

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ SÜPERKAPASİTÖR BANKALARI  
İÇİN İLK YATIRIM MALİYETİ TAHMİN YAKLAŞIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Salih ELDERViŞ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektronik Bilim Dalı**

**AĞUSTOS 2025**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ SÜPERKAPASİTÖR BANKALARI  
İÇİN İLK YATIRIM MALİYETİ TAHMİN YAKLAŞIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Salih ELDERVİŞ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektronik Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr.Üyesi Nükhet SAZAK**

**AĞUSTOS 2025**



Salih ELDERVİŞ tarafından hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ SÜPERKAPASİTÖR BANKALARI İÇİN İLK YATIRIM MALİYETİ TAHMİN YAKLAŞIMI ” adlı tez çalışması 18.08.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

|                       |                                                                                       |       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Jüri Başkanı :</b> | <b>Dr. Öğr.Üyesi Nükhet SAZAK</b><br>Sakarya Üniversitesi                             | ..... |
| <b>Jüri Üyesi :</b>   | <b>Prof.Dr.Mehmet BAYRAK</b><br>Sakarya Üniversitesi                                  | ..... |
| <b>Jüri Üyesi :</b>   | <b>Dr. Öğr. Üyesi Nigar Berna TEŞNELİ</b><br>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi | ..... |



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ SÜPERKAPASİTÖR BANKALARI İÇİN İLK YATIRIM MALİYETİ TAHMİN YAKLAŞIMI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(18/08/2025).

Salih ELDERVİŞ



*Gazze'nin çocuklarına,  
Zamanından önce büyüyenlere,  
Küçük omuzlarında dünyanın acısını taşıyanlara,  
Bize direnmeyi öğretenlere,  
Ambargo altında bile umudu yitirmeyenlere,  
Bu mütevazı sayfaları sunuyorum,  
Umarım bilim bir gün özgürlüğe köprü olur,  
Ve karanlığınızı aydınlatan bir ılık.*



## TEŞEKKÜR

Öncelikle her zaman yanımda olan ve bana destek veren aileme en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Özellikle, bana “Yapacaksın” deyip Allah’ın izniyle başarmamı sağlayan canım anneme kalpten teşekkür ederim. Karşılıksız fedakârlıklarıyla her zaman yanımda olan kıymetli babama da minnettarım; onları bu dünyada layıkıyla ödüllendirmem mümkün değil, Rabbim onları ahirette en güzel şekilde mükâfatlandırsın.

Neşeli ruhu ve cömert kalbiyle sevgili hocam Dr. Öğr Üyesi. Nükhet Sazak’a da gönülden teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerinden çokça faydalandım ve sürekli desteği bu süreci tamamlamamda büyük rol oynadı.

Ayrıca, bana manevi destek sağlayarak motivasyon kaynağım olan yakın arkadaşlarıma da teşekkür ederim. Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Fakültesi'nin değerli akademik kadrosuna, bu çalışmanın her aşamasında sundukları destekten dolayı şükranlarımı sunarım.

Hayatımın ortağı, ruhumun eşi ve değerli eşime de ayrıca teşekkür etmek isterim. Manevi desteğini ve sürekli teşvikini benden hiçbir zaman esirgemedi.

Bu tezi yazdığım süreçte zaman oldukça dardı; yoğun iş tempom, yeni evliliğim ve yazım sürecinin üst üste geldiği zorlu bir dönemdi. Aynı zamanda, vatanımın uzun yıllar süren zulüm, hüznü ve yolsuzluğun ardından özgürlüğün ilk nefeslerini yaşadığı o tarihi ana da şahitlik ediyordum. Son olarak, bu çalışmayı, vatanı özgürleştiren kahramanlara ve Suriye’deki yeni yönetime ithaf ediyorum. Onların cesareti ve fedakârlığı sayesinde, halkımızın özgürlük ve bağımsızlık mücadelesi umutla ve kararlılıkla sürmektedir.

Salih ELDERVİŞ



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                                     | v         |
| TEŞEKKÜR .....                                                                        | ix        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                     | xi        |
| KISALTMALAR .....                                                                     | xiii      |
| ŞİMGELER .....                                                                        | xv        |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                   | xvii      |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                   | xix       |
| ÖZET .....                                                                            | xxi       |
| SUMMARY .....                                                                         | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1. Araştırma Problemi .....                                                         | 1         |
| 1.2. Tezin Amacı .....                                                                | 2         |
| <b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>                                                    | <b>5</b>  |
| 2.1. Süperkapasitör Teknolojisi .....                                                 | 6         |
| 2.1.1. Süperkapasitörlerin temel ilkeleri .....                                       | 6         |
| 2.1.2. Süperkapasitör türleri .....                                                   | 6         |
| 2.1.3 Süperkapasitörlerin temel özellikleri .....                                     | 7         |
| 2.2. Süperkapasitör Malzemeleri ve Gelişmeler .....                                   | 8         |
| 2.2.1. Elektrot malzemeleri .....                                                     | 9         |
| 2.2.2. Elektrolitler .....                                                            | 10        |
| 2.2.3. Ayırıcılar .....                                                               | 11        |
| 2.2.4. Süperkapasitör malzemelerindeki son gelişmeler .....                           | 11        |
| 2.3. Elektrikli Araçlarda Süperkapasitör Uygulamaları .....                           | 12        |
| 2.3.1. Emisyonların azaltılmasında elektrikli araçların önemi .....                   | 12        |
| 2.3.2. Elektrikli araçlarda enerji ile ilgili sorunlar .....                          | 12        |
| 2.3.3. Elektrikli araçlarda süperkapasitör uygulamaları .....                         | 13        |
| 2.3.4. Hibrit enerji depolama sistemleri (batarya-süperkapasitör) .....               | 14        |
| 2.3.5. Elektrikli araçlarda güç aktarma sisteminin tanımı .....                       | 15        |
| 2.4. Süperkapasitör Bankası Boyutlandırma ve Maliyet Tahmini .....                    | 17        |
| 2.4.1. Süperkapasitör bankası tasarım ilkeleri .....                                  | 17        |
| 2.4.2. Süperkapasitör bankası maliyet tahmini .....                                   | 17        |
| 2.4.3. Vaka çalışmaları ve pratik uygulamalar .....                                   | 18        |
| <b>3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA SÜPERKAPASİTÖR BANKASININ TASARIMI VE ANALİZİ .....</b>    | <b>21</b> |
| 3.1. Elektrikli Araçlar İçin Süperkapasitör Modüllerinin Tasarım Gereksinimleri ..... | 21        |
| 3.1.1. Gerilim ve akım gereksinimleri .....                                           | 21        |
| 3.1.1.1. Gerilim gereksinimleri .....                                                 | 21        |
| 3.1.1.2. Akım gereksinimleri .....                                                    | 22        |
| 3.1.2. Kapasite ve enerji gereksinimleri .....                                        | 22        |
| 3.1.2.1. Kapasite gereksinimleri .....                                                | 22        |
| 3.1.2.2. . Enerji gereksinimleri .....                                                | 23        |

