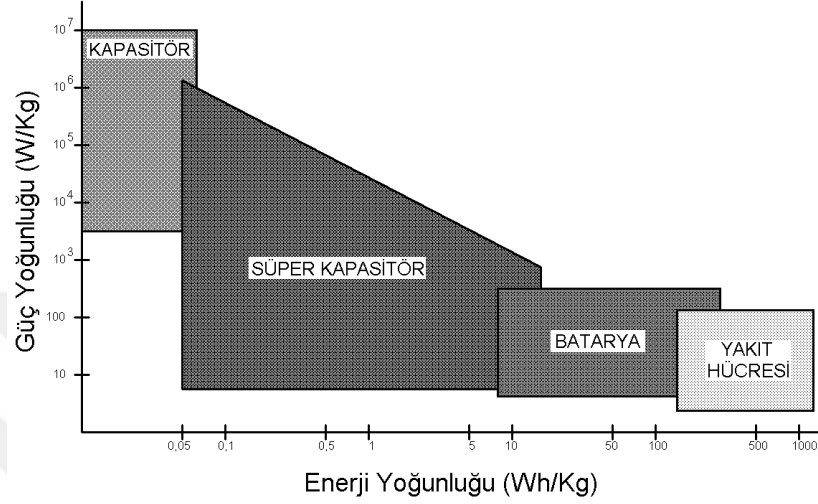
EDLC, yapıya sahip süperkapasitörlerde birim hacim başına geniş yüzey alanı oluşturulduğundan, kapasite çok yüksek olur. Kullanılan malzemelerden kaynaklı süperkapasitörlerin dayanma gerilimleri çok düşüktür. Çok düşük eşdeğer seri direnç (ESR) değerlerine sahiptirler [28].

Süperkapasitörler, süper kondansatör, ultra kondansatör, ultra kapasitör ismiyle de anılır. Kapasiteleri mF 'lardan, 12 kF (12000 F)'a kadar çıkabilir. Bu yüksek kapasite değerlerine ulaşmak için geleneksel dielektrik malzemeler yerine, çift tabakalı dielektrik malzemeler kullanılır. Aktif karbon teknolojisi sayesinde geniş yüzey alanı oluşturularak yüksek kapasite değerlerine ulaşılır. Süperkapasitörler ilk zamanlar şarj edilebilir bataryaların yerine kullanılmak üzere geliştirilmiştir ancak yüksek deşarj kayıpları nedeni ile bataryalarının yerini alamamıştır [29].

Kondansatörlerde kapasite iletken plakaların yüzey alanına, iletkenler arasındaki mesafeye ve iletkenler arasında kullanılan yalıtkanın cinsine bağlıdır. Plakaların yüzey alanı arttıkça kapasite artar, iletkenler arasındaki mesafe azaldıkça kapasite artar, iletkenler arasındaki yalıtkanın dielektrik katsayısı arttıkça kapasite artar. Süperkapasitörlerde kullanılan iletkenlerin kalınlıkları çok azdır, aktif karbon sayesinde yüzey alanı genişletilerek hacim azaltılmıştır. İletkenler arasındaki mesafe ise çok küçüktür, bu nedenle süperkapasitörlerin dayanma gerilimleri çok küçüktür. Yalıtkan malzeme olarak genellikle bir seperatörle ayrılmış çift katmanlı nanoteknolojik aktif karbon dielektrik malzeme kullanılır [29].

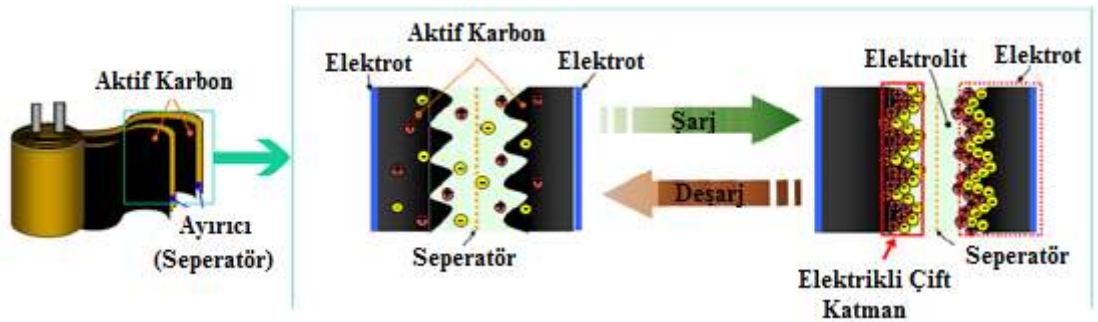
Süperkapasitörler elektrokimyasal depolama ürünlerine göre düşük enerji, yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Kısa süreli ani enerji gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler. Özellikle elektrikli arabalarda, elektrikli trenlerde, elektrikli otobüslerde (ani ivmelenme gerektiren durumlarda, rejeneratif frenlemede enerjinin geri kazanımı), elektrikli vinç, elektrikli forkliftler, rüzgar türbinlerinde, güneş enerjisi santrallerinde, depolama sistemlerinde yükü dengelemek için kullanımı tavsiye edilmektedir. Ayrıca çalışma sıcaklığı aralığı geniş olduğundan ortam sıcaklığından

fazla etkilenmediğinden, kullanım alanları geniştir [30]. Elektrokimyasal depolama yöntemleri, geleneksel kondansatörler ve süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunlukları yönünden karşılaştırıldığı Ragone grafiği Şekil 1.9'da verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere süperkapasitörlerin güç yoğunluğu elektrokimyasal depolama yöntemlerinden daha yüksektir.



Şekil 1.9. Enerji depolama cihazlarının enerji ve güç yoğunlukları (Ragone Grafiği)

Süperkapasitörler, geleneksel kondansatörler gibi bir yalıtkan ile ayrılmış iki iletken elemandan oluşan ve elektrik enerjisini doğrudan depolayan devre elemanlarıdır. Süperkapasitörler, genellikle organik maddeler veya sulu elektrolitlerle emdirilmiş aktif karbon bir yapı kullanılarak ve alüminyum iletken kollektörlerden oluşur. Bu yapıyı izole etmek için, geleneksel kondansatörlerde olduğu gibi iki elektrot arasına bir yalıtkan madde yerleştirilir [31]. Süperkapasitörlerin temel yapısı Şekil 1.10'da verilmiştir [32].



Şekil 1.10. Süperkapasitör yapısı

Süperkapasitörlerde enerji depolama mekanizması ve elektriksel çift tabaka kullanma fikri ilk kez 19. yüzyılın sonlarına doğru Alman fizikçi Helmholtz tarafından araştırılmıştır. Bundan yüzyıl sonra elektrik enerjisinin hızlı ve güvenli bir şekilde

depolanmasına olan ihtiyacın artması ile süperkapasitörler geliştirildi. Süperkapasitörlerin çalışma prensibi, geleneksel kondansatörlerin çalışma prensibinden farklı değildir. Süperkapasitörün uçlarına bir gerilim uygulandığında, yüklerin elektrostatik olarak depolanması, seri bağlı iki kondansatöre benzeyen iki katmanlı elektrot-elektrolitik ara yüzeyinde gerçekleşir. Bu sistem, her döngüde kusursuz şarj deşarj ve yüksek randıman sunmaktadır. Süperkapasitör uçlarına gerilim uygulandığında, çift katmanlı elektrotların elektrolitik ara yüzeylerindeki boşluk şarj bölgesini oluşturulur. Bu yapıya elektrikli çift katman (EDL) denir. Bundan dolayı, elektrik enerjisi elektrostatik olarak depolanır, elektrokimyasal depolama ürünlerinde olduğu gibi elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşmez [33], [34]. Şekil 1.11’de 2,7V 500F bir süperkapasitörün resmi görülmektedir.



Şekil 1.11. 2.7 V 500 F Süperkapasitör

EDLC süperkapasitör türlerindeki kapasite değeri geleneksel kapasitörlerle aynı şekilde Denklem 1.3 ile hesaplanmaktadır. “ ϵ_r ” elektriksel çift katmandaki bağlı dielektrik sabiti, “ ϵ_0 ” vakum sabiti (hava boşluğu için $\epsilon_0 = (8.854)10^{12}$), “A” elektrotun özgül yüzey alanı ve “d” elektriksel çift katmanın kalınlığını temsil etmektedir.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d} A \quad (1.3)$$

Gözenekli yapıları sayesinde çok yüksek yüzey alanı olan karbon bazlı malzemeler ile genellikle karbon içeren organik maddelerle (örneğin, odun, kömür, hindistancevizi kabuğu) yapılan elektrot yapıları sayesinde geleneksel kondansatörlerden çok daha yüksek yüzey alanına sahiptir [35]. Elektrotların yüksek yüzey alanları sayesinde çok yüksek kapasite değerlerine (1 ila 12 kF) ulaşabilirler. Süperkapasitörler kimyasal depolama sistemlerini tamamlayıcı bir depolama sistemidir.

Geleneksel kondansatörlerde olduğu gibi süperkapasitörler de seri veya paralel bağlanarak gerilim ve kapasite değerleri arttırılabilir.

Süperkapasitörler geniş elektrot yüzeyleri ile elektrolitik arasında oluşan ara yüzeyde oluşturulan elektrikli çift katmanı kullanarak elektrik enerjisini depolar. Elektrotlar, birim hacim başına yüksek yüzey alanına sahip olan ve kapasitörün enerji yoğunluğunu daha da artıran aktif karbondan yapılmıştır. EDLC, yapıya sahip süperkapasitörler elektrokimyasal reaksiyona girmeyen, çok hızlı şarj edilip, deşarj edilebilen ve daha uzun ömürlü olan depolama teknolojileridir [32]. Güç yoğunlukları yüksek olduğundan yüksek tepe akımlarını sağlamakta başarılıdırlar. Bu türden yüksek akımları sağlayan elektrokimyasal depolama sistemlerinde, bu akımların sürekliliği akü ve bataryalarda istenmeyen sıcaklık yükselmelerine ve işletme ömürlerinin kısılmasına neden olmaktadır [36].

1.5. Elektrokimyasal Depolama Yöntemleri

Elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri olarak yaygın bir şekilde pil, pillerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan bataryalar, değişik yapı ve kimyasallara sahip akü ve yakıt hücreleri kullanılmaktadır. Günümüzde elektrokimyasal enerji depolama alanında lityum-iyon, sodyum-sülfür, kurşun-asit, nikel-kadmiyum, metal-hava ve lityum metal Redox gibi çeşitli sistemler yaygın olarak tercih edilmektedir [37]. Bu sistemler elektrik enerjinin kimyasal tepkimeler sonucunda elektrokimyasal olarak depolandığı sistemlerdir. Bugün yaygın olarak kullanılan batarya kimyasalları, kurşun, nikel, sodyum ve lityum elektrokimyasına dayanmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle geliştirilen akışkan bataryalarda ise demir, krom ve vanadyum gibi elektrotlar kullanılmaktadır. Elektrik enerjisini depolayan batarya türleri, kendilerine özgü şarj deşarj ömrü, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, verimlilik gibi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı, batarya türlerinin çalışma, montaj, saklama koşulları farklılık göstermektedir [38].

1.5.1. Kurşun Asit Aküler

En eski batarya teknolojilerinden biri olan kurşun-asit aküler, katot için kurşun (Pb), anot için kurşun dioksit (PbO_2) elektrotlarından oluşur ve elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) içerir. Günümüzde en yaygın kullanılan akü türlerinden biri olmaya devam etmektedir. Özellikle araçlarda, SLI "Start-Stop, Lights, Ignition" (Başlatma, Işıklandırma, Ateşleme) fonksiyonlarını yerine getirmek için yaygın olarak

kullanılmaktadır. Günümüzde daha uzun çevrim ömrü ve daha yüksek güç yoğunluğu değerlerine sahip jel akü, EFB (Enhanced Flooded Battery) akü ve AGM (Absorbent Glass Mat) aküler kullanılmaktadır. Bu akülerin temel çalışma prensipleri aynı olmakla beraber yapılarında ve içlerinde kullanılan elektrolitiklerde farklılıklar bulunmaktadır [39]. Şekil 1.12’de kurşun asit akünün kesiti görülmektedir.



Şekil 1.12. Kurşun asit akü

1.5.2 Nikel Kadmiyum Bataryalar (NiCd)

Şarj edilebilen eski teknoloji bataryalardır. Nikel oksit hidroksit ve metalik kadmiyum elektrotlar kullanılır. Çıkış gerilimi ortalama 1,2 V’tur. Şarj döngüleri yüksektir. Kurşun asit akülere kıyasla daha pahalıdır. Kendi kendine deşarj kayıpları fazladır. Hafıza etkileri fazladır, yani tam deşarj edilmeden şarj edildiklerinde kapasiteleri zamanla azalır. Ağır metaller içerdiğinden çevresel atıkları fazladır. Medikal gibi bazı sektörlerde kullanımı yasaklanmıştır [40]. Şekil 1.13’te nikel kadmiyum bataryaya gösterilmiştir.



Şekil 1.13. NiCd batarya

1.5.3. Nikel Metal Hibrit Bataryalar (NiMH)

Bunlarda şarj edilebilir bataryalar olarak bilinir. Bu bataryalarda anot elektrot için NiOH kullanılmaktadır. NiCd bataryalara kıyasla kapasiteleri daha yüksektir. Enerji yoğunlukları 80 Wh/kg ile Li-İon bataryanın ortalama yarısı kadardır [41]. Yakın zamanda tüketici pazarında, şarj edilebilir elektrikli araçlarda lityum bataryalara göre avantajlı fiyatları nedeni ile tercih edilmekteydi ancak günümüzde lityum bataryalara olan talebin artması ile lityum bataryaların fiyatları azalmış ve performansları iyileştirilmiştir. Bu nedenle NiMH bataryalara olan rağbet azalmıştır. Şekil 1.14'te nikel metal hibrit batarya gösterilmiştir.



Şekil 1.14. NiMH batarya

1.5.4. Lityum (Li-ion) Bataryalar

Enerji ve güç yoğunlukları yüksektir. Uzun süre şarj edilmeden sahip oldukları enerjiyi muhafaza edebilirler, beklemede deşarj kayıpları düşüktür. Son zamanlarda uzay araçlarında, elektrikli araçlarda ve askeri amaçla üretilen araçlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan Li-ion bataryalar değişik türde kimyasal özelliklere sahiptir, farklı uygulamalarda maliyetinin üstün özelliklerine kıyasla makul seviyelerde olması ve güvenlik özelliklerinin iyileştirilmesi nedeniyle tercih edilmektedir [42].

Li-ion bataryalar 1980 yılında icat edilmiş ve 1990 yılından beri ticari olarak pazarda yerini almaya başlamıştır [43]. Li-ion batarya teknolojileri üzerinde yapılan çalışmalar performansları ve kapasiteleri üzerinde sürekli gelişmeler yaşanmasını sağlamıştır [44].

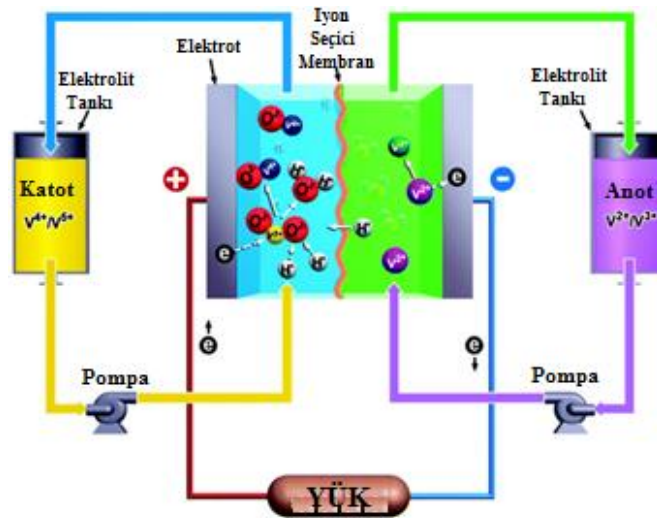
Sahip oldukları yüksek enerji yoğunlukları, düşük deşarj kayıpları ve yüksek şarj deşarj döngüleri (çevrim ömrü) lityum iyon bataryalara olan ilgiyi arttırmış ve farklı bileşen ve kimyasallarla bu teknoloji oldukça gelişmiştir. Şekil 1.15'te li-ion batarya gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Li-ion batarya

1.5.6. Akışkan Bataryalar

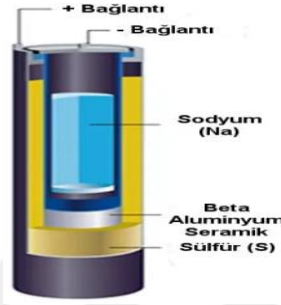
Bu batarya teknolojisinde de elektrik enerjisi elektrokimyasal olarak depolanır. Geliştirilmeye müsait yeni bir teknolojidir. Kapasitelerinin esnek olması, uzun ömürlü olmaları, beklemede düşük deşarj kayıpları ve çevre dostu olmaları gibi öne çıkan özellikleri ile gelecek vaat etmektedir [45]. Ancak enerji yoğunluklarının düşük olması, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve kullanılan sıvıların pompalanması ve saklanması gibi dezavantajları nedeniyle bu bataryaya olan ilgi şimdilik istenilen düzeye erişememiştir. Şekil 1.16'da akışkan bataryanın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Akışkan bataryanın yapısı

1.5.7. Sodyum Sülfür Bataryalar (NaS)

Sodyum ve sülfür bileşenlerinde oluşan elektrotlar kullanılır. Düşük maliyetleri, yüksek çevrim ömürleri ve yüksek verimlerinin yanında, yüksek güç yoğunluklarına sahiptir. Çalışması için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyması ve kullanılan elektrolitin yüksek miktarda korozyona neden olması gibi özelliklerinden, geliştirme aşamasında olan bir teknolojidir [46]. Şekil 1.17’de sodyum sülfür bataryanın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.17. NaS bataryanın yapısı

1.5.8. Sodyum Nikel Klorid Bataryalar ($NaNiCl_2$)

Sodyum Nikel Klorid ($NaNiCl_2$) bataryaları, tıpkı Sodyum Sülfür (NaS) bataryaları gibi yüksek sıcaklık koşullarında çalışan bataryalardır. Şarj sırasında, sodyum tuzu ve nikel, nikel klorid ($NaCl_2$) şeklinde birleşir, deşarj sırasında ise bu reaksiyon tersine döner [47].