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3. Hacim ve ağırlık gereksinimleri .....                                           | 23        |
| 3.1.3.1. Hacim gereksinimleri .....                                                    | 23        |
| 3.1.3.2. Ağırlık gereksinimleri .....                                                  | 26        |
| 3.1.4. Termal performans gereksinimleri .....                                          | 26        |
| 3.1.4.1. Çalışma sıcaklığı aralığı .....                                               | 26        |
| 3.1.4.2. Sıcaklığın performans üzerindeki etkisi .....                                 | 27        |
| 3.1.4.3. Soğutma gereksinimleri .....                                                  | 27        |
| 3.1.5. Güvenilirlik ve ömür gereksinimleri .....                                       | 27        |
| 3.1.5.1. Beklenen ömür gereksinimleri .....                                            | 27        |
| 3.1.5.2. Güvenilirlik gereksinimleri .....                                             | 28        |
| 3.1.6. Emniyet gereksinimleri .....                                                    | 29        |
| 3.1.6.1. Başlıca güvenlik riskleri .....                                               | 29        |
| 3.1.6.2. Emniyet gereksinimleri .....                                                  | 29        |
| 3.1.6.3. Emniyet standartları ve sertifikalar .....                                    | 30        |
| 3.1.7. Maliyet gereksinimleri .....                                                    | 30        |
| 3.2. Süperkapasitörlerin Uygun Şekilde Seçilmesi .....                                 | 31        |
| 3.2.1. Süperkapasitör seçim kriterleri .....                                           | 31        |
| 3.2.1.1. Elektriksel özellikler .....                                                  | 32        |
| 3.2.1.2. Termal özellikler .....                                                       | 32        |
| 3.2.1.3. Mekanik özellikler .....                                                      | 32        |
| 3.2.1.4. Ömür ve güvenilirlik özellikleri .....                                        | 32        |
| 3.2.1.5. Güvenlik özellikleri .....                                                    | 32        |
| 3.2.2 Ticari süperkapasitör türlerinin karşılaştırılması .....                         | 33        |
| 3.3. Süperkapasitör Bağlantı Konfigürasyonları .....                                   | 33        |
| 3.3.1. Seri Bağlantı .....                                                             | 34        |
| 3.3.2. Paralel bağlantı .....                                                          | 35        |
| 3.3.3. Seri-paralel (hibrit) bağlantı .....                                            | 35        |
| 3.4. Dengeleme (Balancing) Teknolojileri .....                                         | 35        |
| <b>4. SÜPERKAPASİTÖR MODÜLÜ TASARIMI .....</b>                                         | <b>37</b> |
| 4.1. Sabit Enerji ve Değişen Çalışma Gerilimleri Altında Modül Konfigürasyonları ..... | 37        |
| 4.2. Farklı Birim Hücre Kapasitelerinin Modül Tasarımına Etkisi .....                  | 42        |
| 4.2.1 Hesaplama varsayımları ve yöntem .....                                           | 42        |
| 4.2.2. 32 V Çalışma gerilimi durumu .....                                              | 43        |
| 4.2.3. 24 V Çalışma gerilimi durumu .....                                              | 43        |
| 4.3. Elektrikli Araçlar İçin Gerekli Temel Süperkapasitör Sistem Değerleri .....       | 44        |
| <b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>                                                      | <b>45</b> |
| 5.1. Çalışma Geriliminin Modül Tasarımına Etkisi .....                                 | 45        |
| 5.2. ESR Değerindeki Değişim ve Termal Etkiler .....                                   | 45        |
| 5.3. Akım Taşıma Kapasitesi ve Paralel Yapılandırma .....                              | 45        |
| 5.4. Enerji Hesaplamaları ve Güvenlik Payı .....                                       | 46        |
| 5.5. Hücre Seçimi ve Uygulama Uygunluğu .....                                          | 46        |
| 5.6. Uygulama Odaklı Tasarım Stratejileri .....                                        | 46        |
| 5.7. Gelecek Çalışmalar .....                                                          | 46        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                 | <b>49</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                  | <b>57</b> |

## **KISALTMALAR**

|               |                                          |
|---------------|------------------------------------------|
| <b>BYS</b>    | : Batarya Yönetim Sistemi                |
| <b>CE</b>     | : Avrupa Uygunluk İşareti                |
| <b>CNT</b>    | : Karbon Nanotüpler                      |
| <b>DC-DC</b>  | : Doğru akım – Doğru akım dönüştürücü    |
| <b>EA</b>     | : Elektrikli Araç                        |
| <b>EDLC</b>   | : Elektriksel Çift Katmanlı Kapasitörler |
| <b>EDS</b>    | : Enerji Depolama Sistemleri             |
| <b>ESR</b>    | : Eşdeğer Seri Direnç                    |
| <b>HEDS</b>   | : Hibrit Enerji Depolama Sistemleri      |
| <b>ISO</b>    | : Uluslararası Standardizasyon Örgütü    |
| <b>KERS</b>   | : Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi    |
| <b>Li-ion</b> | : Lityum-iyon Bataryalar                 |
| <b>PPM</b>    | : Milyonda Bir Birim                     |
| <b>SK</b>     | : Süperkapasitör                         |
| <b>UL</b>     | : Uluslararası Onay Laboratuvarları      |



## SİMGELER

|                                    |                                                                                                                                        |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>°C</b>                          | : Santigrat derece [Birim]                                                                                                             |
| <b>C</b>                           | : C-rate, bir bataryanın veya süperkapasitörün maksimum kapasitesine göre ne hızda şarj edildiğini veya deşarj olduğunu ölçen bir oran |
| <b>SOC</b>                         | : Şarj Durumu                                                                                                                          |
| <b>RuO<sub>2</sub></b>             | : Rutenyum Dioksit                                                                                                                     |
| <b>MnO<sub>2</sub></b>             | : Manganez Dioksit                                                                                                                     |
| <b>W</b>                           | : Watt [Birim]                                                                                                                         |
| <b>kg</b>                          | : Kilogram [Birim]                                                                                                                     |
| <b>m<sup>2</sup>/g</b>             | : Özgül yüzey alanı                                                                                                                    |
| <b>g</b>                           | : Gram [Birim]                                                                                                                         |
| <b>m<sup>2</sup></b>               | : Metrekare [Birim]                                                                                                                    |
| <b>F/g</b>                         | : Birim gram başına kapasitans [Birim]                                                                                                 |
| <b>F</b>                           | : Farad [Birim]                                                                                                                        |
| <b>PPy</b>                         | : Polipirol                                                                                                                            |
| <b>PANI</b>                        | : Polianilin                                                                                                                           |
| <b>PEDOT</b>                       | : Politiyofen                                                                                                                          |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> | : Sülfürik asit                                                                                                                        |
| <b>KOH</b>                         | : Potasyum hidroksit                                                                                                                   |
| <b>PP</b>                          | : Polipropilen                                                                                                                         |
| <b>PE</b>                          | : Polietilen                                                                                                                           |
| <b>PTFE</b>                        | : Politetrafloroetilen                                                                                                                 |
| <b>V</b>                           | : Volt [Birim]                                                                                                                         |
| <b>N<sub>s</sub></b>               | : Seri Hücre Sayısı                                                                                                                    |
| <b>N<sub>p</sub></b>               | : Paralel Hücre Sayısı                                                                                                                 |
| <b>A</b>                           | : Amper [Birim]                                                                                                                        |
| <b>Wh/litre</b>                    | : Hacim başına enerji yoğunluğu                                                                                                        |
| <b>UN 38.3</b>                     | : Lityum batarya taşımacılık güvenlik standardı                                                                                        |
| <b>ISO 16750</b>                   | : Elektrik sistemleri için ISO standardı                                                                                               |
| <b>ISO 26262</b>                   | : Otomotiv işlevsel güvenlik standardı                                                                                                 |
| <b>UL 810A</b>                     | : Süperkapasitör güvenlik standardı                                                                                                    |
| <b>IEC 62576</b>                   | : Süperkapasitör performans testi standardı                                                                                            |