1.6. Süperkapasitörlerin Elektrokimyasal Depolama Yöntemleri İle

Karşılaştırılması

Süperkapasitörler çok kısa sürede şarj olabilme yetisine sahiptir, uygun bir kaynağa bağlanırsa birkaç saniyede şarj olabilirler. Ancak aynı enerji yoğunluğuna sahip bataryalara kıyasla çok daha büyüktürler. Süperkapasitörlerde beklemede kendi kendine deşarj kaybı fazla olduğundan henüz bataryaların yerine kullanılma yetisine sahip değildir [48]. Denklem 1.4’te kapasitörlerin enerji depolama kapasiteleri verilmiştir.

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 = J \text{ (Joul)} \quad \text{yada} \quad Ws \text{ (watt saniye)} \quad (1.4)$$

Günümüzde elektrik enerjisini depolamak için en çok kullanılan yöntem, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülerek, elektrokimyasal olarak depolandığı türleridir. Birden fazla pilin bir araya getirilmesi ile oluşturulan bataryalar, artan talebin etkisi ile gün geçtikçe geliştirilmektedir. Batarya teknolojisinde yaşanan

gelişmeler kapasitelerinin artmasına ve ömürlerinin uzun olmasına neden olmuştur [49]. Elektrokimyasal yöntemle elektrik enerjisi depolama sistemlerinde elektrik enerjisi kimyasal bir reaksiyona sokularak kimyasal bileşiklerin oluşturduğu bağlarda tutulur. Sonrasında bu kimyasal enerji tekrardan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Şarj ve deşarj olaylarında meydana gelen kimyasal olaylar pil veya batarya içerisinde bazı bozulmalara neden olur. Bu bozulmalar pillerin, akülerin veya bataryaların ömürlerinin kısa olmasındaki en büyük etkidir. Aynı şekilde elektrokimyasal bir depolama sistemi, kullanılsa dahi belli bir süre sonra bozulup kullanılmaz hale gelecektir. Süperkapasitörlerde şarj ve deşarj olaylarında herhangi bir kimyasal tepkime gerçekleşmediğinden ömürleri pillere göre çok uzun olmaktadır.

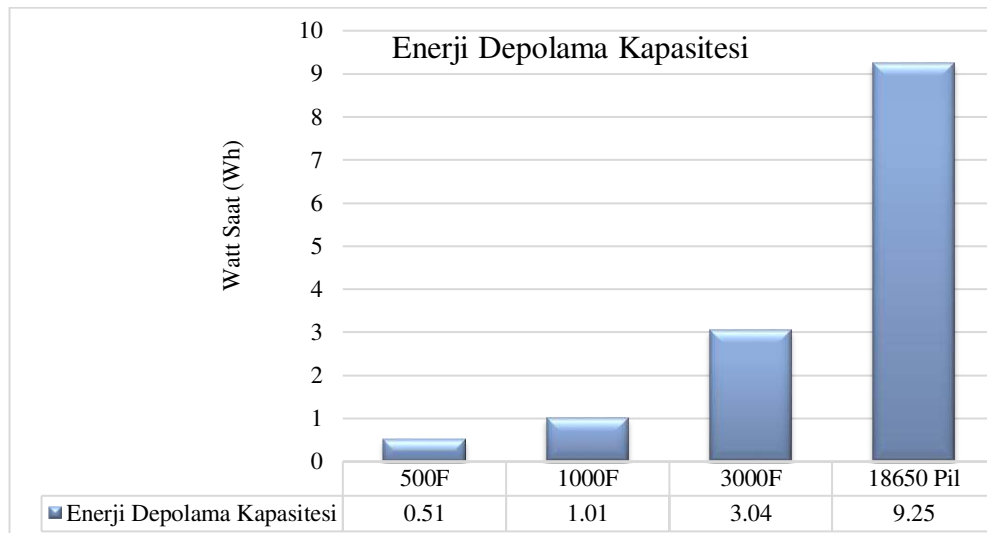
500, 1000 ve 3000 F kapasitörler için kapasiteleri hesaplanmış ve Denklem 1.5 , 1.6 ve 1.7’de verilmiştir.

$$\frac{1}{2} \cdot 500 \cdot (2.7)^2 = 1822.5 \text{ } Ws \text{ yada } 0.51 \text{ } Wh \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (2.7)^2 = 3645 \text{ } Ws \text{ yada } 1.01 \text{ } Wh \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot (2.7)^2 = 10935 \text{ } Ws \text{ yada } 3.04 \text{ } Wh \quad (1.7)$$

Piyasada yaygın kullanım alanına sahip 18650 adıyla bilinen Li-on bataryalar 3.7 V gerilim değerine ve ortalama 2500 mAh kapasiteye sahiptir. Bu yaklaşık 9.25 Wh etmektedir. Farklı değerlere sahip süperkapasitörlerin ve 18650 bataryanın enerji depolama kapasiteleri Şekil 1.18’de verilmiştir.



Şekil 1.18. Farklı kapasitörlerin ve 18650 – 2500 mAh bataryaya ait enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması

Şekil 1.18 incelendiğinde 18650 bataryanın, 500 F 'lık bir süperkapasitörün yaklaşık 18 katı fazla enerji depolayabildiği görülmektedir. Boyutları karşılaştırıldığında 18650 bataryanın, 500 F kondansatörden küçük olduğu görülmektedir.

Elektrokimyasal depolama yöntemlerinin, süperkapasitörlere göre üstünlüklerini sıralayacak olursak;

- Enerji yoğunlukları yüksektir
- Hacim olarak az yer kaplarlar
- Nispeten daha ucuzdurlar
- Şarj kayıpları küçüktür, enerjiyi uzun süre saklayabilirler

Süperkapasitörlerin elektrokimyasal depolama yöntemlerine göre üstünlükleri ise;

- Güç yoğunlukları yüksektir
- Elektrik enerjisi herhangi bir kimyasal tepkime olmadan, direkt olarak elektrostatik olarak depolanır
- Çok hızlı şarj edilebilirler (eğer uygun bir kaynağa bağlanırsa saniyeler içinde şarj olurlar)
- Şarj vedeşarj esnasında çok fazla ısınmazlar
- Çok yüksek şarj döngüsüne sahiptirler (teoride sonsuz şarj döngüsüne sahiptirler)
- Kısa devreye maruz kaldıklarında büyük sorun çıkarmazlar
- Şarj edilmeleri için bir devreye ihtiyaç duymazlar
- Aşırı şarj edilmelerinde bir mahsur yoktur
- İç dirençleri çok küçük olduğundan anlık yüksek akım sağlayabilirler
- Hafiftirler
- Uzun süre kullanılımsalar da bozulmaya uğramazlar
- Dış ortam sıcaklığından etkilenmezler
- Çevreci bir teknolojidir. Diğer elektrokimyasal bataryalarda olduğu gibi çevreye zararlı bileşenler içermezler
- Bakım masrafları düşüktür
- Soğutmaya ihtiyaç duymazlar
- Yüksek güç yoğunlukları sayesinde pillerle birlikte, anlık güç gerektiren hibrit sistemlerde kullanılabilirler

1.7. DC-DC Dönüştürücüler

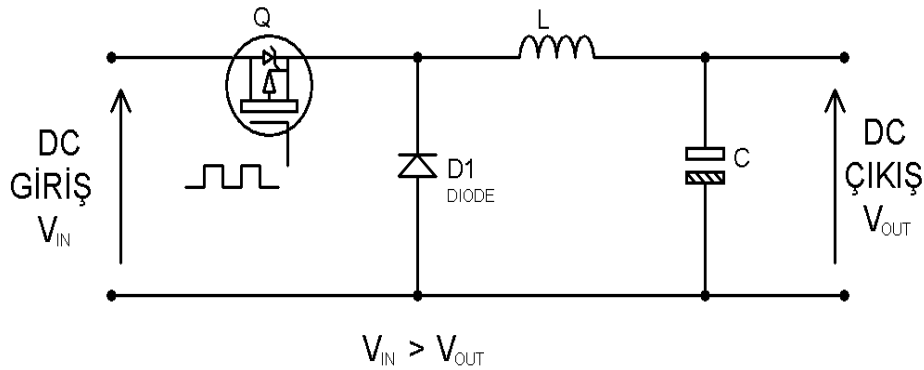
DC-DC dönüştürücüler, bir kaynaktan aldığı DC gerilimin, genliğini değiştirerek başka bir DC gerilime verimli bir şekilde dönüştüren ve bu gerilimin ortalama değerini kontrol edebilen güç elektroniği devrelerdir. Yarı iletken anahtarlama elemanları ve pasif devre elemanlarından oluşur [50], [51].

Anahtarlama elemanının frekansı değiştirilerek, çıkış gerilimi istenilen değere ayarlanabilir. Değişik devre yapılarına sahip çeşitli güçlerde DC-DC dönüştürücüler bulunmaktadır ve bunların birbirine göre üstün ya da zayıf yönleri bulunmaktadır [52]. DC-DC dönüştürücüler en basit haliyle yarı iletken bir anahtarlama elemanı, bir indüktör (bobin), bir diyot ve bir kondansatörden oluşur. Bu devre elemanları farklı şekillerde bağlanarak DC-DC düşürücü, yükseltici veya hem düşürücü hem de yükseltici devreler tasarlanabilir.

Günümüzde çok yüksek verimliliğe sahip dönüştürücüler bulunmaktadır. Başlıca DC-DC Dönüştürücü çeşitleri şunlardır:

1.7.1. DC-DC Buck Dönüştürücü (Düşürücü)

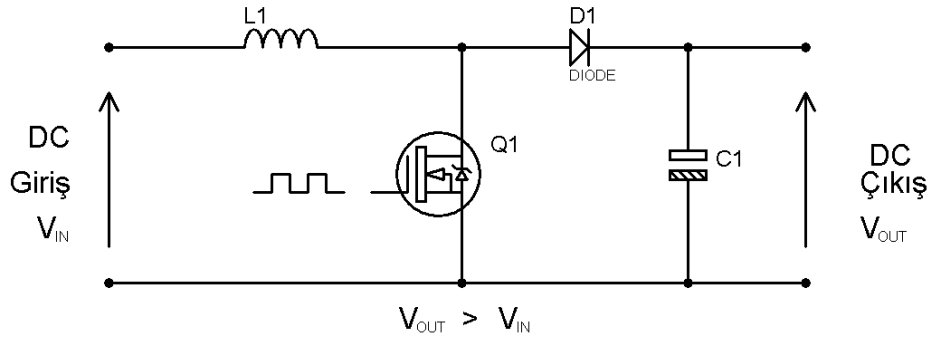
Çıkış gerilimleri giriş geriliminden daha düşüktür. Girişe uygulanan gerilimi daha düşük DC gerilime dönüştürürler [53]. Şekil 1.19’da temel DC-DC düşürücü devre gösterilmiştir.



Şekil 1. 19. Temel DC-DC düşürücü devre

1.7.2. DC-DC Boost Dönüştürücü (Yükseltici)

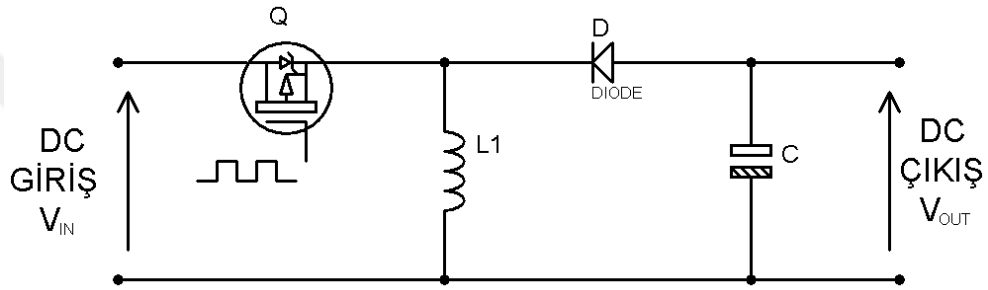
Çıkış gerilimleri giriş gerilimlerinden daha yüksektir. Girişe uygulanan gerilimi daha yüksek bir DC gerilime dönüştürürler [54]. Şekil 1.20’de temel DC-DC yükseltici devre gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Temel DC-DC yükseltici devre

1.7.3. DC-DC Buck Boost Dönüştürücü (Düşürücü-Yükseltici)

Giriş gerilimini hem yükseltme hem de düşürme özelliğine sahiptirler [55]. Şekil 1.21’de temel DC-DC düşürücü yükseltici devre gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Temel DC-DC düşürücü yükseltici devre

1.8. DC Motorlar

Bir doğru akım kaynağından aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motoru çeşididir. Fırçalı ve fırçasız olmak üzere iki temel çeşidi bulunmaktadır. Düşük devirlerde yüksek tork üretebilmeleri, bakımlarının kısmen kolay olması, devir sayılarının kolayca ayarlanabilmesi gibi üstünlükleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar [56].

1.8.1. Marş Motoru

Tasarlanan yedek güç ünitesi içten yanmalı motorların ilk hareketinin sağlanmasında test edilecektir. Bu nedenle bu hareketi sağlayan marş motorlarının karakteristiklerinin bilinmesi gerekir.

İçten yanmalı motorlarda motorun ihtiyaç duyduğu ilk hareket marş motoru adı verilen fırçalı bir dc motor tarafından sağlanmaktadır. Bu motorlar düşük devirli, yüksek tork değerine sahip, yük altında çalışan DC motorlardır [57]. Şekil 1.22’de içten yanmalı motorlarda kullanılan marş motoru gösterilmiştir.



Şekil 1.22. İçten yanmalı motorlarda kullanılan marş motoru

İçten yanmalı motorlarda marş motorları kullanılmaya başlandığında bu motorlar büyük yapıları gereği daha fazla güce ve dolayısıyla daha büyük marş motorlarına ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde içten yanmalı motorların silindir hacimleri ile birlikte boyutları küçülmüş güçleri ise artmıştır. İçten yanmalı motorların boyutları ile beraber, marş motorlarının da boyutları ve güçleri küçülerek daha verimli hale gelmiştir [58].

Yapılan çalışmalarda bazı motor seçeneklerine göre, deneysel olarak hesaplanan marş motoru güçleri, katalog değerlerde yer alan marş motoru güçleri ve teorikteki marş motoru gücü ile ilgili tablo oluşturulmuş ve Tablo 1.1.'de verilmiştir. Tabloda yer alan c_b katsayısı motorun tasarımına göre değişkenlik gösteren bir katsayıdır [59].

Tablo 1.1. Benzinli motorlarda motor hacmine göre katalog, teorik ve deneysel değerler[59]

Motor Hacmi(cc)	Deneysel Olarak Hesaplanan Marş Motoru Güçleri (kW)			Katalog Değerler Marş Motor Gücü (kW)	Teorik Marş Motor Gücü (kW)
	$c_b = 3$	$c_b = 4$	$c_b = 5$		
650	0.302	0.403	0.507	0.35	0.36
800	0.378	0.496	0.624	0.5	0.48
1000	0.473	0.620	0.780	0.6	0.51
1200	0.565	0.744	0.936	0.8	0.64
1300	0.61	0.806	1.014	0.8	0.73
1400	0.662	0.868	1.092	0.9	0.89
1500	0.701	0.930	1.170	1	1.07
1600	0.743	0.992	1.248	1.4	1.2
1700	0.799	1.054	1.326	1.4	1.36
1800	0.846	1.116	1.404	1.6	1.43
1900	0.893	1.178	1.482	1.8	1.48
2000	0.940	1.240	1.560	2	1.5
2200	1.034	1.364	1.716	2.2	1.58

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Süperkapasitörler (ultrakapasitörler), avantaj olarak yüksek güç yoğunluğuna sahip olup, hızlı şarj ve hızlı deşarj yetenekleri sayesinde üstün niteliklidirler. Ayrıca süperkapasitörler uzun ömürlü olmaları nedeniyle tercih edilirler. Süperkapasitörlerin dezavantajlı yönleri ise enerji depolama kapasitelerinin (enerji yoğunluklarının) bataryalara göre düşük olmasıdır.

Süperkapasitörler, batarya ünitelerine eklendiği takdirde süperkapasitörlü hibrit sistemlerde geleceğin enerji depolama teknolojisi niteliğindedirler. Süperkapasitörler ani güç gerektiren uygulamalar için seçkin özel cihazlardır.