|                                         |                                     |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| <b><math>C_{\text{Toplam}}</math></b>   | : Toplam kapasite                   |
| <b><math>C_{\text{hücre}}</math></b>    | : Tek hücre kapasitesi              |
| <b><math>V_{\text{Toplam}}</math></b>   | : Toplam gerilim                    |
| <b><math>V_{\text{hücre}}</math></b>    | : Hücre başına gerilim              |
| <b><math>ESR_{\text{Toplam}}</math></b> | : Toplam eşdeğer seri direnç        |
| <b><math>ESR_{\text{hücre}}</math></b>  | : Hücre başına eşdeğer seri direnç  |
| <b><math>E_{\text{modül}}</math></b>    | : Toplam enerji depolama kapasitesi |
| <b><math>V_{\text{modül}}</math></b>    | : Modülün Çalışma Gerilimi          |
| <b><math>I_{\text{modül}}</math></b>    | : Modülün maksimum akım kapasitesi  |
| <b><math>n</math></b>                   | : Hücre sayısı                      |
| <b><math>J</math></b>                   | : Joule [Birim]                     |
| <b><math>\Omega</math></b>              | : Ohm [Birim]                       |
| <b><math>m\Omega</math></b>             | : mili-Ohm [Birim]                  |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Farklı SK Hücrelerinin Özellik Karşılaştırması[46]. .....                       | 31 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Hücre Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [69]. .....                     | 36 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Süperkapasitör Modül Konfigürasyonları ve Performans Değerleri .....            | 38 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Kullanılan Maxwell Süperkapasitör Hücrelerinin Teknik Özellikleri [70]<br>..... | 43 |
| <b>Tablo 4.3.</b> 3000 F Kapasitesi ve 32 V Çalışma Gerilimi İçin Karşılaştırmalı Tablo           | 43 |
| <b>Tablo 4.4.</b> 3000 F Kapasitesi ve 24 V Çalışma Gerilimi İçin Karşılaştırmalı Tablo           | 44 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Süperkapasitör destekli bir sistem için hedeflenen tipik parametreler.....      | 44 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Ragone Diyagramı [12].....               | 9  |
| Şekil 2.2. Elektrikli Araçlarda Güç Aktarma Sisteminin Blok Diyagramı [46]. ..... | 15 |
| Şekil 3.1. Farklı kapasitörlerin enerji depolama karakteristiği [56] .....        | 24 |
| Şekil 3.2. Kalem pil ile 3000 F ultra kapasitör [56].....                         | 25 |
| Şekil 3.3. İki farklı örnek modül görseli [59] .....                              | 34 |
| Şekil 3.4. Seri Bağlı Süperkapasitörler Görseli [15].....                         | 34 |
| Şekil 4.1. Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Ağırlığı.....                 | 39 |
| Şekil 4.2. Farklı Hücre Tiplerine Göre Modül ESR Değeri .....                     | 40 |
| Şekil 4.3. Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Hücre Sayısı .....                  | 40 |
| Şekil 4.4. Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Hacmi.....                    | 41 |
| Şekil 4.5. Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Fiyatı.....                   | 42 |



## **ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ SÜPERKAPASİTÖR BANKALARI İÇİN İLK YATIRIM MALİYETİ TAHMİN YAKLAŞIMI**

### **ÖZET**

Bu çalışma, elektrikli araçlarda enerji depolama sistemleri kapsamında süperkapasitörlerin kullanımını ele almakta ve özellikle süperkapasitör bankalarının tasarımı ve optimizasyonuna odaklanmaktadır. Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması ve çevresel kaygıların artması, elektrikli araçları sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin ön saflarına taşımıştır. Ancak, lityum-iyon bataryaların sınırlı güç yoğunluğu, uzun şarj süresi ve çevrim ömrü gibi dezavantajları nedeniyle süperkapasitörler tamamlayıcı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Hızlı şarj/deşarj kabiliyeti, uzun ömür, yüksek güç yoğunluğu ve geniş sıcaklık aralığında çalışma gibi üstün özellikleri sayesinde süperkapasitörler, ani hızlanma ve rejeneratif frenleme gibi uygulamalarda etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, süperkapasitör teknolojisinin temel ilkeleri, farklı türleri (EDLC, psödokapasitör, hibrit) ve elektrot malzemeleri (karbon esaslı, geçiş metali oksitleri, iletken polimerler) detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca elektrolitler ve ayırıcıların performansa etkileri değerlendirilmiş ve enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik son malzeme geliştirmelerine de yer verilmiştir. Süperkapasitörlerin elektrikli araçlardaki uygulamaları arasında hızlanma desteği, rejeneratif enerji geri kazanımı, soğukta çalıştırma ve batarya ömrünü uzatma gibi konular analiz edilmiştir. Bataryalarla birlikte kullanılan hibrit enerji depolama sistemlerinin (HEDS) avantajları ve farklı yapılandırmaları (pasif, yarı aktif, aktif) açıklanmıştır. Çalışmanın temel bölümlerinden biri süperkapasitör bankalarının boyutlandırılması ve maliyet analizidir. Tasarım kriterleri arasında gerilim, kapasite, ısı yönetimi, ağırlık, hacim ve sistem entegrasyonu gibi faktörler detaylandırılmıştır. Hücre maliyeti, Batarya Yönetim Sistemi (BYS) maliyeti, soğutma ve montaj gibi bileşenlerin maliyetleri değerlendirilmiş ve uzun ömür nedeniyle süperkapasitörlerin toplam yaşam döngüsü maliyetinde avantaj sağlayabileceği belirtilmiştir. Deneysel ve analitik kısımda, belirli bir sabit enerji düzeyinde (2304 J) ve değişen çalışma gerilimlerinde (16 V, 24 V, 32 V) çeşitli modül konfigürasyonları analiz edilmiştir. Gerilim arttıkça kapasitenin düştüğü, seri hücre sayısının ve ESR'nin yükseldiği; paralel hücre sayısı azaldıkça akım taşıma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Maxwell BCAP serisinden farklı hücrelerin karşılaştırmalı analizi sonucunda BCAP3000 K2 hücresinin düşük ağırlığı, düşük hücre sayısı, yüksek güç yoğunluğu ve düşük sistem karmaşıklığı sayesinde elektrikli araçlar için en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması süperkapasitörlerin elektrikli araçlardaki kullanımının teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini kapsamlı şekilde değerlendirmiştir. Süperkapasitörlerin bataryalarla birlikte hibrit sistemlerde kullanılması, araçların performansını, güvenilirliğini ve verimliliğini önemli ölçüde artırma potansiyeli taşımaktadır. Elde edilen veriler, gelecekteki elektrikli araç teknolojileri için yol gösterici niteliktedir.



## **AN INITIAL INVESTMENT COST ESTIMATION APPROACH FOR THE SUPERCAPACITOR BANKS IN ELECTRIC VEHICLES**

### **SUMMARY**

The global transition toward clean and sustainable energy systems has established the electrification of transportation as one of the most pressing challenges and opportunities of the twenty-first century, with electric vehicles (EVs) at the heart of this transformation, since they represent not only a technological innovation but also an environmental and economic necessity in the effort to reduce greenhouse gas emissions, dependence on fossil fuels, and urban pollution, as evidenced by policies such as the European Green Deal, which targets a 55% reduction in emissions by 2030 and carbon neutrality by 2050; yet the full realization of EV potential is constrained by the limitations of lithium-ion batteries, which, while offering relatively high energy densities in the range of 100–265 Wh/kg, suffer from long charging times, finite cycle lives with gradual degradation, vulnerability to extreme thermal conditions, and exposure to fragile and geopolitically sensitive supply chains of lithium, cobalt, and nickel, thereby underscoring the urgent need for complementary energy storage technologies that can enhance system reliability, safety, and sustainability over the lifetime of EVs; in this context, supercapacitors—also known as electrochemical capacitors—have emerged as promising devices due to their unique properties: exceptionally high power density reaching up to 10 kW/kg, nearly instantaneous charging and discharging capability, a cycle life that exceeds half a million cycles with negligible performance degradation, round-trip efficiencies surpassing 95%, and robust operability across a wide range of temperatures, all of which make them ideally suited for applications that demand rapid power delivery such as regenerative braking, acceleration support, load leveling, and stabilization of power supply, though their relatively low energy density (5–15 Wh/kg) prevents them from replacing batteries as the main storage medium, which is why hybrid energy storage systems (HESS) have gained attention for integrating batteries and supercapacitors to exploit the high energy density of the former and the high power density of the latter, resulting in extended battery life, reduced thermal stress, improved regenerative braking efficiency, and enhanced long-term economic viability; the fundamental working principles of supercapacitors can be categorized into three types: electric double-layer capacitors (EDLCs), which rely on electrostatic charge separation at the electrode-electrolyte interface, pseudocapacitors, which exploit fast surface redox reactions, and hybrid capacitors, including lithium-ion capacitors, that combine both mechanisms, with the performance and cost of these devices largely determined by the electrode materials employed, ranging from activated carbon, which is abundant and inexpensive but limited in performance, to advanced nanostructured materials such as graphene and carbon nanotubes that deliver superior conductivity and surface area albeit at higher cost, as well as transition metal oxides like  $\text{MnO}_2$  and  $\text{RuO}_2$  that offer high capacitance but face economic and scalability challenges, and conducting polymers such as polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy), and PEDOT, which can provide good capacitance but suffer from limited cycling stability, while electrolytes—aqueous,

organic, or ionic liquids—play a crucial role in defining the operating voltage window, efficiency, and internal resistance, and separators maintain ion transport and safety; ongoing research has highlighted innovations such as PEDOT nanofibers that improve charge transport and low-cost manganese-based electrode designs that bring a favorable balance between performance and economic feasibility, reinforcing the close link between material science advances and practical automotive applications; real-world demonstrations have already proven the viability of supercapacitors in transport systems, with electric buses in Shanghai that recharge within seconds at stations, tram systems in Germany that recover and reuse braking energy, and Formula E racing cars that exploit supercapacitors for instantaneous acceleration boosts, all of which highlight industrial readiness and scalability of the technology; nevertheless, the integration of supercapacitors into EV systems requires careful design considerations, since each individual cell operates at around 2.5–2.7 V, necessitating series connection of 150–160 cells to reach voltages in the range of 400 V typical for EV powertrains, with stored energy scaling as a function of capacitance and the square of voltage, but design challenges arise due to the increase in equivalent series resistance (ESR) with cell count, which leads to greater thermal losses and necessitates cooling systems that increase weight and cost, all while compact and lightweight design remains critical, making cell balancing circuits, overvoltage protection, and current monitoring indispensable, along with adherence to safety standards such as ISO 26262 and UL 810A; comparative analysis of commercial cells, particularly the Maxwell BCAP series, has shown trade-offs between weight, ESR, cell number, volume, and cost, where lighter cells may require more units thus increasing volume, while higher-energy-density cells reduce cell count and module volume but add to total mass, with BCAP3000 K2 identified as an optimal compromise due to its low ESR, limited number of required cells, compact volume, competitive cost, and relatively low weight, making it suitable for EV use; economic assessments indicate that although supercapacitors carry higher initial costs compared to batteries, their extremely long cycle life reduces replacement needs, especially in public transport applications with intensive duty cycles, thus lowering lifetime cost, while their integration can extend battery life by up to 50% and improve overall energy efficiency by as much as 20%, particularly by enhancing acceleration and regenerative braking performance under extreme thermal conditions; extending this line of inquiry, analytical studies of module design, as detailed in the Turkish section of the research, reveal that operating voltage significantly influences module architecture: as voltage increases, the total capacitance required to achieve a fixed energy target decreases, reducing the number of parallel-connected cells and thus lowering current capacity, while necessitating more series-connected cells, which increases ESR and aggravates thermal management demands, illustrated by the difference between a 32 V module with 12 series cells and an ESR of 0.24  $\Omega$  and a 16 V module with 6 series cells and an ESR of 0.12  $\Omega$ , where the higher-voltage design sacrifices current capacity (75 A vs 150 A) for compactness, underscoring the need for careful trade-offs between voltage, ESR, thermal effects, and application requirements; energy calculations across different configurations confirm that targeted values, such as 2304 J, can be met with slight overcapacity (e.g., 2360 J), which can be considered a beneficial safety margin, while cell choice remains central to system optimization, with BCAP3000 K2 again proving most suitable due to fewer cells needed, lighter total mass (73.44 kg for a 32 V system), low ESR of 0.29 m $\Omega$ , and simplified assembly, which enhance regenerative braking recovery and support high-power events; thus, application-oriented design strategies must weigh the advantages of low-voltage systems (low ESR and high current capacity) against the

compactness of high-voltage systems, demanding precise optimization of resistance, thermal load, weight, and volume; furthermore, the modular nature of supercapacitor systems allows for flexible reconfiguration to accommodate different energy and voltage requirements, which opens avenues for scalable, adaptable, and cost-effective designs, while future work should expand into advanced energy management strategies, including model predictive control (MPC) and artificial intelligence-based algorithms, to optimize power flow between batteries and supercapacitors, ensuring both efficiency and safety, and should investigate the integration of supercapacitor banks as intermediate buffers in renewable energy-coupled EV systems, enabling smoother interaction with solar or wind energy sources, thereby reinforcing sustainable mobility infrastructures; ultimately, the thesis concludes that supercapacitors are not intended to replace lithium-ion batteries but rather to complement them as vital components of hybrid storage architectures, enhancing efficiency, reliability, and environmental sustainability of EVs, and positioning them as indispensable elements in the evolution of next-generation electro-mobility technologies.