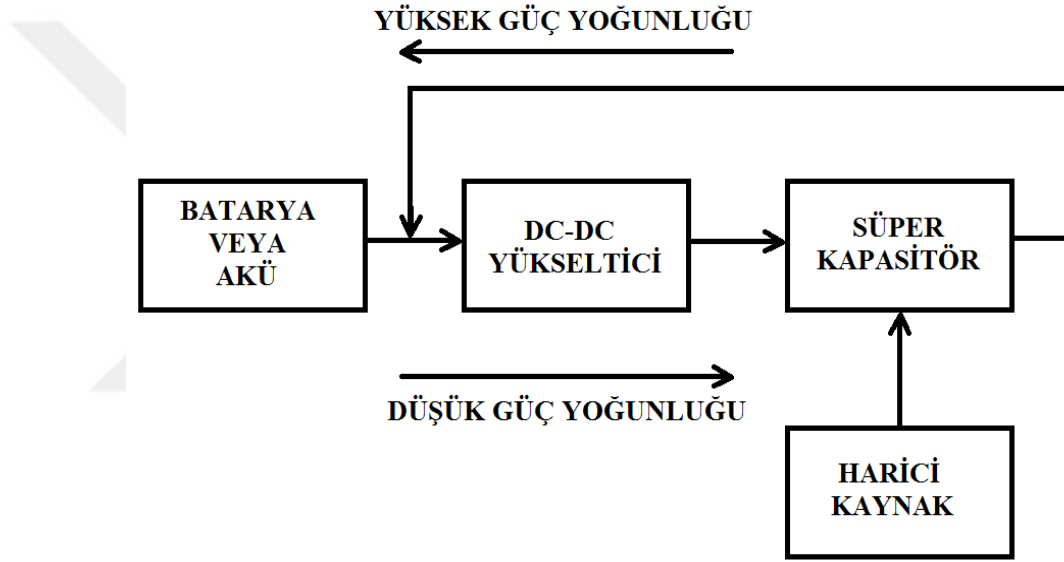
Süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğunun sağladığı avantaj sayesinde uzay araçlarında, otomotiv teknolojisinde, bataryalarda, havacılık teknolojisinde, yenilenebilir enerji kaynaklarında, endüstriyel makinelerde, tüketici elektroniğinde ve savunma sanayisinde kullanılabilir. Örneğin uzay araçlarında uydu antenlerinin açılması veya uzayda itme sistemlerinde kullanılırlar. Süperkapasitörler elektrikli ve hibrit araçlarda fren enerjisinin hızla depolanıp hızlanmada kullanılması, start-stop sistemlerinde, hızlı şarj istasyonlarında ani güç desteği veya batarya performansının artırılmasında, kesintisiz güç kaynaklarında, elektrik kesintisi anında bataryalara zaman kazandırmak için ani enerji sağlamada, bataryaları yüksek güç taleplerinden koruyarak kullanım ömrünü artırmada, uçaklarda motor arızası esnasında kritik aviyonik sistemlere ani güç sağlamada, vinçlerde ani güç gereksinimlerini karşılamada, rüzgar türbini kanat kontrolü veya güneş enerjisi dalgalanmalarını dengelemede, cep telefonlarında hızlı şarj veya güç kesintilerinde veri korumasının sağlanmasında ve askeri ihtiyaçlar için yüksek güç desteğinde kullanılırlar.

2.1. Sistemin Tasarlanması

Yedek güç ünitesi kısa süreli yüksek güç gerektiren yerlerde, sistemlerin ihtiyacı olan gücü karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle portatif ve çok yönlü olarak düşünülmüştür. Süperkapasitörler çok yüksek tepe akımları sağlayabileceğinden, bu akımları taşıyabilecek kapasitede kablo ve kumanda elemanları kullanılmıştır. Yedek güç ünitesinde kullanılan süperkapasitörleri şarj etmek için 2 adet DC-DC yükseltici devre kullanılmıştır.

2.2. Sistemin Genel Yapısı

Tasarlanan yedek güç ünitesi genel olarak bir süperkapasitör modülü, bu sistemi şarj edebilmek için kullanılan DC-DC dönüştürücüler ve kumanda elemanlarından oluşmaktadır. Yedek güç ünitesi batarya veya akülerde bulunan yüksek enerji, düşük güç yoğunluğunu bir DC-DC yükseltici sayesinde süperkapasitörleri şarj etmek için kullanacaktır. Süperkapasitör aracılığı ile batarya veya akülerdeki enerji, yüksek güç yoğunluğuna dönüştürülecek ve üzerinde bulunan kontrol elemanları ile ihtiyaç halinde, sahip olduğu tüm enerjiyi batarya veya aküye kısa sürede geri transfer edecektir. Böylece sistemlerin ihtiyacı olan kısa süreli yüksek akımlar karşılanacaktır. Şekil 2.1’de sistemin genel yapısına ait diyagram verilmiştir.



Şekil 2.1. Yedek güç ünitesinin genel diyagramı

Yedek güç ünitesinin temel çalışma prensibini anlamak için enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğunun ne olduğunu bilmek gerekir. Enerji yoğunluğu, bir enerji depolama cihazının veya sisteminin birim hacim veya kütle başına ne kadar enerji depolayabileceğini ifade ederken, güç yoğunluğu ise bir enerji depolama cihazının veya sisteminin birim hacim veya birim kütle başına ne kadar güç (enerji transfer hızı) sağlayabileceğini ifade eder. Enerji yoğunluğu Wh/kg birimi ile ifade edilirken, güç yoğunluğu ise W/kg birimi ile ifade edilir [60], [61]. Elektrik enerjisini depolayan bir sistemin enerji yoğunluğu Denklem 2.1 ile ve güç yoğunluğu ise Denklem 2.2 ile hesaplanır.

$$Enerji\ Yoğunluğu = \frac{Depolanan\ Enerji(Wh)}{Kütle(kg)} \quad (2.1)$$

$$\text{Güç Yoğunluğu} = \frac{\text{Anlık Olarak Sağlanan Güç(W)}}{\text{Kütle(kg)}} \quad (2.2)$$

2.3. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.3.1. Süperkapasitörler ve Denge Kartı

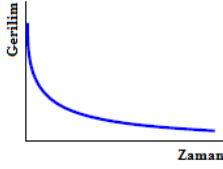
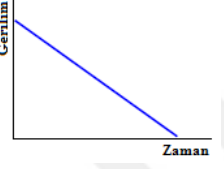
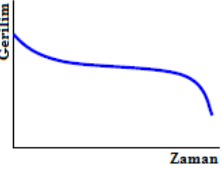
Yedek güç ünitesinde SAMWHA Electric firması tarafından üretilmiş, her biri 2.7 V, 500 F eşdeğer özelliklere sahip 6 adet süperkapasitör kullanılmıştır. Süperkapasitörler bir denge kartı üzerinden seri olarak bağlanmıştır. Denge kartı, seri bağlı kapasitörlerin gerilimlerinin eşit ve dengede olmasını sağlayarak, modül üzerinden akım çekildiğinde tüm kapasitörlerin eşit şekilde enerji transfer etmesini ve dengeli bir şekilde şarj olmasını sağlar. Sistem en basit haliyle şarj esnasında gerilimi yüksek olan bir süperkapasitörün enerjisini, gerilimi düşük olan diğer kapasitörlere aktararak her hücrenin eşit gerilimde kalmasını sağlayacaktır. Şekil 2.2’de Yedek güç ünitesinde kullanılan süperkapasitörler ve denge kartı verilmiştir.



Şekil 2.2. Süperkapasitörler ve denge kartı

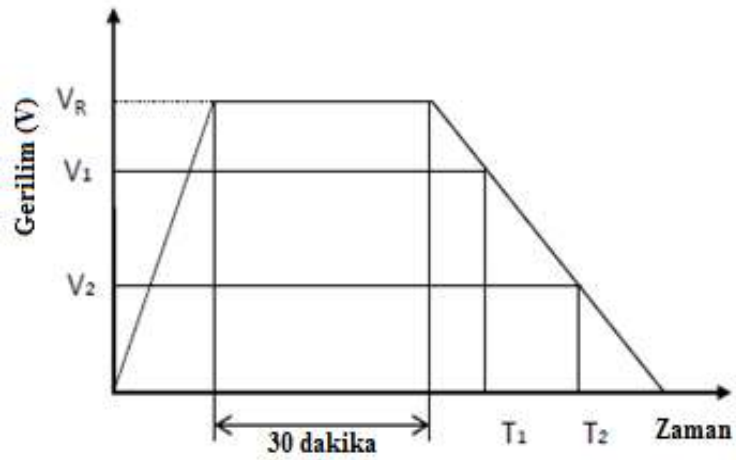
Firmanın ürettiği süperkapasitörlerin, diğer enerji depolama türlerine göre karakteristik özelliklerinin karşılaştırıldığı tablo, Tablo 2.1’de yer almaktadır.

Tablo 2.1. Enerji depolama ürünlerinin karakteristik özellikleri [32]

Enerji Depolama Türlerinin Karakteristik Özellikleri			
	Elektrolitik Kondansatör	Samwha Süper Kapasitör (EDLC)	Şarj Edilebilir Batarya
Deşarj Süresi	10-6 ~ 10-3 sn	1 ~ 30 sn	0.3 ~ 4 saat
Şarj Süresi	10-6 ~ 10-3 sn	sn ~ dk	0.5 ~ 5 saat
Çalışma Sıcaklığı	-40 °C ~ 125 °C	-40 °C ~ 85 °C	-20 °C ~ 60 °C
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	< 0.1	1 ~ 15	30 ~ 100
Güç Yoğunluğu (W/kg)	>10,000	1,000 ~ 4,000	50 ~ 2,000
Şarj/Deşarj Verimliliği	~ 1.0	0.9 ~ 0.95	0.7 ~ 0.85
Şarj/Deşarj Döngü Ömrü	Sonsuz	>500,000	500 ~ 2,000
Deşarj Grafiği			

Aşağıda üretici firmanın süperkapasitöre ait yapmış olduğu bazı karakteristik ölçümlere ait grafikler yer almaktadır.

Kapasite grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekil 2.3'te kapasite hesabı Denklem 2.3. ile hesaplanır.

**Şekil 2.3.** Kapasite ölçüm grafiği

$$Kapasite (F) = \frac{I(T_2 - T_1)}{V_1 - V_2} \quad (2.3)$$

I =Deşarj Akımı (A)

V_R =Nominal Gerilim (V)

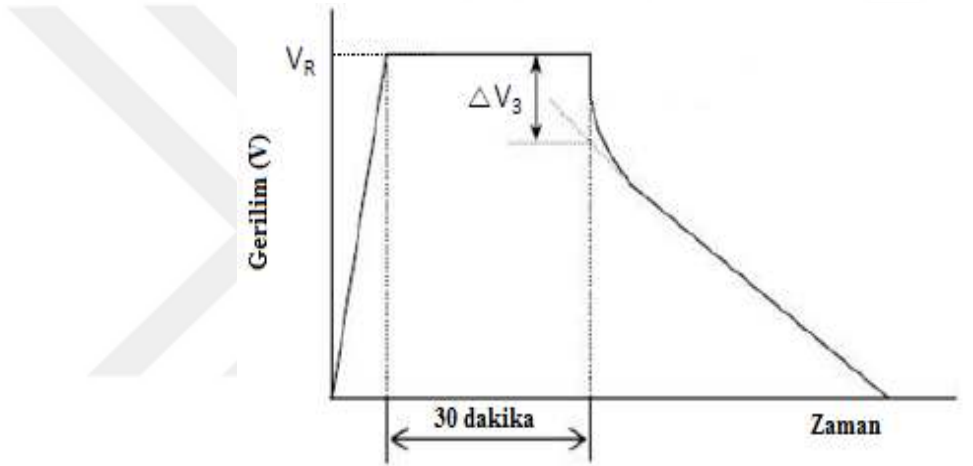
V_1 =Nominal Gerilim x 0.8

V_2 =Nominal Gerilim x 0.4

T_1 = Deşarj başlangıcından V_1 'e ulaşana kadar geçen süre (saniye)

T_2 = Deşarj başlangıcından V_2 'e ulaşana kadar geçen süre (saniye)

Eşdeğer Seri Direnç (ESR) Şekil 2.4.'te verilmiştir. ESR denklem 2.4 ile hesaplanır.



Şekil 2.4. Eşdeğer Seri Direnç (ESR) hesaplama grafiği

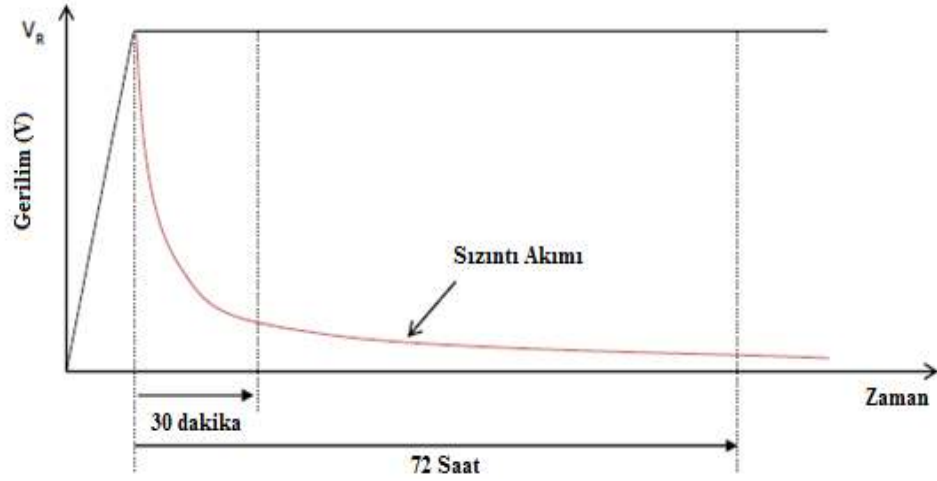
$$Direnç(R) = \frac{\Delta V_3}{I} \quad (2.4)$$

R = Direnç (Ω)

ΔV_3 = Düşme Gerilimi (V)

I = Deşarj Akımı (A)

Sızıntı akımı grafiği şekil 2.5.'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Sızıntı akımı grafiği

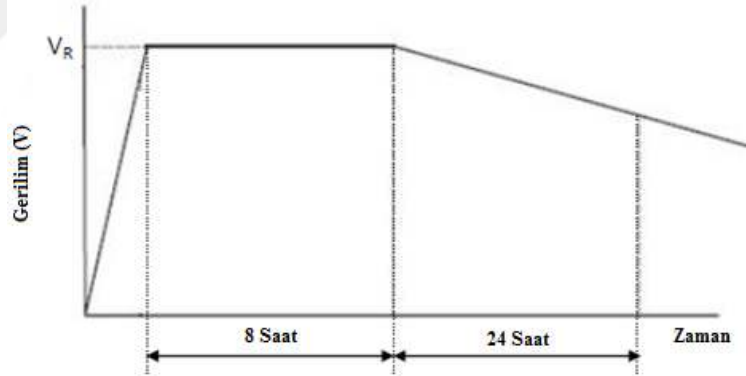
Ölçüm yöntemi (IEC 62391-1)

Şarj işlemi sabit akım ve ardından sabit gerilim ile gerçekleştirilir.

Şarj işlemi nominal gerilimde 72 saat süreyle gerçekleştirilir.

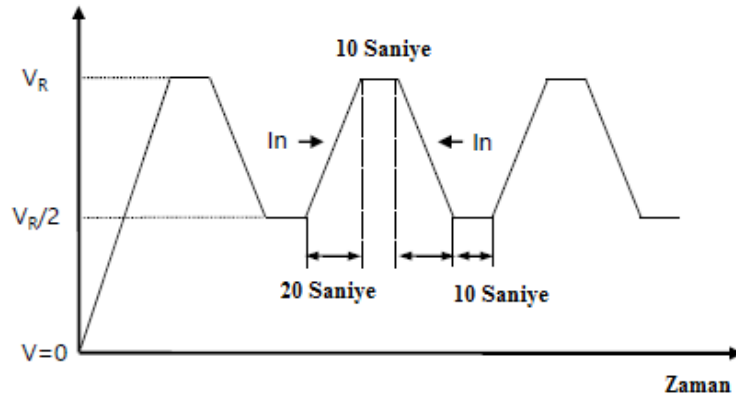
Kaçak akım, kaçak akım ölçüm ekipmanı ile ölçülür.

Kendi kendine deşarj grafiği şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kendi kendine deşarj grafiği

EDLC süperkapasitör çevrim ömrü test grafiği Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. EDLC süperkapasitör çevrim ömrü test grafiği

Yedek güç ünitesinin kalbinde 6 adet seri bağlı 2.7 V 500 F kapasiteye sahip süperkapasitör modülü kullanılmıştır. Modülün toplam kapasitesi Denklem 2.6 ile hesaplanır.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{500} + \frac{1}{500} + \frac{1}{500} + \frac{1}{500} + \frac{1}{500} + \frac{1}{500} \quad (2.6)$$

$C_T \cong 83 F$ olarak hesaplanır.

Toplam dayanma gerilimi denklem 2.7 ile hesaplanır.

$$U_T = 6 \times 2.7 = 16.2 V \quad (2.7)$$

Kullanılan modülün boyutları 231x35x65mm'dir.

Ağırlık $\cong 500 g$

Modülün toplam enerji depolama kapasitesi Denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2} QV^2 \text{ veya } E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.8)$$

Burada E toplam enerji miktarını, C kondansatörün kapasitesini V ise gerilimi ifade eder [62].

Modülün maksimum enerji depolama kapasitesi;

$$E = \frac{1}{2} (83)(16.2)^2 \cong 10891 Ws \text{ olarak bulunur.}$$

Yedek güç ünitesinde, kondansatör modülünün toplam gerilimi 14.5 V olarak sınırlandırılmıştır. Bu durumda toplam enerji Denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2} (83)(14.5)^2 \cong 8725 Ws \quad (2.9)$$

olarak hesaplanır.

Modül 14.5 V'a kadar şarj edildiğinde 1 saniye boyunca 8725 W güç çekilmesi durumunda deşarj olacaktır. Çekilen güç azaldıkça sistemin enerji sağlama süreside artacaktır.

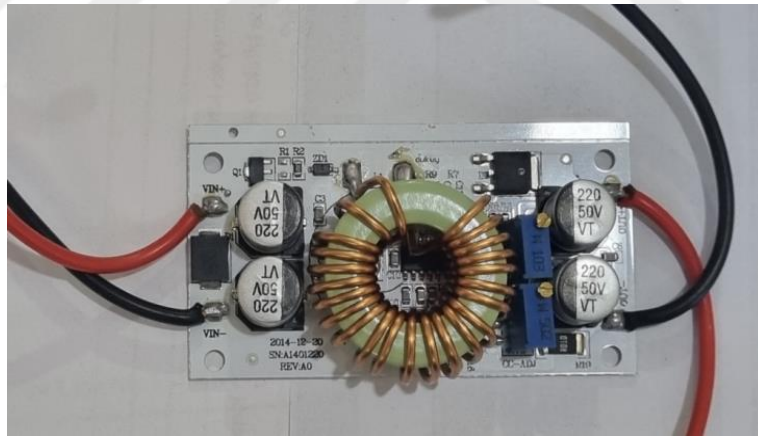
Modül üzerinde yer alan denge kartı sayesinde seri bağlı kapasitörlerin gerilimlerinin dengeli bir şekilde şarj olması sağlanacak böylece kapasite kayıplarının önüne geçilecektir. Ayrıca bu kart aşırı şarj durumuna karşı kapasitörleri koruyacaktır.