## 1. GİRİŞ

Artan çevresel tehditler ve fosil yakıtlara aşırı bağımlılık, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine geçişi kaçınılmaz kılmaktadır. Elektrikli araçlar (Electric Vehicles, EA), sera gazı emisyonlarını ve yenilenemeyen enerjiye olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip, umut verici bir alternatiftir [1].

Ancak elektrikli araçlar bazı enerji depolama sorunlarıyla karşı karşıyadır. Sınırlı sürüş menzili, uzun şarj süresi ve özellikle zorlu çalışma koşulları altında zamanla pil performansının düşmesi gibi zorluklar öne çıkmaktadır [2].

Günümüzdeki elektrikli araçların çoğunda birincil enerji kaynağı olarak lityum iyon piller kullanılmaktadır. Pil teknolojisindeki önemli gelişmelere rağmen, bu pillerin hâlâ bazı içsel sınırlamaları bulunmaktadır. Bu faktörler arasında nispeten düşük güç yoğunluğu, sınırlı çevrim ömrü ve düşük sıcaklıklarda zayıf performans yer almaktadır [3].

Bu bağlamda süperkapasitörler, bataryalara tamamlayıcı olarak bazı sınırlamaları aşabilecek gelecek vaat eden bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu (1000-10000 W/kg), uzun çevrim ömrü (500.000 çevrimin üzerinde), dakikalardan saniyelere kadar hızlı şarj süresi ve geniş bir sıcaklık aralığında mükemmel performans göstermeleri nedeniyle elektrikli araçlarda ani hızlanma ve rejeneratif frenleme gibi kısa süreli yüksek güç gerektiren uygulamalar için oldukça uygundur [4].

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç enerji depolama sistemleri kapsamında süperkapasitörlerin kullanımını araştırmak ve analiz etmektir. Özellikle performans ve maliyet arasında en iyi dengeyi sağlayacak şekilde süperkapasitör bankalarının tasarımına ve optimizasyonuna odaklanılmaktadır.

### 1.1. Araştırma Problemi

Süperkapasitörlerin pek çok avantajına rağmen elektrikli araçlarda kullanımında hâlâ bazı zorluklar bulunmaktadır. Başlıca zorluklardan biri, lityum iyon pillere (100-265 Wh/kg) kıyasla nispeten düşük enerji yoğunluğudur (5-15 Wh/kg), bu da onu elektrikli

araçlar için tek enerji kaynağı olarak kullanımını sınırlar [5]. Ayrıca süperkapasitörler yüksek maliyet, nispeten hızlı kendi kendine deşarj ve deşarj sırasında voltaj değişimi gibi zorluklarla karşı karşıyadır; bu, sabit bir voltajı korumak için ek elektronik devreler gerektirir [6]. Süperkapasitör yığınlarının tasarımı ve optimizasyonu, kapasite, voltaj, eşdeğer seri direnç (Equivalent Series Resistance, ESR), ağırlık, hacim ve maliyet gibi çatışan faktörler arasında hassas bir denge gerektirir.

Bu bağlamda, ana araştırma problemi, çeşitli pratik kısıtlamaları dikkate alarak performans ve maliyet arasında optimum dengeyi sağlayacak şekilde elektrikli araçlar için süperkapasitör bankasının nasıl tasarlanacağı ve optimize edileceğidir.

Tezin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi, çalışma prensipleri, üretimlerinde kullanılan malzemeler ve özellikle elektrikli araçlarda enerji depolama sistemlerindeki uygulamaları dahil olmak üzere süperkapasitörlerle ilgili literatür gözden geçirilmektedir. Enerji ve güç gereksinimlerinin belirlenmesi, süperkapasitör türü ve boyutunun seçilmesi ve optimum konfigürasyonların belirlenmesi dahil olmak üzere elektrikli araçlar için süperkapasitör bankasının tasarımı ve analizi bölüm 3’te ele alınmaktadır.

Elektrikli araç uygulamalarında performans, ağırlık ve hacim açısından çeşitli Maxwell süperkapasitör türleri (BCAP0100, BCAP0350, BCAP0650, BCAP1200, BCAP3000) için karşılaştırmalı bir çalışma bölüm 4’de sunulmaktadır. Tezin ana sonuçlarının özetlendiği, bilimsel ve teknolojik bilgiye katkılarının ifade edildiği ve gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için önerilerin yer aldığı sonuç ve öneriler bölüm 5’de yer almaktadır.

## **1.2. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının amacı, elektrikli araçlar için enerji depolama sistemlerinde süperkapasitörlerin kullanımını araştırmak, tasarım ve optimizasyon süreçlerini analiz etmektir. Özellikle süperkapasitör bankalarının performans ve maliyet arasında en uygun dengeyi sağlayacak şekilde tasarlanması ve pratik uygulamalarda verimli kullanımının sağlanması hedeflenmektedir.

Çalışmada, süperkapasitörlerin elektrikli araçların ani güç taleplerini karşılamadaki avantajları değerlendirilirken, düşük enerji yoğunluğu ve maliyet gibi sınırlamaların aşılması için çözüm önerileri geliştirilecektir.

Sonuç olarak, bu tez elektrikli araçlarda süperkapasitörlerin etkin entegrasyonuna yönelik tasarım kriterleri ve optimize edilmiş modül yapıları sunmayı amaçlamaktadır.





## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda birçok ülke, çevreye daha az zarar veren bir ulaşım sistemine geçmeyi hedefleme doğrultusunda fosil yakıtla çalışan araçların satışını yasaklamaya yönelik planlar geliştirmiştir [7,8]. Küresel politikalar, daha az kirletici bir dünyaya geçişi benimseyerek şekillenmiştir. Bu bağlamda, 2019 yılında yürürlüğe giren Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2030 yılına kadar küresel sera gazı (Greenhouse Gas, GHG) emisyonlarını %55 oranında azaltmayı ve 2050 yılına kadar karbon nötrlüğüne ulaşmayı hedeflemektedir [7].

Bu nedenle, çevreye herhangi bir olumsuz etkisi olmayan, aksine fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltan elektrikli araçlar, en uygun ve sürdürülebilir alternatif çözüm haline gelmiştir. Bu durum, elektrikli araçların (Electric Vehicle, EA) üretimine son yıllarda büyük bir önem kazandırmıştır [9,10].

Elektrikli araçlar, sıfır emisyon, basitlik, güvenilirlik, düşük işletme maliyeti, konfor, verimlilik ve erişilebilirlik gibi avantajlar sunarak sürdürülebilir bir ulaşım seçeneği olarak öne çıkmaktadır [11]. Ancak, elektrikli araçların yaygınlaşmasındaki en kritik konulardan enerji depolama sistemleridir (EDS). Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle günümüzde EA'larda en yaygın kullanılan enerji depolama teknolojisidir. Ancak Li-ion bataryaların sınırlı güç yoğunluğu, uzun şarj süreleri, sınırlı ömürleri ve özellikle kobalt gibi hammaddelerden kaynaklanan maliyet ve sürdürülebilirlik sorunları bulunmaktadır [11,12].