2.3.2. DC-DC Yükseltici

Yedek güç ünitesinde 3 farklı DC-DC Yükseltici devre kullanılmıştır. Aşağıda bunlara ait teknik bilgiler, devre şemaları ve ne amaçla kullanıldığı yer almaktadır.

2.3.2.1. 250 W DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül

Bu devre yedek güç ünitesinin giriş kısmından süperkapasitörü şarj etmek için kullanılacaktır. Yedek güç ünitesinin temel şarj ünitesi bu devredir. Giriş gerilimi teknik özelliklerden görüldüğü üzere 8.5 V ile 48 V arasındadır. Dönüştürücünün çıkış gerilimi 14.5 V olarak ayarlanacaktır. Bu gerilim değeri kurşun asit akülerin güvenli şarj gerilimi sınırındır. Böylece 8.5 V eşik değerine kadar bir kaynaktan DC-DC yükseltici devre aracılığı ile süperkapasitörlerin 14.5 V'ta kadar şarj olması sağlanacaktır. Şekil 2.8'de sistemde kullanılan 250 W DC-DC yükseltici devre ve şekil 2.9'da bu devreye ait devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Sistemde kullanılan 250 W DC-DC yükseltici devre

Teknik Veriler:

Giriş Gerilimi: 8.5 V_{DC} – 48 V_{DC}

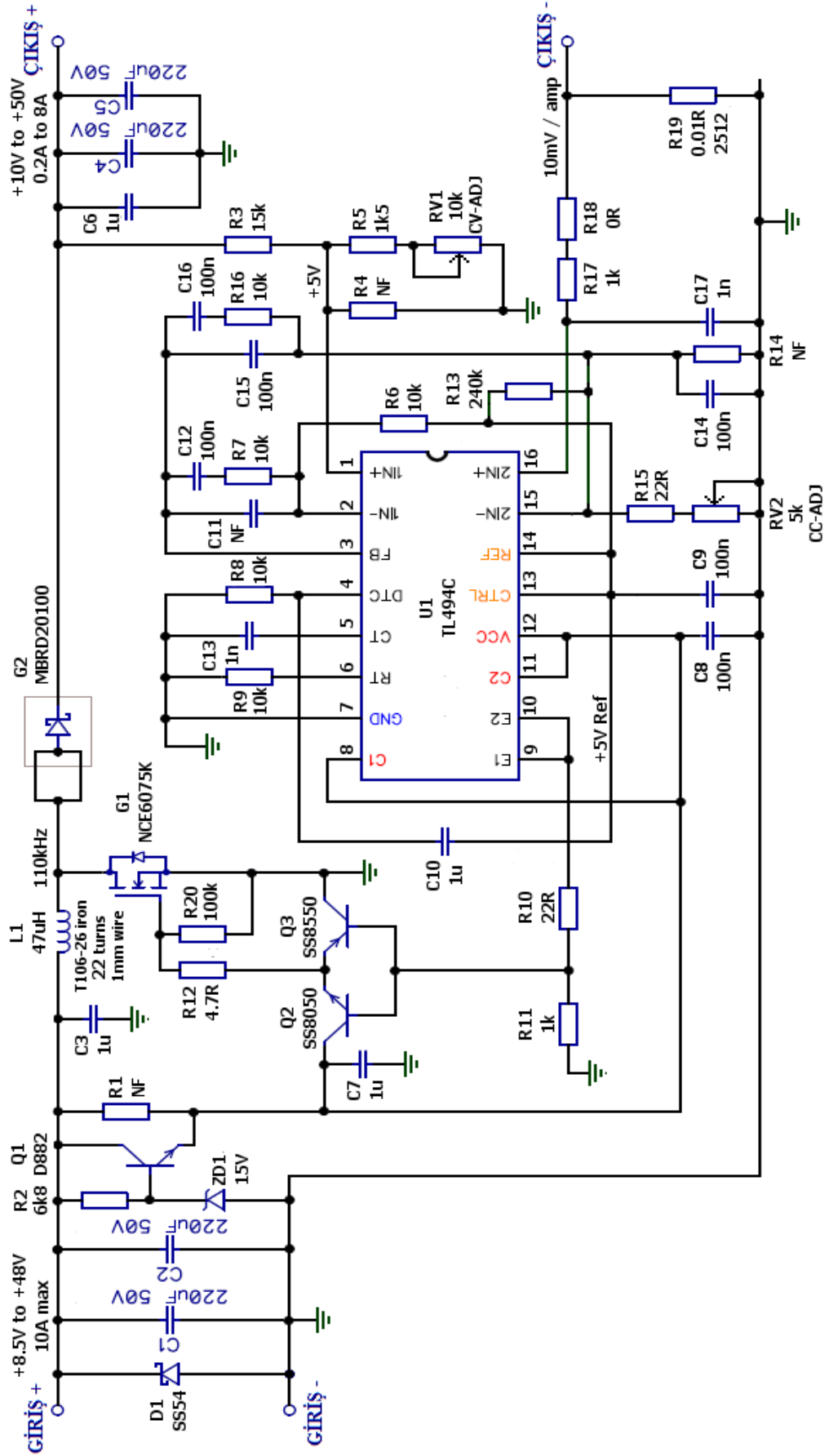
Giriş Akım Değeri: Max. 10 A, Beklemede Çekilen Akım: 10 mA

Çıkış Gerilimi: 10-50 V_{DC} (Çıkış gerilimi ayarlanabilir. Çıkış geriliminin giriş geriliminden büyük olması gerekir)

Sabit Aralık: 0.2-8 A, Çalışma Sıcaklığı: -40 ile + 85 °C, Anahtarlama Frekansı: 150

kHz, Verimlilik: 96% 'ya kadar, Aşırı Akıma Karşı Koruma: Var, Ters Bağlantı

Koruması: Var, Boyutlar: 70x35x13mm



Şekil 2.9. 250 W DC-DC yükseltici devre şeması

2.3.2.2. MT3608 28V 2A DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül

Bu modül devrede ters bağlantı koruması için kullanılacaktır. 2 V gibi düşük giriş gerilimi seviyesine sahiptir. Devre girişine normal bağlantı durumunda ters bağlantıdan etkilenmemesi için diyot eklenecektir. Diyot eklendikten sonra yapılan deneylerde giriş geriliminin 3.5 V'tan büyük olması durumunda çıkış geriliminin sabit kaldığı görülmüştür. Çıkış gerilimi 14.5 V olarak ayarlanmış ve bu kart üzerinden bir röle beslenmiştir. Bu modül yedek güç ünitesinin girişine ters bağlanacaktır. Üzerine eklenen diyotlar sayesinde girişe ters bir gerilim gelmesi durumunda beslediği röle üzerinden diğer kontrol elemanlarını devreden çıkararak sistemin çalışmasını engelleyecektir. Böylece yedek güç ünitesinin başka sistemlere bağlanması esnasında yanlış bağlantıdan kaynaklanabilecek sorunların önüne geçilebilecektir. Şekil 2.10'da yedek güç ünitesinde kullanılan MT3608 DC-DC yükseltici devre ve Şekil 2.11'de bu devreye ait devre şeması verilmiştir.



Şekil 2.10. MT3608 DC-DC yükseltici devresi

Teknik Veriler:

Giriş Gerilimi: 2-24 V_{DC}

Maksimum Çıkış Gerilimi 28 V_{DC} (Çıkış gerilimi ayarlanabilir, giriş geriliminden daha yüksek olmalıdır)

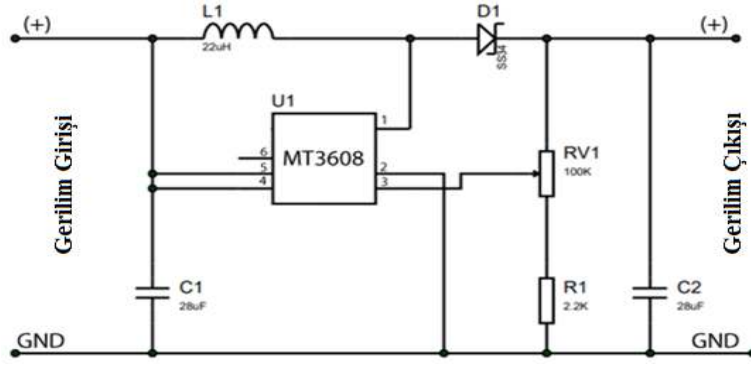
Maksimum Çıkış Akımı 2 A

Verimlilik: % 93'e kadar

Çalışma Frekansı: 1.2 MHz

Boyutlar: 36x17x6.25 mm

Ağırlık 4.4 g



Şekil 2.11. MT3608 DC-DC yükseltici devre şeması

2.3.2.3. 4A XL6009 DC-DC Gerilim Yükseltici (Boost) Modül

Bu modül girişi Type-C olarak adlandırılan cep telefonu bağlantı soketi üzerinden beslenecektir. Giriş gerilimi 5-14 V arasında olabilir. Bu DC-DC yükseltici kartın çıkışı 14.5 V olarak ayarlanmıştır. Süperkapasitör tam deşarj durumunda iken kısa devre gibi davranacağından devre üzerinden yüksek akımların geçmesine ve zarar görmesine neden olacaktır. Bu durumun önüne geçebilmek için devre çıkışına yüksek akımların sınırlandırılabilmesi için pozitif katsayılı direnç PTC (Positive Temperature Coefficient) eklenmiştir. Böylece bu modül üzerinden uygun bir cep telefonu şarjı ile güvenli bir şekilde şarj olması sağlanmıştır. Şekil 2.12’de Yedek güç ünitesinde kullanılan XL6009 DC-DC yükseltici devre ve şekil 2.13’te bu devreye ait devre şeması verilmiştir.



Şekil 2.12. XL6009 DC-DC yükseltici devre

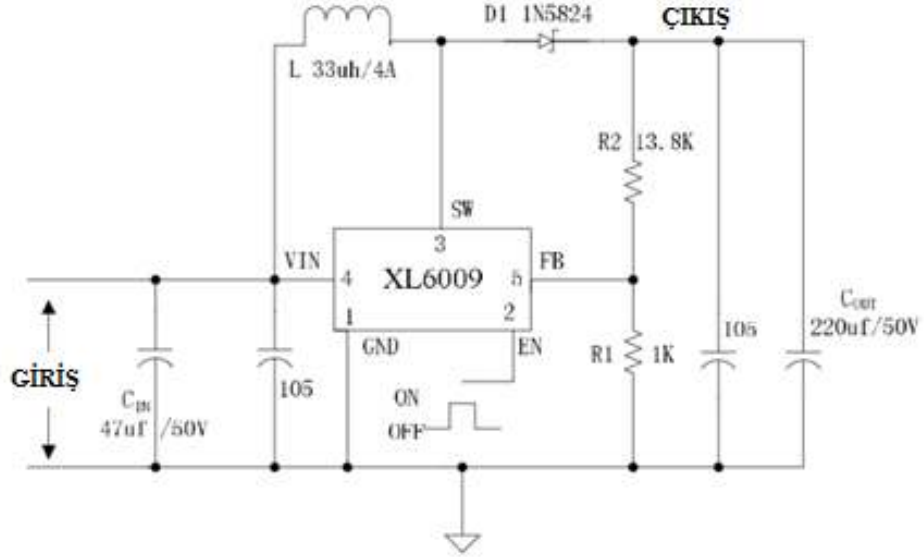
Teknik Veriler:

Giriş Gerilimi: 3-32 V_{DC}

Çıkış Gerilimi: 5-35 V_{DC}

Çıkış Akımı: 4 A

Kart Ölçüleri: 43x21 mm



Şekil 2.13. XL6009 DC-DC Yükseltici devre şeması

2.3.3. Röle

Röleler bobinine enerji uygulandığında kontakları konum değiştiren elektromanyetik anahtarlardır. Röleler bobinlerine uygulanan küçük akımlar ile büyük güçleri anahtarlama için kullanılır [63]. Röleler çok farklı kontak yapılarına sahip olmakla birlikte aynı anda birden fazla yükü anahtarlayabilirler. Bu özellikleri ile röleler, yarı iletken anahtarlama elamanlarından daha üstündür.

Rölelerin en büyük dezavantajları ise mekanik yapılarından dolayı sık sık arıza yapabilmeleridir. Açma kapama yaptıkları esnada meydana gelen arklar kontakların fiziksel olarak hasar görmesine bazen birbirine yapışmasına neden olmaktadır. Röleler çalışma mantığı olarak transistörlere benzerler küçük akımlarla büyük akımların anahtarlamasını sağlarlar. Rölelerin üzerinde normalde açık (NO) ve normalde kapalı (NC) diye adlandırılan kontaklar bulunmaktadır. Bu kontaklar röle bobinleri enerjilendiğinde konum değiştirirler. Röleler, farklı frekanslar ve dalga türlerinden etkilenmeden aynı anda anahtarlama yapabilme yeteneğine sahiptir. Elektromanyetik bir şekilde çalışırlar, yani üzerinden akım geçtiğinde aktif hale gelirler.

Aşağıda yedek güç ünitesinde kullanılan röleler yer almaktadır:

12 V – 200 A güç rölesi sistemin ana anahtarlama elemanı olarak kullanılacaktır. Süperkapasitörün sağlayacağı yüksek akımlar bu röle üzerinden kumanda edilecektir. Şekil 2.14’te yedek güç ünitesinde kullanılan 12 V - 200 A güç rölesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. 12 V - 200 A güç rölesi

Teknik Veriler:

Renk: Siyah

Ağırlık (Net): 90 g

Yaklaşık Boyutlar: 45mm(U) x 45mm(G) x 45mm(Y)

Nominal Bobin Gerilimi: 12 V_{DC}

Maksimum Anahtarlama Akımı: 200 A

Kontak Türü: Normalde açık

12 V - 10 A röle yedek güç ünitesinde güvenlik elemanı olarak kullanılacaktır. Şekil 2.15'te yedek güç ünitesinde kullanılan 12 V - 10 A röle gösterilmiştir.



Şekil 2.15. 12 V - 10 A röle

Teknik Veriler:

Bobin gerilimi: 12 V_{DC}

Kontak anahtarlama akımı: 10 A

Anahtarlama gerilimi: 110 V_{DC}, 250 V_{AC}

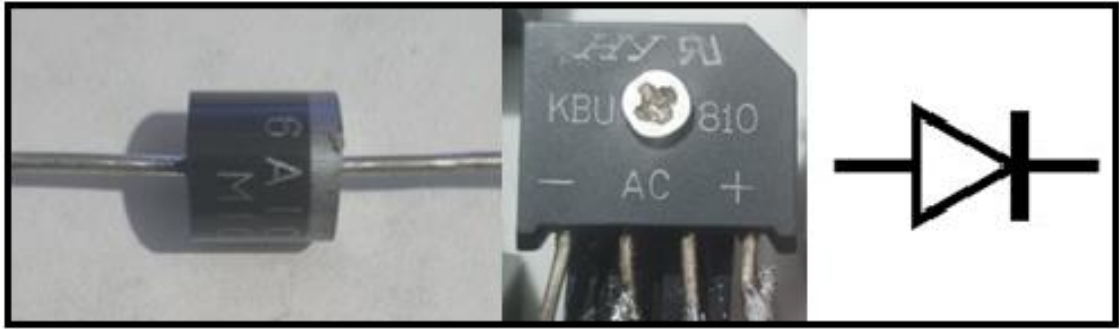
Bobin Gücü: 0.45 W

Yaklaşık Boyutlar: 19 x 15 x 15mm

Ağırlık: 5 g

2.3.4. Diyot

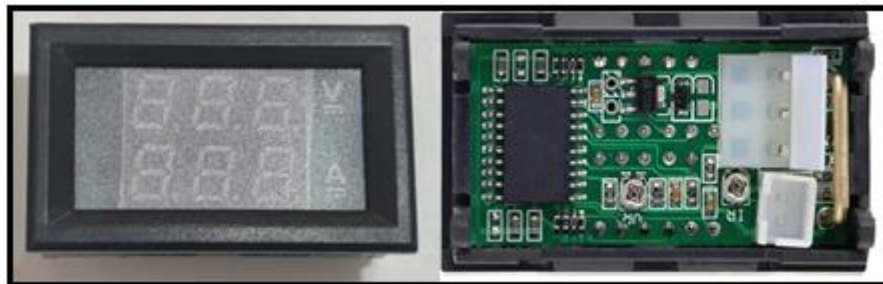
Akımın bir yönde akışına izin veren yarı iletken devre elemanlarına diyot denir [64]. Diyotların temelde iki ucu bulunmaktadır. Bunlardan biri Anot(+), diğeri ise Katot(−) ucudur. Diyotların ilettime geçebilmesi için belli gerilim değerlerinin aşılması gerekir. Diyotların üzerinden dayanma akımlarından daha fazla bir akım akıtılırsa diyotlar bozulur [65]. Ayrıca dayanma gerilimlerinden daha büyük gerilimlere maruz kalmaları durumunda yine bozulmalar gerçekleşebilir [65]-[67]. Germanyum ve Silisyumdan üretilmiş farklı diyot türleri bulunmaktadır. Şekil 2.16’da yedek güç ünitesinde kullanılan diyotlar ve sembolü gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yedek güç ünitesinde kullanılan diyotlar ve diyot sembolü

2.3.5. Dijital DC Voltmetre Ampermetre

Yedek güç ünitesinde giriş gerilimi ve süperkapasitörlerin gerilim değerini izleyebilmek için aşağıdaki dijital voltmetre kullanılacaktır. Voltmetre teknik özellikleri aşağıda yer almaktadır. Voltmetrenin çalışabilmesi için bir besleme gerilimine ihtiyacı vardır. Teknik özelliklerde çalışma gerilimi eşik değeri 4.5 V yazmasına rağmen yapılan deneylerde 3.7 V ve üzeri gerilimlerde voltmetrenin kararlı çalıştığı gözlenmiştir. Şekil 2.17’de Yedek güç ünitesinde kullanılan dijital voltmetre gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Yedek güç ünitesinde kullanılan dijital voltmetre-ampermetre

Teknik Veriler:

Gösterge Rengi: Kırmızı & Mavi LED

Ekran Türü: 0.28" LED digital

Çalışma gerilimi aralığı: DC 4.5 ~ 30 V_{DC} ,

Ölçme aralığı: 0 - 100 V_{DC} ,

Hassasiyet (V): 0.1 V,

Tarama hızı: 500 ms

Hata payı: 1%

Hassasiyet (A): 0.01 A,

Çalışma akımı: <20 mA,

Ölçme aralığı: ≤ 10 A,

Çalışma sıcaklığı: -10 °C – 65 °C,

Yaklaşık boyutlar: 48mm x 29mm x 21mm

2.3.6. Born Klemens (100 A)

Yedek güç ünitesinin, ihtiyaç duyulan farklı sistemlere bağlantısının pratik bir şekilde yapılmasını sağlar. Aynı zamanda bu bağlantı noktasından şarj olacaktır. Şekil 2.18’de born klemens gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Born klemens

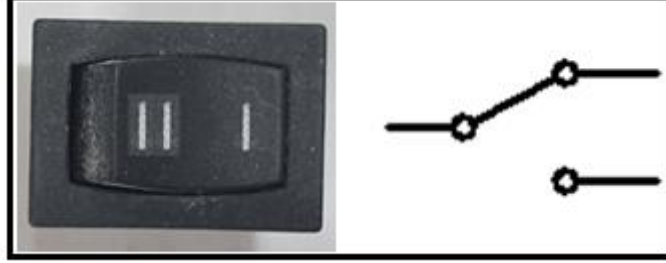
2.3.7. İki Yollu Mini Anahtar

Normalde açık ve normalde kapalı 2 kontağı bulunmaktadır. Anahtara basıldığında kontaklar konum değiştirir. Sistemde voltmetre komütatörü olarak kullanılacaktır. Böylece aynı voltmetre üzerinden hem giriş hem de süperkapasitör gerilimi okunabilecektir. Şekil 2.19’da Yedek güç ünitesinde kullanılan iki yollu mini anahtar ve sembolü gösterilmiştir.

Teknik Özellikler:

6 A, 250 V AC-DC

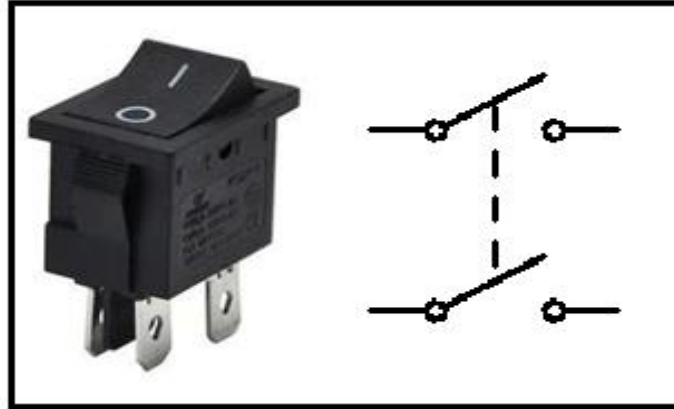
10 A, 125 V AC-DC



Şekil 2.19. İki yollu mini anahtar ve sembolü

2.3.8. KCD1 On-Off Anahtar

2 adet normalde açık kontağı bulunmaktadır. Yedek güç ünitesinde güvenlik önlemi almak ve şarj ünitelerini devreden çıkarmak için kullanılacaktır. Şekil 2.20’de yedek güç ünitesinde kullanılan On-Off anahtar ve sembolü gösterilmiştir.



Şekil 2.20. On-Off anahtar ve sembolü

2.3.9. IC-186 Buton

Normalde açık kontağı bulunan 12 mm çapında bir start butonudur. Bu buton ile tasarlanan sistemin içinde yer alan güç kontaktörü kumanda edilecektir. Şarjlı olan bir süperkapasitör bir sistemi besleyen aküye bağlandığında, bağlı olduğu akü gerilimi düşük ise içindeki enerjiyi hızlı bir şekilde aküye transfer edecektir. Süperkapasitör ve akü arasındaki gerilimler eşitlenene kadar bu enerji akışı devam edecektir. Bu istenmeyen bir durumdur. Süperkapasitörlerin enerji yoğunlukları düşük olduğundan, sistemin ihtiyacı olan gücü karşılamakta yetersiz kalacaktır. Bu buton sayesinde yedek güç ünitesi, kablolu olarak uzaktan kumanda edilebilecek ve sistemlerin ihtiyacı olduğu anda süperkapasitörlerin enerjisini transfer ederek enerji kaybının önüne geçilecektir.

Örneğin tasarlanan yedek güç ünitesi ile bir araba çalıştırılmak istendiğinde, yedek güç ünitesi aküye paralel bağlanacak ve marş motoru çalıştırılacağı esnada butona basılarak bu durum engellenecektir. Şekil 2.21’de yedek güç ünitesinde kullanılan buton ve sembolü gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Yedek güç ünitesinde kullanılan buton ve sembolü

2.3.10. Akım Sınırlayıcı Elemanlar

Deşarj olmuş bir kondansatör kısa devre gibi, şarjlı bir kondansatör ise açık devre gibi davranır. Kondansatörler tam deşarjlı iken, şarj edildikleri kaynaktan çok büyük akımlar çekebilmektedir. Süperkapasitörlerde kondansatörler gibi davranır. İç dirençleri çok küçük olduğundan deşarj olmuş bir süperkapasitör şarj edildiğinde, çok büyük akım çekme eğilimindedir. Bu yüksek akımlar tasarlanan yedek güç ünitesinde yer alan diyot, DC-DC dönüştürücü gibi elemanlara zarar verebileceğinden bu akımın sınırlandırılması gerekir.

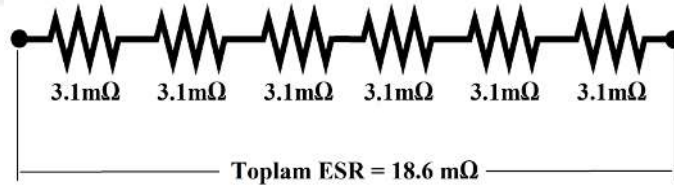
Yedek güç ünitesinde akımları sınırlamak için iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Bunlardan ilki yedek güç ünitesinde ana şarj ünitesi olan 250 W’lık DC-DC yükseltici devresinin akımının sınırlandırılmasıdır. Bu devrenin maksimum akım taşıma kapasitesi 10 A’dır. Üretici tarafından belirlenen sürekli çalışma akımı 6 A’dır. 6 A’dan daha büyük akımların sürekli çekilmesi, devrede yüksek sıcaklık artışlarına ve özellikle devre üzerinde bulunan mosfetin zarar görmesine neden olmaktadır [68]-[70]. Yukarıda anlatıldığı gibi süperkapasitörlerin iç dirençleri çok küçüktür ve deşarj halindeki bir süperkapasitör devreden çok büyük akımlar çekmek isteyecektir. Aşağıdaki tabloda üreticinin piyasaya sürdüğü süperkapasitörlerin karakteristik özellikleri ve eşdeğer seri dirençleri yer almaktadır. Tablo 2.2’de üretici firmaya ait süperkapasitörlerin karakteristik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Üretici firmaya ait süperkapasitörlerin karakteristik özellikleri [32]

Anma Gerilimi (V)	Kapasite Farad (F)	ESR, 1KHz (mΩ)	ESR, DC (mΩ)	LC (72sa) (mA)	Maksimum Sürekli Akım (A)		Maksimum Tepe Akımı (A)	Enerji Yoğunluğu		Ağırlık (g)	Hacim (ml)	Boyut ÇapXYÜseklik (mm)
					$\Delta T=15^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=40^{\circ}\text{C}$		(Wh/kg)	(Wh/L)			
2.5	100	15.0	35.0	0.25	6.0	10.0	27.8	3.62	5.11	24	17	22 × 45
	200	10.0	20.0	0.50	8.0	13.0	50.0	4.13	5.43	42	32	30 × 45
	300	6.0	15.0	0.75	9.5	15.5	68.2	4.20	5.43	62	48	35 × 50
	360	6.0	12.0	0.90	12.0	19.5	84.6	4.17	5.39	75	58	35 × 60
	400	6.0	10.0	1.00	13.0	21.0	100.0	4.63	5.99	75	58	35 × 60
2.7	100	7.0	9.0	0.27	12.5	20.0	71.1	4.82	5.96	21	17	22 × 45
	120	7.0	9.0	0.32	12.5	20.0	77.9	5.28	6.75	23	18	22 × 47
	200	6.0	8.0	0.54	13.0	21.0	103.8	5.33	6.33	38	32	30 × 45
	300	3.5	5.0	0.81	16.0	26.5	162.0	5.33	6.33	57	48	35 × 50
	325	1.8	2.0	0.88	30.0	50.0	265.9	4.39	5.67	75	58	35 × 60
	360	3.0	3.2	0.97	23.0	38.0	225.8	5.13	6.28	71	58	35 × 60
	400	3.0	3.2	1.08	23.0	38.0	236.8	5.70	6.98	71	58	35 × 60
	400	2.8	3.0	1.08	25.0	40.0	245.5	5.06	6.43	80	63	35 × 65
	450	2.8	3.0	1.22	25.0	40.0	258.5	5.18	6.80	88	67	35 × 70
	500	2.9	3.1	1.35	25.0	40.0	264.7	5.69	7.56	89	67	35 × 70
	600	3.0	3.2	1.62	25.0	40.0	277.4	6.75	9.07	90	67	35 × 70
	600	2.8	3.0	1.62	25.0	40.0	289.3	6.08	7.41	100	82	35 × 85

Tablodan görüldüğü üzere 2.7 V 500 F değerindeki süperkapasitörün ESR'si 3.1mΩ'dur. Sistemde 6 adet süperkapasitör seri bağlandığından eşdeğer devre Şekil 2.22'deki gibi olur.



Şekil 2.22. Yedek güç ünitesinde kullanılan süperkapasitörlere ait eşdeğer devre

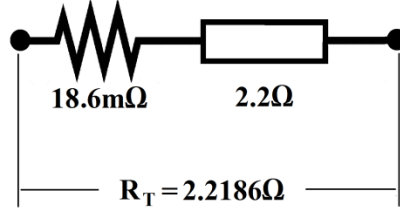
Görüldüğü üzere seri bağlı 6 adet 2.7 V 500 F süperkapasitörünün toplam ESR'si 18.6 mΩ'dur. Süperkapasitörleri şarj eden 250 W'lık DC-DC yükseltici devrenin çıkışı 14.5 V olarak ayarlanmıştır. Giriş kısmı çoğu zaman bir akü üzerinden besleneceği için akım sınırlaması yapmak zorunludur [71]-[74]. Sistemin güçlü bir akım kaynağına bağlanması durumunda çekeceği akım denklem 2.10 ile hesaplanır.

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.10)$$

Bu durumda DC-DC yükseltici çıkışı $U=14.5 \text{ V}$, $R(ESR) = 18.6 \text{ m}\Omega = 0.0186 \text{ }\Omega$ olarak alınırsa akım değeri denklem 2.11'deki gibi bulunmuştur.

$$I = \frac{14.5}{0.0186} = 779.57A \quad (2.11)$$

Süperkapasitörler başlangıçta 779.57 A gibi çok büyük akım değerleri çekmek isteyecektir. Bu sistemin akım sınırlamadan önce çekebileceği maksimum akım değeridir. Bu akımı sınırlamak için 2.2 Ω 100 W değerinde bir seri direnç, süperkapasitör modülünün girişine bağlanacaktır. Bu durumda devrenin eşleniği Şekil 2.23'teki gibi olur.



Şekil 2.23. Süperkapasitör ESR + akım sınırlayıcı direnç eşdeğer devresi

Bu durumda devrenin çekeceği maksimum akım Denklem 2.12'de hesaplanmıştır.

$$I = \frac{14.5}{2.2186} = 6.54A \quad (2.12)$$

Bu akım değeri, 250 W'lık DC-DC yükselticinin çalışma sınırları içerisinde. Süperkapasitörler şarj oldukça bu akım değeri azalarak şarj sonunda sıfır değerini alır.

Şekil 2.24'te yedek güç ünitesinde kullanılan 2.2 Ω 100 W direnç gösterilmiştir.



Şekil 2.24 2.2 Ω 100 W direnç

İkinci akım sınırlama, sistemi Type-C giriş üzerinden şarj eden XL6009 DC-DC yükseltici çıkışına bağlanmıştır. XL6009 DC-DC yükseltici çıkışına PTC (Positive Temperature Coefficient) diye adlandırılan sıcaklıkla direnci değişen ortam etkili direnç kullanılmıştır. Bu giriş üzerinden herhangi bir cep telefonu şarjı bağlanabilecektir, piyasada bulunan cep telefonu şarjları farklı akım ve gerilim değerlerine sahiptir. Çok yüksek akım değerlerine sahip şarj cihazları bulunmaktadır. Dolayısıyla yedek güç ünitesinin bu giriş üzerinden kararlı ve güvenli bir şekilde şarj olabilmesi için 10 Ω 'luk

bir PTC kullanılmıştır. Üzerlerinden geçen akımın etkisi ile sıcaklıkları ve dolayısıyla dirençleri değişerek akımı kontrol altında tutacaklardır. Şekil 2.25'te yedek güç ünitesinde kullanılan PTC gösterilmiştir.



Şekil 2.25. PTC

2.3.11. Daralan Makaron

Yedek güç ünitesi çok yüksek akım değerlerine ulaşabileceğinden, izolasyon hatalarının oluşmaması için bütün eklerde daralan makaron adı verilen malzeme kullanılmıştır. Üzerine uygulanan sıcaklıkla çapları belli bir oranda daralan bir izolasyon elemanıdır. Değişik renk ve çaplarda üretilirler. Sistemde bağlantı eklerinin izolasyonlarının daha güvenli hale getirilmesi için kullanılmıştır. Şekil 2.26'da yedek güç ünitesinde kullanılan daralan makaronlar gösterilmiştir.

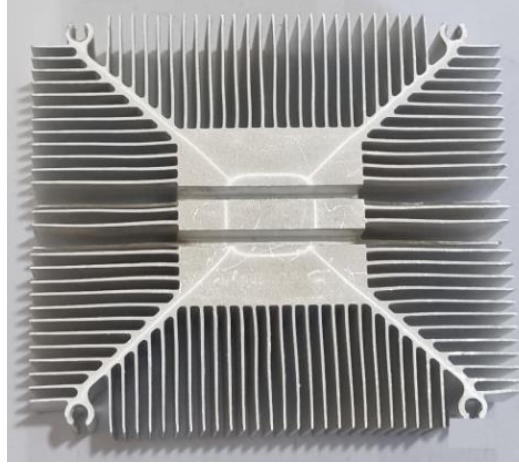


Şekil 2.26. Daralan Makaron

2.3.12. Soğutucu Panel

Elektronik devrelerde oluşan ısıyı dağıtarak sıcaklığın aşırı yükselmesini engeller. Böylece sıcaklık kontrol altında tutulabilir. DC-DC dönüştürücülerde kullanılan mosfetler ve diğer yarı iletken anahtarlama elemanları uzun süre yüksek akımlara maruz kaldıklarında yüksek sıcaklık değerlerine ulaşarak bozulabilirler. Bu devreler yüksek frekanslarda çalıştıklarından sıcaklık artışları kaçınılmaz olabilmektedir. Bu yüzden oluşan ısının dağıtılması önem arz etmektedir. Bu paneller

sayesinde sıcaklık kontrol altında tutulacaktır. Şekil 2.27’de yedek güç ünitesinde kullanılan soğutucu panel gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Yedek güç ünitesinde kullanılan soğutucu panel

2.3.13. DC Barrel Jak

DC barrel jak (2.1mm) yedek güç ünitesini kumanda edecek start butonun, bir erkek fişle sisteme bağlanması için kullanılacaktır. Şekil 2.28’de yedek güç ünitesinde kullanılan DC barrel jak gösterilmiştir.



Şekil 2.28. DC Barrel Jak

2.3.14. Sigorta ve Yuvası (12mm Sigorta Yuvası)

Devre elemanları üzerinden akan akımın, istenen değeri aşması durumunda akımı keserek devre elemanlarını koruyacaktır. Yedek güç ünitesinde 8 A cam sigorta kullanılmıştır. Bu değer sistemin çekeceği maksimum şarj akımı hesaplanarak seçilmiştir. Şekil 2.29’da yedek güç ünitesinde kullanılan sigorta yuvası ve cam sigorta gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Sigorta yuvası ve cam sigorta

2.3.15. USB Type-C Konnektör

Type-C şarj araçlarından sistemin şarj edilmesine olanak sağlar. Bu giriş üzerinden XL6009 DC-DC yükseltici devre beslenecektir. Şekil 2.30’da kullanılan USB Type-C konnektör gösterilmiştir.