Bu çerçevede, süperkapasitörler (SK'ler) olarak bilinen elektrokimyasal kapasitörler, geleneksel enerji depolama sistemlerine alternatif ya da tamamlayıcı bir çözüm olarak giderek daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Bu teknolojinin öne çıkmasının temel nedeni, sahip olduğu teknik özelliklerin özellikle bazı elektrikli araç uygulamaları için son derece uygun olmasıdır. Kısa süreli yüksek güç gereksinimlerinin söz konusu olduğu durumlarda —örneğin ani hızlanmalar ya da yokuş çıkma senaryolarında— etkili bir performans sunabilirler. Ayrıca, rejeneratif frenleme sırasında oluşan enerjinin geri kazanımında da önemli bir rol oynayarak sistemin genel verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırır [13].

## **2.1. Süperkapasitör Teknolojisi**

### **2.1.1. Süperkapasitörlerin temel ilkeleri**

Süperkapasitörler veya ultra kapasitörler olarak da bilinen elektrokimyasal kapasitörler, geleneksel bataryalardan farklı bir prensiple çalışan enerji depolama cihazlarıdır [14]. Bataryalar enerjiyi yavaş kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolarken, süperkapasitörler enerjiyi elektrot/elektrolit arayüzeyinde fiziksel yük ayrımı yoluyla depolar [15].

Süperkapasitörler temel olarak iki elektrot, bir ayırıcı (seperatör) ve bir elektrolit çözeltisinden oluşmaktadır [12]. Enerjiyi, bataryalardaki gibi yavaş kimyasal reaksiyonlar yerine, elektrot yüzeylerinde elektrostatik olarak (elektrik yükü biriktirerek) depolanmaktadır [12, 15].

Bir süperkapasitöre elektrik gerilimi uygulandığında, pozitif yüklü iyonlar negatif elektrotta, negatif yüklü iyonlar ise pozitif elektrotta toplanarak her bir arayüzeyde çift elektrik tabakası oluşturmaktadır [15]. Bu çift tabaka, elektrik yüklerini ve dolayısıyla enerjiyi depolamaktadır. Bu süreç tamamen fiziksel olduğu ve kimyasal reaksiyonlar içermediği için çok hızlı gerçekleşir, bu da süperkapasitörlerin bataryalara kıyasla saniyeler veya dakikalar içinde şarj ve deşarj olabildiğini sağlamaktadır.

### **2.1.2. Süperkapasitör türleri**

Süperkapasitörler, yük depolama mekanizmasına ve kullanılan malzemelerin doğasına göre üç ana türe ayrılır:

#### **1. Elektriksel Çift Katmanlı Kapasitörler (Electrical Double Layer Capacitor, EDLC):**

Bu kapasitörler, aktif karbon veya grafen gibi yüksek yüzey alanlı karbon malzemelerin yüzeyinde elektrostatik yük depolamaya dayanır [12]. Nispeten yüksek kapasitans, çok uzun ömür ve yüksek enerji verimliliği ile karakterize edilirler. Bununla birlikte, enerji yoğunlukları, yalnızca yüzey yükü depolamaya dayanmaları nedeniyle sınırlıdır.

#### **2. Psödokapasitörler (Pseudocapacitors):**

Bu kapasitörler, geçiş metal oksitleri (örneğin: Ruthenium Dioxide,  $\text{RuO}_2$ , Manganese Dioxide,  $\text{MnO}_2$ ) veya iletken polimerler (örneğin polianilin, polipirrol) gibi aktif malzemelerin yüzeyinde hızlı ve tersinir redoks reaksiyonlarını kullanır [10]. Yüzey kimyasal reaksiyonlarının katkısı nedeniyle EDLC'lerden daha yüksek kapasitansa

sahiptirler, ancak tekrarlanan şarj-deşarj döngüleri sırasında aktif malzemelerin bozulması nedeniyle nispeten daha kısa ömürlüdürler.

### 3.Hibrit Kapasitörler (Hybrid Capacitors):

Bu kapasitörler, EDLC'lerin ve psödokapasitörlerin özelliklerini veya süperkapasitörler ile bataryaların özelliklerini birleştirir, örneğin lityum-iyon kapasitörler [16]. Her iki türün avantajlarını, örneğin bataryalardan yüksek enerji yoğunluğu ve süperkapasitörlerden yüksek güç yoğunluğunu birleştirmeyi amaçlarlar. Lityum-iyon kapasitörler, bir karbon elektrodu (EDLC gibi) ve bir lityum batarya elektrodu kullanan hibrit kapasitörlere örnektir.

#### 2.1.3. Süperkapasitörlerin temel özellikleri

Süperkapasitörler, geleneksel kapasitörlerden ve lityum-iyon bataryalardan ayıran birkaç özelliğe sahiptir:

- Yüksek güç yoğunluğu:

Süperkapasitörlerdeki güç yoğunluğu 1-10 kW/kg arasında değişir, bu da bataryalardan (0.1-1 kW/kg) çok daha yüksektir [19]. Bu özellik, elektrikli araçlarda çabuk hızlanma veya rejeneratif frenleme gibi kısa sürelerde yüksek güç iletimi veya emilimi gerektiren uygulamalar için süperkapasitörleri ideal kılmaktadır.

- Çok uzun çevrim ömrü:

Süperkapasitörler 500.000 ila 1.000.000 şarj/deşarj döngüsüne dayanabilir [20], bu da lityum-iyon bataryaların 1.000-2.000 döngüsüne kıyasla çok daha uzundur. Bu uzun ömür, zamanla malzemelerin bozulmasına neden olan kimyasal reaksiyonlara dayanmamalarından kaynaklanır.

- Hızlı şarj/deşarj:

Süperkapasitörler saniyeler veya dakikalar içinde şarj vedeşarj olabilir [14,21], bataryalarda ise bu süre saatlerdir. Bu özellik, kısa sürede büyük miktarda enerji emiliminin mümkün olduğu rejeneratif frenleme uygulamalarında özellikle faydalıdır.

- Yüksek enerji verimliliği:

Süperkapasitörlerde şarj vedeşarj verimliliği %95-98'e ulaşır , bu da verimliliği %70-85 arasında değişen bataryalardan daha yüksektir [22].

- Geniş çalışma sıcaklığı aralığı:

Süperkapasitörler  $-40$  ila  $+65^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda verimli bir şekilde çalışabilir [23], bu da düşük sıcaklıklarda performansı önemli ölçüde düşen bataryalardan daha geniş bir aralıktır.