Şekil 2.30. USB Type-C konnektör

2.3.16. Akü Maşası ve Bağlantı Kabloları

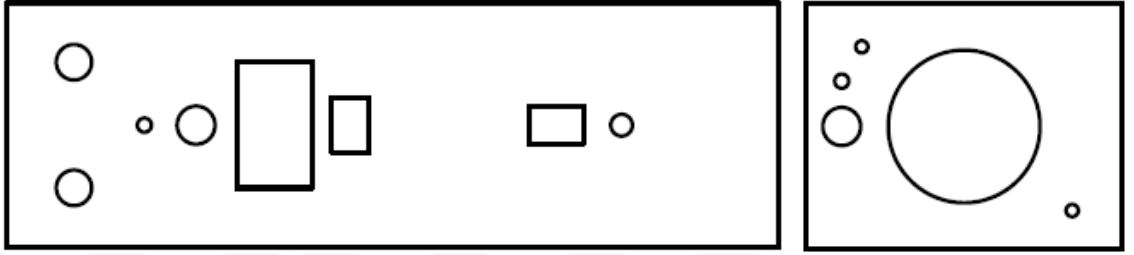
Yedek güç ünitesinin aküye veya bataryalara pratik bir şekilde bağlantısının yapılmasını sağlar. Kabloların bir ucunda bağlantı maşası diğer ucunda born klemense bağlantı için pabuç takılmıştır. Şekil 2.31’de kullanılan akü maşası ve kablosu gösterilmiştir.



Şekil 2.31. Akü maşası ve kablosu

2.4. Yedek Güç Ünitesi Dış Tasarımı

Yedek güç ünitesinin tamamının dış etkenlerden korunması, sistemde kullanılacak elemanların düzgün bir şekilde yerleştirilmesi, bağlantıların kolayca yapılabilmesi ve rahatça taşınabilmesi için sert PVC materyal kullanılmıştır. Bunun için atık su borusu, ısıl işleminden geçirilerek düzleştirilmiş kesilen parçalar bir kutu haline getirilmiştir. Tasarımdan önce sisteme ait yerleşim krokisi AutoCAD programında çizilmiştir. Şekil 2.32’de sistemin yerleşim krokisi ve şekil 2.33’te yedek güç ünitesinin dış tasarımına ait fotoğraflar gösterilmiştir.

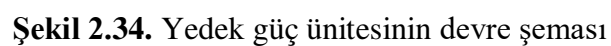


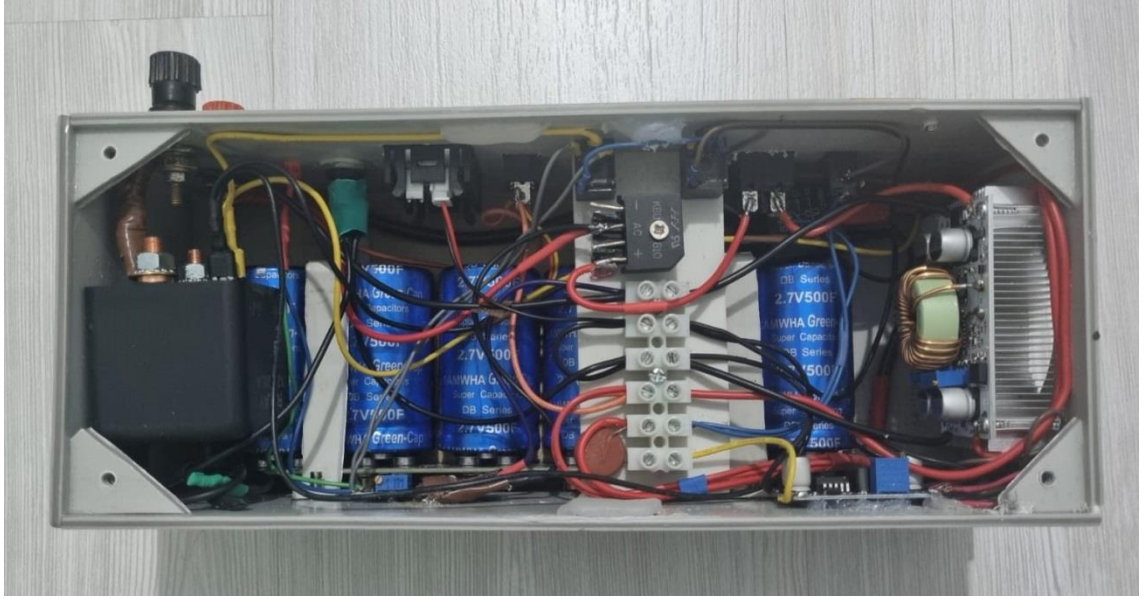
Şekil 2.32. Yerleşim krokisi (üstten ve arkadan görünüm)



Şekil 2.33. Dış tasarımın hazırlanmasına ait resimler

Yedek güç ünitesinde kullanılan tüm elemanların bağlantı şeması Proteus programında çizilmiştir. Şekil 2.34'te yedek güç ünitesine ait devre şeması gösterilmiştir. Sistemin üzerinde yer alan girişler, elemanlar ve anahtarların tanıtılmasına ait görsel şekil 2.35'te verilmiştir.





Şekil 2.37. Süperkapasitörün iç görünüşü

2.6. Tasarlanan Sistemin Çalışma Prensibi

Yedek güç ünitesi 12 V çalışma gerilimine sahip sistemleri besleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. İçerisinde 6 adet seri bağlı 2.7 V 500 F değere sahip süperkapasitör modülü bulunmaktadır. Bu modül maksimum 16.2 V'ta kadar güvenle şarj edilebilir. Toplam kapasitesi yaklaşık 83 F'tır. Modül üzerinde yer alan dengeleme devresi kapasitörlerin gerilimlerini dengede tutarak tüm kapasitörlerin eşit gerilimde çalışmasını sağlayacaktır. Yedek güç ünitesi üzerinde dijital bir voltmetre bulunmaktadır. Şekil 2.36'da Voltmetrenin alt tarafında yer alan 5 numaralı komütatör sayesinde, yedek güç ünitesinin girişindeki gerilim ve kapasitörlerin gerilimi izlenebilecektir. Anahtar 1 konumunda iken giriş gerilimi, 2 konumunda iken süperkapasitörlerin gerilimi görülebilir. Yedek güç ünitesini şarj etmek için 3 ana yöntem bulunmaktadır. Bunlar;

1- Yedek güç ünitesi girişine harici bir kaynak bağlayarak

Şekil 2.36'da yer alan 6 nolu anahtar 1 konumuna alınır. Yedek güç ünitesi girişinde bulunan born klemens aracılığı ile 8-14 V aralığında bir DC kaynak bağlanarak şarj edilebilir. Sistem girişi 250 W gücünde bir DC-DC yükseltici devresine bağlıdır. Ters bağlantıya karşı DC-DC yükseltici girişine bir diyot eklenmiştir. Süperkapasitörler tamamen deşarj olduğunda karakteristikleri gereği kısa devre gibi davranırlar. Bu durumda çekilecek büyük akımlar devreye zarar verebilir. Bunu önlemek için DC-DC yükseltici çıkışına 2.2 Ω 100 W'lık direnç bağlanmıştır. Böylece şarj esnasında akımların yüksek değerlere ulaşması engellenmiştir. Süperkapasitör şarj oldukça,

üzerindeki potansiyel gerilim artacağından şarj akımı azalarak sıfıra doğru inecektir. Sistem girişindeki DC-DC yükseltici çıkışı 14.5 V'ta ayarlanmıştır. Süperkapasitör modülünün gerilimi 14.5 V'ta ulaştığında gerilimler eşitlendiğinden akım geçişi duracak ve şarj sonlanacaktır.

2- Yedek güç ünitesinin besleyeceği kaynaktan şarj edilmesi

Yedek güç ünitesi girişindeki bornlar aracılığı ile ünite bir akü veya batarya gurubuna bağlanabilir. Şekil 2.36'da yer alan 6 nolu anahtar 1 konumuna alınır. Besleme geriliminin 8 V altında olmaması gereklidir. Aksi takdirde dönüştürücünün eşik değeri aşıldığından devrenin kararsız çalışmasına neden olabilir. Kararsız çalışmalar devrede yer alan Mosfet'lerin aşırı ısınıp zarar görmesine neden olmaktadır. Giriş gerilimi voltmetre üzerinden izlenebilir. Şarj seviyesi azalmış bir akü gerilimi 8 V'tun altına inmediği sürece sistemi şarj etmek için yeterli enerjiyi sağlayabilecektir. DC-DC yükseltici süperkapasitör modülünü şarj edebilmek için gerekli olan gerilim seviyesine dönüştürerek süperkapasitörleri şarj edecektir. Süperkapasitör gerilimi de girişteki voltmetre üzerinden izlenebilir. DC-DC yükselticide oluşan sıcaklığın devre elemanlarına zarar vermemesi için dönüştürücü üzerine soğutucu panel eklenmiştir. Önceki yöntemde anlatıldığı gibi DC-DC yükseltici çıkışında yer alan 2.2 Ω 100 W'lık direnç ilk andaki yüksek akımları sınırlayacaktır. Süperkapasitörlere bağlı tüm şarj yolları 8 A değerinde bir cam sigorta ile yüksek akımlara karşı koruma altına alınmıştır.

3- Yedek güç ünitesinin bir cep telefonu şarjı ile şarj edilmesi

Yedek güç ünitesi üzerinde bir Type-C girişi bulunmaktadır. Bu giriş sayesinde Type-C türünde bir cep telefonu şarjı ile şarj olması mümkündür. Yedek güç ünitesinin bu kısmında Type-C girişinde sistemin şarj olduğunu gösteren bir uyarı LED'i ve girişin arkasında XL6009 modüle sahip bir dönüştürücü bulunmaktadır. Type-C girişinden şarj edilirken şarj girişine uygulanan gerilim 5-14 V arasında olabilir. Çıkışı 14.5 V'ta ayarlanmıştır. Daha önceki yöntemlerde anlatıldığı gibi akımın sınırlanması gerekecektir. Burada akımı sınırlamak için bir PTC kullanılmıştır. PTC sıcaklığı arttıkça direnci artan bir eleman olduğundan sistemin akımını sürekli sınırlayacaktır. Şarj esnasında kapasitör gerilimi voltmetre üzerinden izlenebilecektir. Süperkapasitör gerilimi 14.5 V'ta ulaştığında gerilim seviyeleri eşitlendiğinden şarj işlemi kendiliğinden duracaktır.

2.7. Yedek Güç Ünitesinin Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması

Yedek güç ünitesinin enerji yoğunluğu düşük olduğundan sahip olduğu enerjiyi çok kısa sürede transfer edebilecektir. Bu transfer süresi besleyeceği sistemin ihtiyacına göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle yedek güç ünitesi üzerinde 1 adet DC Barrel jak bulunmaktadır. Bu jak üzerinden sisteme bir buton bağlanmıştır. Bu buton sayesinde enerji transferi doğru zamanda yapılabilecektir. Örneğin bir arabaya akü takviyesi yapılacağı zaman, marş motoru çalıştırılmak istenildiğinde butona basılır. Böylece süperkapasitörlerdeki enerjinin, şarjı azalmış aküye geri dönüşü engellenmiş olur.

Şarj anahtarı 1 konumunda iken yani sistem şarj oluyor iken sistemin içinde yer alan röleler vasıtası ile buton yolları pasif duruma geçer. Butonun aktif olabilmesi için şarj anahtarın 0 konumuna alınması yani şarjın sonlandırılması gerekir. Bu bir güvenlik önlemidir, yedek güç ünitesi aynı noktadan hem şarj olma, hem de şarj olduğu sistemi besleyebilme yeteneğine sahiptir. Şarj olma esnasında buton aktif olursa, süperkapasitörün içindeki enerjiyi girişe uygulanacağından akım çok yüksek değerlere ulaşarak DC-DC yükselticinin arızalanmasına neden olacağından, böyle bir güvenlik önlemi alınmıştır.

Şarjlı olan sistemde butona basıldığında sistemdeki güç röleleri devreye girecek ve süperkapasitörlerin sahip olduğu tüm enerji, girişten alınabilecektir.

2.8. Ters Bağlantı Koruması

Yedek güç ünitesi içerisinde, girişteki born klemenslere ters bağlı MT3608 diye adlandırılan bir DC-DC yükseltici devresi bulunmaktadır. Bu DC-DC yükseltici devresinin girişine diyot bağlıdır. Bu sayede giriş doğru bağlantı yapıldığında bu yükseltici devresi enerjilenmez. Yedek güç ünitesinin başka bir sisteme ters bağlantı yapılması durumunda bu yükseltici devresi enerjilenir. Dolayısıyla çıkışa bağlı olan röleyi ve ters bağlantı LED'ini enerjilendirir. Çıkışa bağlı olan röle sayesinde yedek güç ünitesindeki kontrol elemanlarını devre dışı bırakarak, ters bağlantıdan dolayı oluşabilecek sorunlar engellenmiş olur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Süperkapasitörlerin sağladığı avantajlar nedeniyle portatif kullanıma uygun bir yedek güç ünitesi cihazına yönelik üretim yapılmıştır.

3.1. Düşük Güç Yoğunluğunun, Yüksek Güç Yoğunluğuna Dönüştürülmesi

Tasarlanan yedek güç ünitesi (Süperkapasitör), 3 adet seri bağlı 18650 kodlu 2000 *mAh* Li-ion batarya ile 250 *W*'lık DC-DC dönüştürücü üzerinden şarj edilmiştir. 18650 2000 *mAh* bataryaların üretici verileri incelendiğinde, üretici firmalara göre farklılıklar olduğu, ortalama tepe akımlarının 15 *A*, nominal gerilimlerinin 3.65 *V* olduğu görülmüştür. Bu bataryaların ağırlığı yaklaşık 45 *g*'dir [75]. 3 adet 18650 batarya seri bağlandığında nominal gerilim 10.95 *V* toplam ağırlık yaklaşık 135 *g* (0.135 *kg*) olmaktadır. Bu durumda sistemin güç yoğunluğunu Denklem 3.1 ile hesaplanır.

$$\text{Güç Yoğunluğu} = \frac{\text{Anlık Olarak Sağlanan Güç}(W)}{\text{Kütle}(kg)} \quad (3.1)$$

Anlık olarak sağlanan güç maksimum güçtür. Maksimum güç Denklem 3.2 ile bulunur.

$$P_{max} = U \cdot I_{max} \quad (3.2)$$

$$P_{max} = (10.95) \cdot (15) = 164.25 \text{ W} \quad (3.3)$$

$$\text{Güç Yoğunluğu} = \frac{164.25}{0.135} \cong 1217 \text{ W/kg} \quad (3.4)$$

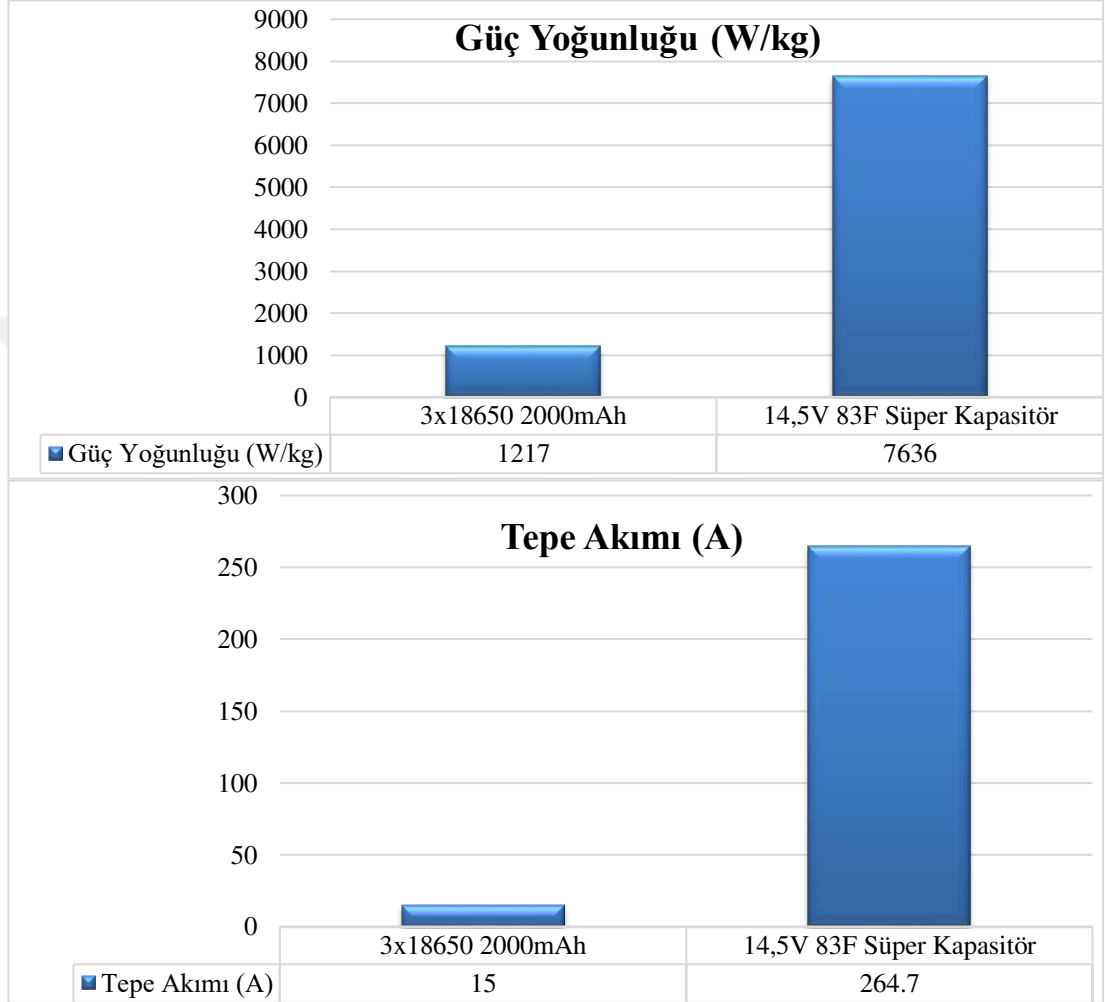
olarak bulunur.

Tasarlanan yedek güç ünitesi bu bataryalar ile şarj edilmiştir. Şarj işlemi sonunda süperkapasitörlerin gerilimi 14.5 *V*'tur. Üretici kataloğunda yer alan maksimum tepe akımı 264.7 *A*'dir. Süperkapasitör modülünün toplam ağırlığı yaklaşık 500 *g* (0.5 *kg*)'dır. Bu durumda süperkapasitörlerin güç yoğunluğu bulmak için önce maksimum güç denklem 3.3 ile ve güç yoğunluğu Denklem 3.4 ile hesaplanır.

$$P_{max} = (14.5) \cdot (264.7) = 3838.15 \text{ W} \quad (3.3)$$

$$\text{Güç Yoğunluğu} = \frac{3818.15}{0.5} \cong 7636 \text{ W/kg} \quad (3.4)$$

Yedek güç ünitesi seri bağlı 3 adet 18650 batarya ile şarj edilerek güç yoğunluğu $1217W/kg$ 'dan $7636W/kg$ 'a yükseltilmiş olur. Yedek güç ünitesi sayesinde bu örnekte tepe akımı $15A$ 'den $264.7 A$ yükseltilmiş olur. Şekil 3.1'de seri bağlı 3 adet 18650-2000 mAh batarya ile $14.5 V$ $83 F$ süperkapasitörün güç yoğunlukları ve tepe akımlarının karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.

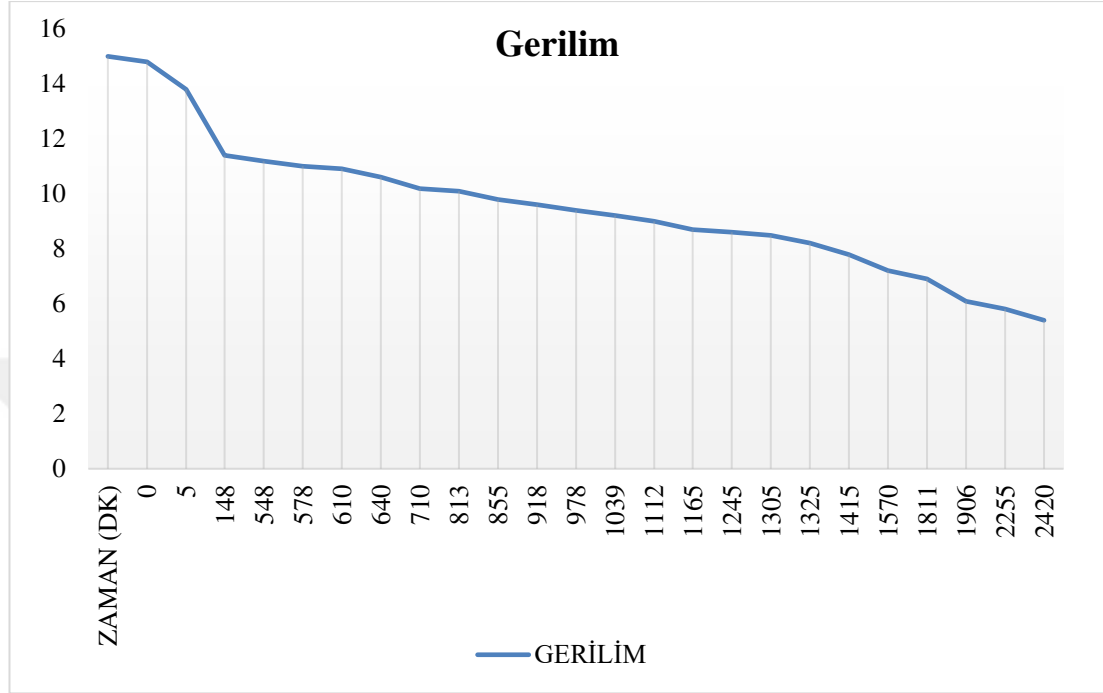


Şekil 3.1. 3x18650 batarya ile $14.5 V$ $83 F$ süperkapasitörün güç yoğunluğu ve tepe akımlarının karşılaştırılması

Grafikten de görüldüğü üzere yedek güç ünitesi, düşük güç yoğunluğuna sahip bataryalardan süperkapsitörleri şarj ederek, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek tepe akımları elde etmektedir. Bu sayede herhangi bir sistemin ihtiyacı olan yüksek tepe akımları karşılanabilir.

3.2. Süperkapasitörlerin Şarj Edilmesi

Süperkapasitör modülü 15 V'ta kadar şarj edildikten sonra üzerinde herhangi bir yük yok iken, tamamen boşta 40 saat boyunca gözlem yapılmıştır. Modülün beklemededeşarj kayıpları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Süperkapasitörün beklemededeşarj kayıpları

Deney sırasında voltmetre ile değişik zaman aralıklarında ölçümler yapılmıştır, yapılan ölçümlerde voltmetrenin harcadığı enerji çok küçük olduğundan dikkate alınmamıştır. Gözlem sonunda süperkapasitörlerin toplam gerilimi 5.4 V olarak kaydedilmiştir.

Süperkapasitörler 15 V değerine şarj edildiğinde sahip olduğu enerji miktarı Denklem 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$E = \frac{1}{2}(83)(15)^2 \cong 9338 \text{Ws'dir.} \quad (3.5)$$

24 saat sonunda gerilim 7.7 V olarak ölçülmüştür. Bu durumda enerji miktarı Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır.

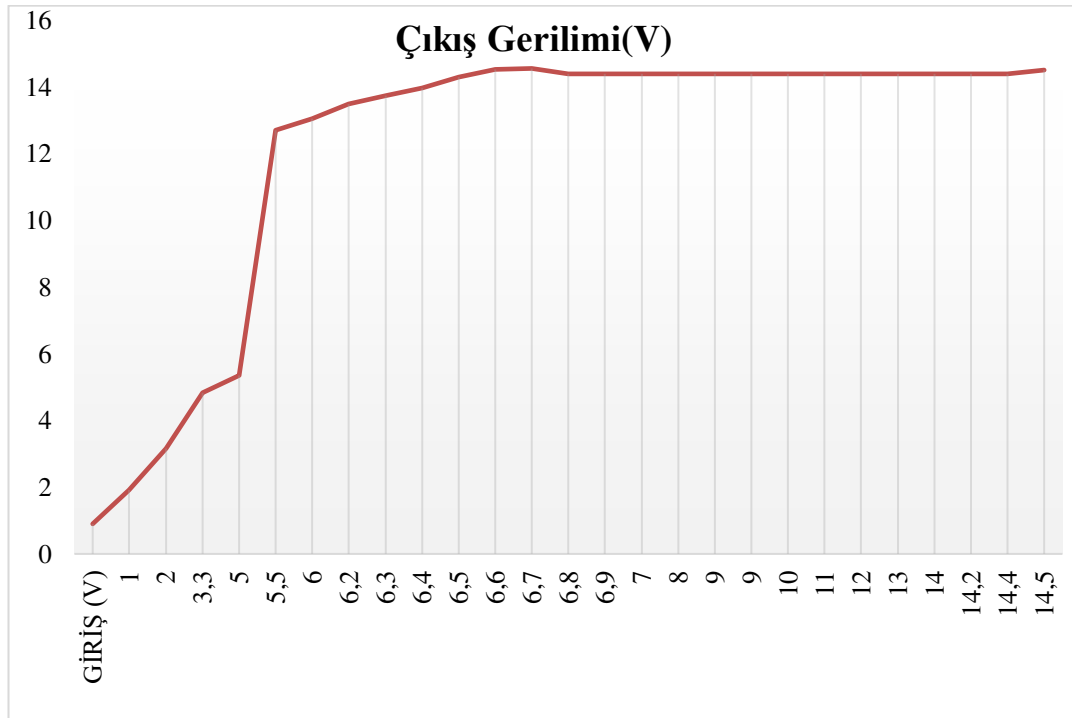
$$E = \frac{1}{2}(83)(7.7)^2 \cong 2461 \text{Ws olarak bulunur.} \quad (3.6)$$

Bu durumda süperkapasitörün 24 saatte sahip olduğu enerjinin yaklaşık %73.6'sını kaybettiği görülmüştür.

Görüldüğü üzere süperkapasitörlerde beklemede deşarj kayıpları fazladır. Elektrokimyasal depolama türlerine kıyasla sahip oldukları enerjiyi uzun süre muhafaza etmekte yetersizdirler.

3.3. Yedek Güç Ünitesinin 250 W DC-DC Yükseltici Üzerinden Şarj Edilmesi

Dönüştürücü değişik gerilim değerlerinde test edilmiştir. Giriş çıkış gerilimi grafiği Şekil 3.3’de yer almaktadır. Grafikten görüleceği üzere dönüştürücü giriş gerilimi yaklaşık 6.8 V’tan daha büyük olursa gerilimin sabitlendiği gözlenmiştir. Sistemin kararlı çalışabilmesi için giriş geriliminin 6.8 V ve üzeri ve çıkış geriliminin giriş geriliminden büyük bir değere ayarlı olması gerekmektedir. Devre üzerinde yer alan potansiyometreler ile çıkış gerilimi ayarlanabilmektedir. Ayrıca akım ayarı için bir potansiyometre bulunmaktadır ve bu potansiyometre ile akım ayarı yapılabilmektedir. Şekil 2.9’da yer alan devre şemasında R19 adlı 0.01 Ω değerindeki direnç, şönt direnç olarak kullanılmıştır. Bu direnç üzerinden geçen akım değiştikçe üzerindeki gerilim düşümü de değişeceğinden devre akım hesabı yapabilmektedir. Ancak DC-DC yükselticinin çıkışı kısa devre olduğunda akım ayarı yapılamamaktadır. Süperkapasitörler tam deşarj durumundayken DC-DC yükselticiye bağlandığında kısa devre gibi davrandığından akım ayarı yapılmasına olanak tanımamaktadır. Bu nedenle akımı sınırlamak için farklı önlemler alınmalıdır. Şekil 3.3’de kullanılan 250 W DC-DC yükseltici devreye ait giriş çıkış gerilim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3. 250 W DC-DC yükseltici devreye ait giriş çıkış gerilimi grafiği

250 W'lık DC-DC yükselticinin girişine ters bağlantı koruması için bir diyot eklenmiştir. Kullanılan diyot silisyum diyot olduğundan üzerinde yaklaşık 0.7 V'luk bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Diyot eklendikten sonra yapılan ölçümlerde 250 W'lık DC-DC yükselticinin eşik değerinin 7.5 V olduğu ölçülmüştür. Bu durumda giriş geriliminin en az 7.5 V ve üzeri olması gerekmektedir.

Süperkapasitörler tamamen deşarj durumunda iken akım ayarlı bir güç kaynağı üzerinden sabit akım ile 250 W'lık DC-DC yükseltici üzerinden şarj edilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Giriş gerilim değeri 7.5 V akım değeri 5 A ile sınırlandırıldığında sistem tam şarj değeri olan 14.5 V'ta ulaşmış şarj işlemi kendiliğinden sona ermiştir. DC-DC yükseltici çıkış değeri 14.5 V olduğundan, süperkapasitör gerilimi bu değere ulaşınca gerilim değerleri eşitlendiğinden şarj işlemi sonlanmıştır. Şarj işlemi yaklaşık 6 dakika sürmüştür. Akım sınırlaması yapılmadığında, akım değerinin devrelerinin akım sınırını aştığı görülmüştür.

Girişe güçlü bir akım kaynağı olan 12 V 60 Ah tam şarjlı bir akü bağlanmış ve akım sınırlama elemanları ve sigorta devre dışı bırakılmıştır. Şarj işlemi başladığında 250 W DC-DC yükseltici üzerindeki mosfet zarar görmüştür. Akım çok yüksek değerlere ulaştığından ölçülememiştir.

Giriş yine 12 V, 60 Ah tam şarjlı bir akü üzerinden beslenerek akım sınırlama elemanı olan 2.2 Ω 100 W direnç devrede iken işlem tekrarlanmıştır. Kapasitörler tam deşarjlı iken şarj işlemi başlatılmış ve girişten çekilen akım 3.86 A olarak ölçülmüştür. Devrede akım sınırlama elemanı olarak kullanılan 2.2 Ω , 100 W değerindeki direnç akımı sınırlamakta yeterlidir.

Süperkapasitörler çok hızlı bir şekilde şarj olabilmektedir. Daha güçlü bir DC-DC yükseltici kullanılması durumunda daha yüksek akım değerlerine çıkılarak şarj olma süresi kısaltılabilir.

3.4. Sistemin Type-C Giriş Üzerinden Cep Telefonu Şarjı İle Şarj Edilmesi

Süperkapasitörler tamamen deşarj durumda iken 5 V 2 A değerlere sahip bir cep telefonu şarjı ile sistem içinde yer alan XL6009 modülü üzerinden şarj işlemi başlatılmış ve süperkapasitörlerin 14.5 V seviyesine kadar şarj olduğu gözlenmiştir.

Kullanılan PTC akımı sınırlamak için yeterlidir. Şarj işlemi yaklaşık 4 saat (236 dakika) sürmüştür.

Bu süre daha güçlü DC-DC yükseltici devreler ve daha güçlü şarj cihazları kullanılarak kısaltılabilir.

Yedek güç ünitesi farklı kaynaklar üzerinden şarj olabilmektedir.

3.5. Yedek Güç Ünitesinin Test Edilmesi

Tasarlanan yedek güç ünitesi, yüksek akım gerektiren marş motorları üzerinde test edilmiştir. Bu amaçla yedek güç ünitesi Toyota marka, CH-R model bir araç üzerinde marş motorunu çalıştırmak için kullanılmıştır. Araç 1.2 Turbo benzinli motora sahiptir. Bu aracın marş motoruna ait teknik verilere ulaşılamamıştır. Ancak Tablo 1.1'den görüleceği üzere 1200 cc motor hacmine sahip benzinli motorlar için deneysel olarak hesaplanan marş motoru güçlerinin 0.565 kW ile 0.936 kW arasında değiştiği görülmektedir. Marş motorun bu değerler arasında olduğu kabul edilirse çekeceği akım maksimum 78 A olarak hesaplanır. Ancak bu akım değeri marş motoru tam devrine ulaştığında çekilen akım değeridir. Giriş kısmında anlatıldığı gibi elektrik motorları kalkış esnasında nominal akım değerlerinden daha büyük akım çekerler. Marş motoru yük altında çalışan bir motor olduğundan ilk hareketi esnasında hesaplanan akım değerlerinden daha büyük akıma ihtiyaç duyacaktır. Yedek güç ünitesinin araç üzerinde test edilmesine ait görseller Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Yedek güç ünitesinin araç üzerinde test edilmesi

Test/ölçüm işlemi farklı değerlerde 3 defa tekrarlanmıştır.

İlk ölçümde, araca ait akü gerilimi 11.8 V'tur ve marş motoru devreye girmemektedir. Araçta bulunan akü koruma modu (akü şarjının belli bir seviyenin altına inmesini önleyen sistem) devreye girmekte ve araç çalışmamaktadır. Tasarlanan yedek güç ünitesi araç aküsüne bağlanmadan önce kapasitörlerin 6.2 V değerine kadar şarjlı olduğu ölçüldü, deneyin yapıldığı esnada ortam sıcaklığı 18 °C'dir. Yedek güç ünitesi bu akü üzerinden şarj edilmeye başlandı. Şarj işlemi sonlandırıldığında kapasitör gerilimi 14.5 V ve akü gerilimi 11.2 V olarak ölçüldü. Butona basılıp marş yapıldığında aracın başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Çalışma sonunda kapasitör gerilimi 10.2 V olarak ölçülmüştür.

2. ölçümde araca ait akü gerilimi 10.9 V'tur ve marş motoru devreye girmemektedir. Araçta bulunan akü koruma modu devreye girmekte ve araç çalışmamaktadır. Tasarlanan yedek güç ünitesi araç aküsüne bağlanmadan önce kapasitörlerin 8.5 V değerine kadar şarjlı olduğu ölçüldü, deneyin yapıldığı esnada ortam sıcaklığı 18 °C'dir. Yedek güç ünitesi bu akü üzerinden şarj edilmeye başlandı. Şarj işlemi sonlandırıldığında kapasitör gerilimi 14.5 V ve akü gerilimi 8.1 V olarak ölçüldü. Butona basılıp marş yapıldığında aracın başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Çalışma sonunda kapasitör gerilimi 9.8 V olarak ölçülmüştür.

3. ölçümde araca ait akü gerilimi 6.8 V'tur ve marş motoru devreye girmemektedir. Araçta bulunan akü koruma modu devreye girmekte ve araç çalışmamaktadır. Tasarlanan yedek güç ünitesi araç aküsüne bağlanmadan önce kapasitörlerin 7.3 V değerine kadar şarjlı olduğu ölçüldü, deneyin yapıldığı esnada ortam sıcaklığı 18 °C'dir. Yedek güç ünitesi bu akü üzerinden şarj edilmeye başlandı. Akü gerilimi eşik değerinden küçük olduğundan şarj işlemi başlamamıştır. Yedek güç ünitesi cep telefonu şarjı ile şarj edildikten sonra tekrardan aküye bağlanmış, butona basılıp marş yapıldığında aracın başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Çalışma sonunda kapasitör gerilimi 10.5 V olarak ölçülmüştür.

Test/ölçüm aşamasında yedek güç ünitesi aküye ters bağlanmış ve ters bağlantı korumasının çalıştığı görülmüştür. Ters bağlantı esnasında yedek güç ünitesi üzerinde yer alan MT3608 DC-DC yükseltici üzerinden beslenen röle ve ters bağlantı LED'i devreye girmiş ve bu esnada tüm kontrol elemanları bağlı olduğu röle üzerinden devre dışı kalmıştır.

Tasarlanan yedek güç ünitesi şarj seviyesi azalmış akü üzerinden şarj olarak aküde bulunan düşük güç yoğunluğunu, yüksek güç yoğunluğuna dönüştürüp marş motorunun ihtiyacı olan akımı karşılayabilmiştir. Akünün şarj seviyesinin çok düşük olduğu durumlarda harici kaynaktan şarj olarak yüksek akımları karşılayabilmiştir. Sistem şarj olduğu esnada akım sınırlama elemanları akımı sınırlayarak sistemdeki devrelerin zarar görmesini engellemiştir. Sistemde alınan ters bağlantı güvenlik önlemi başarılıdır.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şarj seviyesi azalmış veya kapasitesi yetersiz bir elektrokimyasal depolama sisteminde yer alan enerji DC-DC yükseltici devreler aracılığı ile uygun bir süperkapasitörü şarj etmek için kullanılarak yüksek güç yoğunluğuna dönüştürülebilir. Bu sayede ihtiyaç duyulan yüksek akımlar elde edilir.