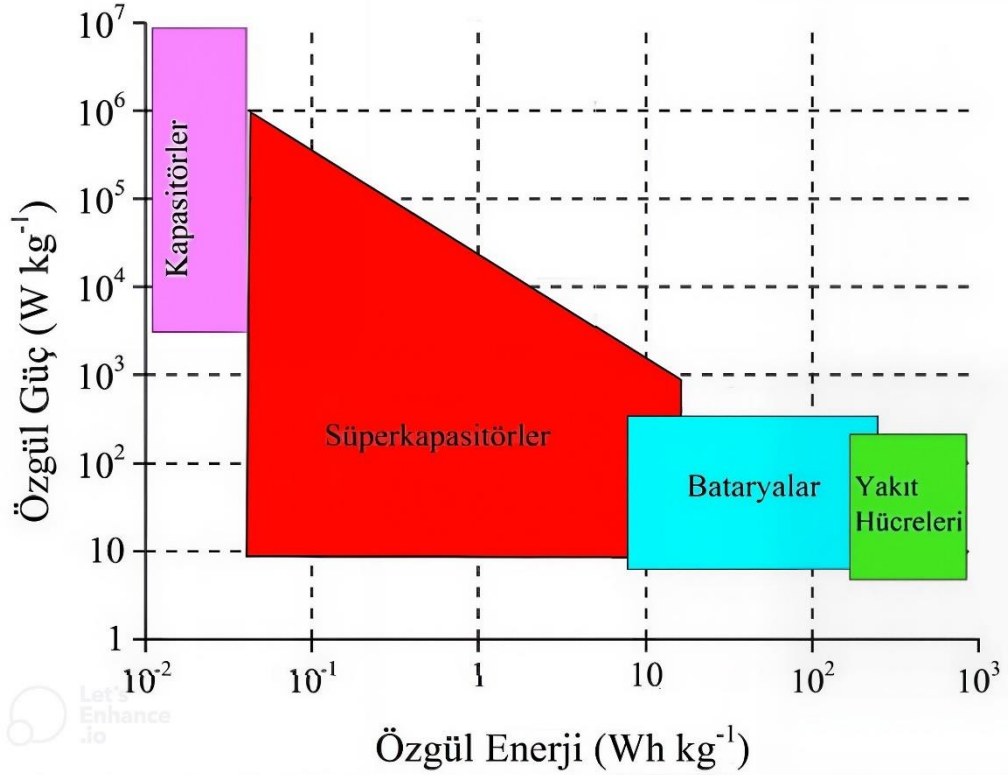
- Düşük enerji yoğunluğu:

Yukarıdaki avantajlara rağmen, süperkapasitörlerin en büyük dezavantajı nispeten düşük enerji yoğunluğudur, bu da  $5\text{-}15\text{ Wh/kg}$  arasında değişir [17] , lityum-iyon bataryaların  $100\text{-}265\text{ Wh/kg}$ 'ına kıyasla çok daha düşüktür [24]. Bu, birim ağırlık veya hacim başına daha az enerji depoladıkları anlamına gelmektedir.

Bu tamamlayıcı özellikler nedeniyle, süperkapasitörler genellikle elektrikli araçlarda hibrit enerji depolama sistemlerinde (Hybrid Energy Storage System, HEDS) bataryalarla birlikte kullanılır; bataryalar uzun sürüş menzili için gereken enerji yoğunluğunu sağlarken, süperkapasitörler hızlanma ve rejeneratif frenleme sırasında enerji emilimi için gereken güç yoğunluğunu sağlamaktadır.

## **2.2. Süperkapasitör Malzemeleri ve Gelişmeler**

Elektrot malzemeleri (elektrotlar), süperkapasitörlerin en önemli bileşenleri arasındadır ve performanslarını ve özelliklerini doğrudan etkiler. Bir süperkapasitörün performansı, elektrotların yüzey alanına, elektriksel iletkenliğine ve kullanılan malzemelerin kimyasal stabilitesine büyük ölçüde bağlıdır [25].



**Şekil 2.1.** Enerji Depolama Sistemlerinin Ragone Diyagramı [12].

Süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunluğu açısından diğer enerji depolama sistemleriyle kıyaslanması, Şekil 2.1’de şematik olarak sunulmuştur.

### 2.2.1. Elektrot malzemeleri

Süperkapasitörlerde kullanılan elektrot malzemeleri birkaç ana kategoriye ayrılır:

– Karbon Bazlı Malzemeler: Karbon bazlı malzemeler, yüksek yüzey alanları, iyi elektriksel iletkenlikleri, kimyasal stabiliteleri ve makul maliyetleri nedeniyle süperkapasitörlerde en yaygın kullanılan malzemelerdir [12]. En önemli karbon bazlı malzemeler şunlardır:

- Aktif Karbon: Yüksek yüzey alanı ( $1000\text{-}3000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve düşük maliyet ile karakterize edilir [20]. Hindistan cevizi kabuğu, kömür ve odun gibi çeşitli kaynaklardan üretilebilir.
- Grafen: Çok yüksek teorik yüzey alanı ( $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve mükemmel elektriksel iletkenlik ile karakterize edilir [26]. Aktif karbona göre daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilir, ancak üretim maliyeti daha yüksektir.

- Karbon Nanotüpler (Carbon Nanotubes, CNT): Yüksek elektriksel iletkenlik, iyi yüzey alanı ve mekanik dayanıklılık sağlar [27]. Tek başına veya performansı arttırmak için diğer malzemelerle birlikte kullanılabilir.
- Geçiş Metal Oksitleri: Bu malzemeler psödokapasitörlerde kullanılır ve hızlı, tersinir yüzey redoks reaksiyonları yoluyla yüksek kapasitans sağlar [12,28]. En önemli metal oksitler şunlardır:
- Rutenyum Oksit ( $\text{RuO}_2$ ): Psödokapasitif mekanizmalar yoluyla çok yüksek kapasitans ( $>1000 \text{ F/g}$ ) sağlar [18]. Ancak yüksek maliyeti ticari kullanımını sınırlar.
- Mangan Dioksit ( $\text{MnO}_2$ ): İyi kapasitans ( $200\text{-}400 \text{ F/g}$ ) ile rutenyum oksite daha ucuz bir alternatiftir [19].

– İletken Polimerler: Bu malzemeler de psödokapasitörlerde kullanılır ve kolay üretim ve esneklik ile karakterize edilir [12]. En önemli iletken polimerler şunlardır:

- I. Polianilin (PANI): Kolay üretim, düşük maliyet ve yüksek kapasitans ile karakterize edilir [17].
- II. Polipirol (PPy): Yüksek elektriksel iletkenlik ve iyi stabilite sağlar [29].
- III. Politiyofen (PEDOT): İyi kimyasal stabilite ile karakterize edilir [30].

### 2.2.2. Elektrolitler

Elektrolit, süperkapasitörde elektrotlar arasında iyonların hareket ettiği ortamdır ve süperkapasitör performansını önemli ölçüde etkiler [16]. Elektrolit, çalışma gerilimi penceresini, iç direnci ve süperkapasitörün çalışma sıcaklığı aralığını belirler. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrolitler üç ana kategoriye ayrılır:

- Sulu Elektrolitler: Sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ve potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) gibi. Yüksek iyonik iletkenlik ve düşük maliyet ile karakterize edilirler, ancak suyun elektrolizi nedeniyle gerilim penceresi yaklaşık 1.0 volt ile sınırlıdır [31].
- Organik Elektrolitler: Asetonitril veya propilen karbonatta tetraalkilamonyum tuzları gibi. Daha geniş gerilim penceresi (2.5-2.8 volt) sağlarlar, bu da daha yüksek enerji yoğunluğuna yol açar, ancak iletkenlikleri sulu elektrolitlerden daha düşüktür [32].
- İyonik Sıvılar: Bunlar oda sıcaklığında sıvı halde bulunan tuzlardır. Geniş gerilim penceresi ( $>3.0 \text{ volt}$ ), çok düşük buhar basıncı, yüksek termal stabilite ve

yanmazlık ile karakterize edilirler. Ancak dezavantajları arasında nispeten düşük iletkenlik, yüksek viskozite ve yüksek maliyet bulunur [17].