Bu tez çalışmasında yüksek güçlerin kısa süreli olarak karşılanabilmesi için süperkapasitörlü, taşınabilir bir güç ünitesi tasarlanmıştır. Yedek güç ünitesi şarjı veya güç kapasitesi çok fazla azalmış (kullanılamaz-bitmek üzere iken) bir batarya-aküden beslenerek DC-DC yükselticiler sayesinde şarj edildiğinde bataryada yer alan yüksek enerji yoğunluğunu, yüksek güç yoğunluğuna dönüştürülmüştür.

3x18650 tip batarya için mevcut güç yoğunluğu 1217 W/kg değerinden 14.5V-83F kapasiteli süperkapasitör sayesinde 7636 W/kg değerine yükseltilerek, 6419 W/kg kazanç sağlanmıştır. Süperkapasitör kullanımıyla güç yoğunluğu açısından 5.27 kat artış sağlanmıştır. Yine 3x18650 tip batarya için mevcut tepe akımı 15 A değerinden 14.5V-83F kapasiteli süperkapasitör sayesinde 264.7 A değerine yükseltilerek, 249.7 A kazanç sağlanmıştır. Yani tepe akımında 16.64 kat artış görülmüştür. Yedek güç ünitesi sayesinde tepe akımı 15A'den 264.7 A'e yükseltilmiştir.

Süperkapasitörlerin sayısı ve kapasitesi artırılarak daha yüksek güç ve akım değerleri elde edilebilir. Süperkapasitörlerin hacimlerine oranla enerji yoğunlukları düşüktür. Yüksek güç ve akım kapasiteli süperkapasitörler tasarlanmak istendiğinde boyutlar çok büyüyecektir. Süperkapasitörler sahip oldukları yüksek güç yoğunluğu sayesinde, yüksek akım ihtiyacına olumlu cevap vermektedirler. Süperkapasitörlerin iç dirençleri çok küçük olduğundan çok kısa sürede şarj olabilirler ve sahip oldukları enerjiyi çok kısa sürede transfer etme yeteneğine sahiptirler. İç dirençlerinin küçük olması ve tam deşarj durumunda iken potansiyel enerjileri sıfır olduğundan, bir kaynaktan şarj edildiklerinde kısa devre gibi davranırlar ve beslendikleri sistemden çok büyük akımlar çekmek isterler. Bu tür aşırı akımların elektronik elemanlara/cihazlara zarar vermemesi için akımın sınırlanması gerekir. Akımları sınırlamak için akım sınırlama devreleri veya dirençler kullanılır.

Süperkapasitörler besledikleri cihazların ihtiyacı olan yüksek güçleri karşılamada oldukça başarılıdır. Enerji yoğunluklarının düşük olması bu gücün kısa süreli olmasına neden olmaktadır. Süperkapasitörlerin ve elektrokimyasal depolama

sistemlerinin birlikte kullanılması elektrokimyasal depolama sistemlerinin daha uzun ömürlü olmalarını sağlar.

Süperkapasitörler yüksek şarjdeşarj döngülerine sahip olmaları, kısa sürede şarj olabilmeleri, sahip oldukları enerjiyi hızlı transfer edebilmeleri, ortam sıcaklıklarından etkilenmemeleri, uzun süre kullanılsalar bile bozulmaya uğramamaları gibi özellikleri ile sistemlerin ihtiyacı olan yüksek güçleri kısa süreli olarak karşılamada oldukça başarılıdır. Deşarj kayıplarının fazla olması (sahip oldukları enerjiyi uzun süre muhafaza edememeleri) elektrokimyasal depolama ürünlerinin yerini almasına olanak tanımamaktadır. Ancak elektrokimyasal depolama ürünleri ile birlikte yardımcı kaynak olarak kullanılabilirler.



KAYNAKLAR

- [1] C. Emeksiz ve B. Kara, "Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (IJMSIT)*, cilt 6, sayı 2, ss. 134-142, 2022. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijmsit>. (Erişim zamanı Mart 1, 2024)
- [2] H. A. Kiehne, *Battery Technology Handbook*, 2. baskı. New York, Basel: Marcel Dekker Inc, 2003.
- [3] "Süper kapasitör," https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCper_kapasit%C3%B6r (Erişim zamanı Mart 5, 2024)
- [4] E. Torun ve E. Buyruk, "Lityum İyon Pillerde Farklı Deşarj Hızlarında Oluşan Sıcaklık Profillerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması," *OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (OKU Journal of Natural and Applied Sciences)*, cilt 7, sayı 2, ss. 622-637, 2024, doi: 10.47495/okufbed.1368176.
- [5] A. Keleşoğlu, S. Kocaoğlu, M. Yöntem, S. Çağlar, İ. N. Aydın, E. Bayır, C. Yılmaz, E. Yenilmez Demirel ve Ü. Ünver, "Elektrik Motorlarında Enerji Sınıfları Arası Tüketim Farklılıkları ve Verimlilik Artırıcı Metotlar," *Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi*, cilt 1, sayı 35, ss. 1-15, 2023, doi: 10.47118/somatbd.1238976.
- [6] "Akü Takviyesi Nasıl Yapılır," <https://www.inciaku.com/tr/bilgi-merkezi/aku-takviyesi-nasil-yapilir/> (Erişim zamanı Temmuz 12, 2024)
- [7] M. Kozak ve Ş. Kozak, "Enerji Depolama Yöntemleri," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi (UTBD)*, cilt 4, sayı 2, ss. 17-29, 2012.
- [8] S. Özbektaş, M. C. Şenel ve B. Sungur, "Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri," *Mühendis ve Makina*, cilt 64, sayı 711, ss. 317-351, 2023.
- [9] E. Taşkesen, H. Alahmad ve E. N. Bilen, "Geleceğin enerji depolama teknolojileri, sürdürülebilirlik ve enerji dönüşümü," *Mühendis ve Makina*, cilt 65, sayı 714, ss. 1-26, 2024.

- [10] “Kondansatör Nedir? Ne İşe Yarar?” <https://www.ent.es.com.tr/kondansator-nedir-nerelerde-kullanilir/> (Erişim zamanı Eylül 10, 2024)
- [11] A. Nishino, "Capacitors: operating principles, current market and technical trends," *Journal of Power Sources*, vol. 60, no. 2, pp. 137–147, 1996.
- [12] C. Özada, M. Ünal, ve M. Yazıcı, "Süperkapasitör: Temelleri ve malzemeleri," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi (GUMMFD)*, cilt 39, sayı 2, ss. 1315-1332, 2023, doi: 10.17341/gazimmfd.1141220.
- [13] W. J. Sarjeant, J. Zirnheld, and F. W. MacDougall, "Capacitors," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, no. 5, pp. 1368–1392, 1998.
- [14] R. Boylestad, *Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi*. Ankara: MEB Yayınları, 1994.
- [15] W. H. and J. E. Kemmerly, *Engineering Circuit Analysis*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [16] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2014.
- [17] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 7th ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2017.
- [18] M. S. Halper and J. C. Ellenbogen, "Supercapacitors: A Brief Overview," MITRE Nanosystems Group, MP 05W0000272, Virginia, USA, 2006.
- [19] Liu, W., X. Sun, X. Yan, Y. Gao, X. Zhang, K. Wang, and Y. Ma, "Review of energy storage capacitor technology," *Batteries*, vol. 10, no. 8, p. 271, 2024.
- [20] R. C. Dorf and J. A. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits*, Wiley, 2010.
- [21] W. Sarjeant, "Capacitors," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 861–922, 1990.
- [22] J. Torki, C. Joubert, and A. Sari, "Electrolytic capacitor: Properties and operation," *Journal of Energy Storage*, vol. 58, p. 106330, 2023.
- [23] Y. Freeman and P. Lessner, "Evolution of polymer tantalum capacitors," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 12, p. 5514, 2021.

- [24] M. Saleem, M. A. Ansari, Jyotsana, and A. K. Saxena, "Study of standard mica capacitors with respect to time and temperature," *Mapan*, vol. 28, pp. 25–29, 2013.
- [25] N. Perrella, "Tiny trimmers target tunable requirements: these chip-sized variable capacitors provide circuit designers with a moderate tuning range without having to sacrifice the size and convenience of a conventional trimmer capacitor," *Microwaves & RF*, vol. 47, no. 8, pp. 106–107, 2008.
- [26] R. Natarajan, *Power System Capacitors*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [27] Maxwell Technologies. (2009). BOOSTCAP® Ultracapacitors Product Guide Datasheet (Doc. No. 1014627.1). ABD, California: Maxwell Technologies.
- [28] A. Schneuwly and R. Gallay, "Properties and applications of supercapacitors – from the state-of-the-art to future trends," in *PCIM200 Conf. Records*, Nürnberg, Germany, 2000, pp. 1-10.
- [29] "Ultracapacitor Overview," <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/> (Erişim zamanı Mayıs 16, 2024)
- [30] E. Karaca, "Süperkapasitör enerji depolama uygulamaları için nano-boyutlu metal oksit içeren polipirrol esaslı kompozit malzemelerin elektrokimyasal sentezi," Doktora tezi, Fen Bil. Ens., Hacettepe Üniv., Ankara, Türkiye, 2019.
- [31] P. Simon, "Supercondensateurs : Principes et Evolutions," Toulouse, 2011.
- [32] "Green-cap(EDLC)," https://www.samwha.co.kr/electric_eng/1001.asp (Erişim zamanı: Haziran 10, 2024)
- [33] A. Vlad, N. Singh, J. Rolland, S. Melinte, P. M. Ajayan, and J. F. Gohy, "Hybrid supercapacitor-battery materials for fast electrochemical charge storage," *Sci.Rep.*, 2014.
- [34] P. Yu et al., "Battery–supercapacitor hybrid energy storage system for wind power suppression based on the turbulence model of wind speed," *vol.* 2018.
- [35] G. Z. Chen, "Supercapacitor and supercapattery as emerging electrochemical energy stores," *International Materials Reviews*, vol. 62, no. 4, pp. 173–202, 2017.

- [36] M. Yenigün and Z. Utlu, "Elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi," *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 692, pp. 35–47, 2018.
- [37] B. Kocaman, *Enerji Depolama Teknolojileri*. Ankara: İksad, 2021.
- [38] C. Emeksiz ve B. Kara, "Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi", *IJMSIT*, c. 6, sy. 2, ss. 134–142, 2022.
- [39] J. Jung, L. Zhang, J. Zhang, *Lead-acid Battery Technologies: Fundamentals, Materials, and Applications*, CRC Press, 2015.
- [40] N. Kotkunde, K. V. A. Ashwin, A. Gosavi, and M. Gaur, "Life cycle assessment of nickel cadmium battery," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1123, pp. 1–11, 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1123/1/012022.
- [41] T. Müller and B. Friedrich, "Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 158, pp. 1498–1509, 2006. doi: [10.1016/j.jpowsour.2005.10.046](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.046).
- [42] A. Özdemir, "TÜRKİYE’DE LI-ION PİL ÜRETİMİ YATIRIMLARI", *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 10, sy. 19, ss. 79–86, 2023, doi: 10.54365/adyumbd.1287578.
- [43] D. A. Howey and S. M. M. Alavi, "Rechargeable battery energy storage system design," in *Handbook of Clean Energy Systems*, J. Yan, Ed., vol. 5, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2015, pp. 2801–2819.
- [44] H. Pehlivan, E. Öz, and M. Yıldırım, "Lityum iyon pillerin tarihten bugüne gelişimi ve son teknolojiye geline nokta," *Journal of Anatolian Physics and Astronomy*, vol. 3, no. 2, pp. 83–94, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14344328>
- [45] B. Fıçıcılar and B. Duman, "Synthesis and Characterization of Mn₃O₄ Doped Modified Electrodes for Vanadium Redox Flow Batteries", *KUJES*, vol. 5, no. 2, pp. 71–82, 2019.
- [46] B. Tamyürek ve D. K. Nichols, "Performance Analysis Of Sodium Sulfur Battery In Energy Storage And Power Quality Applications", *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg*, c. 17, sy. 1, ss. 99–115, 2004.

- [47] "Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri," <https://www.mmo.org.tr/istanbul/haber/elektrik-enerjisi-depolama-sistemleri-i/>, (Erişim Tarihi: Aralık 11, 2024).
- [48] Ç. Tařdemirci ve A. Özkan, "Ultra Kapasitör Kullan Elektrikli Araç ve şarj İstasyonu Tasarımı ve Efektif Durumunun Araştırılması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi (DÜBİTED)*, cilt 9, sayı 2, ss. 712-722, 2021, doi: 10.29130/dubited.840542.
- [49] M. Kozak and ř. Kozak, "ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ", *IJTS*, vol. 4, no. 2, pp. 17–29, 2012.
- [50] B. Bodur, *Güç Elektroniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2010.
- [51] D. W. Hart, *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [52] H. Köseni ve A. B. Yıldız, "Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün genelleştirilmiş düğüm denklemleri ile analizi," *Politeknik Dergisi*, cilt. 22, sayı. 1, ss. 179–184, 2019, doi: 10.2339/politeknik.403992.
- [53] N. H. Baharudin, T. M. N. T. Mansur, F. A. Hamid, R. Ali, and M. I. Misrun, "Performance analysis of DC-DC buck converter for renewable energy application," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1019, no. 1, p. 012020, Jun. 2018.
- [54] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng, and A. Valderrabano, "A DC–DC multilevel boost converter," *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 129-137, Jan. 2010.
- [55] P. Andrade, A. N. Alcaso, F. Bento, and A. J. Marques Cardoso, "Buck-Boost DC-DC Converters for Fuel Cell Applications in DC Microgrids—State-of-the-Art," *Electronics*, vol. 11, no. 23, p. 3941, Dec. 2022.
- [56] G. Sonugür, "DA Motor Kontrolünde Veri Güdümlü ve Model Tabanlı Yöntemlerin Ani Yük Deęiřimlerine Karşı Tepkilerinin Analizi," *Politeknik Dergisi*, cilt 27, sayı 5, ss. 1721-1732, 2024, doi: 10.2339/politeknik.1326256.
- [57] R. Bayır ve Ö. Bay, "Marş Motoru Akım Sinyalleri Wavelet Analiz Sonuçlarının Bulanık Mantık ile Sınıflandırılarak Arıza Tespiti," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi (GUMMFD)*, cilt 22, sayı 2, 2013.

- [58] J. Doe, *The Evolution of Starter Motors in Automotive Engineering*, 3. baskı. New York: Springer, 1980.
- [59] K. Erşan ve K. Önsoy, “BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTORLARDA (B.A.M.) MARŞ MOTORU GÜCÜNÜN MOTOR HACMİNİN FONKSİYONU OLARAK TANIMLANMASI”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi (GUMMFD)*, c. 25, sy. 2, 2013.
- [60] B. M. Weedy, *Electric Power Systems*, 5th ed. Chichester, UK: Wiley, 2002.
- [61] J. R. Miller and P. Simon, "Supercapacitors: A Brief Overview," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 5-12, 2017.
- [62] T. Ozturk, "Design of a New Parallel-Plate Capacitor to Increase the Capacity Value," *Academic Platform-Journal of Engineering and Science (APJES)*, vol. 7, no. 1, pp. 168–173, 2019, doi: 10.21541/apjes.424663.
- [63] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education, 2005.
- [64] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2007.
- [65] W. R. Hunter, "Semiconductor Diodes and Their Applications," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-18, no. 3, pp. 249-257, Mar. 1971.
- [66] M. S. Cengiz and C. Cengiz, “NUMERICAL ANALYSIS OF TUNNEL LED LIGHTING MAINTENANCE FACTOR,” *IIUMEJ*, vol. 19, no. 2, pp. 154–163, Dec. 2018. doi: [10.31436/iiumej.v19i2.1007](https://doi.org/10.31436/iiumej.v19i2.1007).
- [67] S. Rüstemli and M. S. Cengiz, “ACTIVE FILTER SOLUTIONSIN ENERGY SYSTEMS,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 23, no. 6, pp. 1587–1607, Nov. 2015.
- [68] M. S. Cengiz and S. Rüstemli, “Passive filter solutions and simulation performance in industrial plants,” *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 39–43, Dec. 2016. doi: [10.17678/beujst.94574](https://doi.org/10.17678/beujst.94574).
<https://doi.org/10.3906/elk-1402-21>

- [69] S. Rüstemli, F. Dinçer, M. Çelik, and M. S. Cengiz, "Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt: 2, Sayı. 2, s. 141–147, 2013
- [70] M. Kaynaklı, O. Palta, and C. Cengiz, "Solar Radiation and Temperature Effects on Agricultural Irrigation Systems," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 53–58, 2018.
- [71] S. B. Efe and D. Varhan, "INTERIOR LIGHTING OF A HISTORICAL BUILDING BY USING LED LUMINAIRES: A CASE STUDY OF FATİH PAŞA MOSQUE," *Light & Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 77–83, 2020.
- [72] S. B. Efe, "UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 116, no. 3, pp. 391–406, 2018.
- [73] C. Cengiz, "Relationship of Braking Distance and Rear Headlight on Highways," *Light and Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 29–36, 2024.
- [74] C. Cengiz, "THE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRICITY CONSUMPTIONFROM OUTDOOR LIGHTING AND ECONOMIC GROWTH," *Light and Engineering*, vol. 32, no. 4, 2024.
- [75] ASPİLSAN Enerji, "A28 Public Datasheet,"https://www.aspilsan.com/wp-content/uploads/2024/05/A28_Public_Datasheet.pdf. (Erişim tarihi Kasım 3, 2024).