### **2.2.3. Ayırıcılar**

Ayırıcı, süperkapasitörde pozitif ve negatif elektrotlar arasında elektriksel kısa devreyi önlerken iyonların hareketine izin veren gözenekli bir membrandır [33]. En önemli ayırıcı türleri şunlardır:

- Kağıt Ayırıcılar: Selüloz kağıdı ve manila kağıdı gibi. Düşük maliyet ve kolay bulunabilirlik ile karakterize edilirler, ancak bazı elektrolitlerde zayıf mekanik dayanıklılık ve kimyasal stabilite sorunları yaşarlar [19].
- Polimer Ayırıcılar: Polipropilen (PP), polietilen (PE) ve politetrafloroetilen (PTFE) gibi. İyi kimyasal stabilite ve mekanik dayanıklılık sağlarlar ve ticari süperkapasitörlerde yaygın olarak kullanılırlar [24].

### **2.2.4. Süperkapasitör malzemelerindeki son gelişmeler**

Süperkapasitör malzemeleri, performanslarını iyileştirmek ve maliyetlerini düşürmek amacıyla sürekli gelişmektedir. En önemli son gelişmeler arasında şunlar yer almaktadır:

UCLA (University of California, Los Angeles) araştırmacıları tarafından yapılan bir çalışmada, dikey politiyofen ( Poly (3,4-ethylenedioxythiophene), PEDOT ) nanofiberleri üretmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yeni malzeme, geleneksel PEDOT'a kıyasla 100 kat daha yüksek iletkenlik ve 4 kat daha büyük aktif yüzey alanı sunarak enerji depolama kapasitesinde önemli bir artış sağlamaktadır. Bu malzemenin 70.000 şarj döngüsüne kadar dayanıklılık gösterdiği bildirilmiştir [34].

Kırklareli Üniversitesi'nde yapılan araştırmalarda, kobalt yerine nikel ve mangan gibi daha ekonomik metaller kullanılarak yeni elektrotlar geliştirilmektedir. Bu çalışmanın amacı, süperkapasitör bataryaların enerji yoğunluğunu arttırmak ve lityum-iyon bataryalara yakın performans elde etmektir [35].

Süperkapasitör malzemelerindeki bu gelişmeler, en önemli dezavantajlarından biri olan düşük enerji yoğunluğunun üstesinden gelme potansiyeli sunmakta ve elektrikli araç uygulamalarında daha geniş kullanım alanı açabilmektedir.

## **2.3. Elektrikli Araçlarda Süperkapasitör Uygulamaları**

### **2.3.1. Emisyonların azaltılmasında elektrikli araçların önemi**

Elektrikli araçlar, sürdürülebilir bir ulaşım seçeneği olarak öne çıkaran çeşitli avantajlara sahiptir [2]:

- Egzozdan doğrudan emisyon olmaması.
- Tasarım ve bakımda basitlik.
- Yüksek güvenilirlik.
- Düşük işletme maliyetleri.
- Sürüş sırasında konfor ve sessizlik.
- Enerji dönüşümünde yüksek verimlilik.
- Kullanım kolaylığı ve erişilebilirlik.

### **2.3.2. Elektrikli araçlarda enerji ile ilgili sorunlar**

Elektrikli araçların birçok avantajına rağmen, enerji depolama sistemleriyle ilgili önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Lityum-iyon bataryalar, sağladıkları yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle günümüzde elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan enerji depolama teknolojisidir. Ancak, bu bataryalar çeşitli sınırlamalara sahiptir:

- Sınırlı Güç Yoğunluğu: Bataryalar, çabuk hızlanma gibi kısa sürelerde yüksek güç sağlamakta zorlanırlar [19].
- Uzun Şarj Süreleri: Bataryaların şarj olması uzun zaman alır, bu da kullanıcı konforunu azaltır ve "menzil kaygısını" artırır [35].
- Sınırlı Ömür: Bataryalar, özellikle yüksek şarj ve deşarj akımlarına maruz kaldıklarında tekrarlanan kullanımla bozulurlar [12].
- Düşük Sıcaklıklarda Zayıf Performans: Bataryaların performansı düşük sıcaklıklarda önemli ölçüde düşer [36].
- Maliyet ve Sürdürülebilirlik Sorunları: Lityum-iyon bataryalar, bulunabilirlik ve sürdürülebilir çıkarma konusunda zorluklar yaşayan kobalt gibi hammaddelere bağımlıdır [35].

Bu zorluklar, araştırmacıları bataryalarla birlikte kullanıldığında bu sınırlamaların bazılarının üstesinden gelebilecek süperkapasitörler gibi tamamlayıcı çözümler aramaya yöneltmiştir.

### 2.3.3. Elektrikli araçlarda süperkapasitör uygulamaları

Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj ve uzun ömür gibi benzersiz özelliklerinden yararlanarak elektrikli ve hibrit araçlarda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır:

- *Rejeneratif Frenleme:*

Süperkapasitörler, frenleme sırasında kinetik enerjinin yüksek verimlilikle geri kazanılmasını sağlar. Frenleme sırasında üretilen yüksek şarj akımlarını bataryalardan daha iyi emebilirler, bu da daha fazla enerji geri kazanımı ve araç verimliliğinde iyileşme sağlar [37, 38].

- *Hızlanma Desteği:*

Süperkapasitörler, hızlanma ve yokuş tırmanma sırasında ek güç sağlayarak batarya üzerindeki stresi azaltır ve ömrünü uzatır [20]. Süperkapasitörler, performanslarını veya ömürlerini olumsuz etkilemeden kısa süreler için yüksek deşarj akımları sağlayabilir.

- *Soğuk Çalıştırma:*

Süperkapasitörler, düşük sıcaklıklarda performanslarını bataryalardan daha iyi korurlar, bu da soğuk koşullarda aracı çalıştırmak için gereken gücü sağlamada faydalıdır.

- *Yardımcı Güç Ünitesi:*

Süperkapasitörler, elektrikli direksiyon gibi araçtaki yardımcı elektrik sistemlerini beslemek için kullanılabilir, bu da ana batarya üzerindeki yükü azaltır.

- *Batarya ömrünü uzatma:*

Yüksek güç taleplerini karşılayarak, süperkapasitörler batarya üzerindeki stresi azaltır, derin deşarj ve aşırı ısınmayı önler, böylece batarya ömrünü uzatır [12].

Özellikle sık dur-kalk yapılan şehir içi otobüsleri gibi bazı özel uygulamalarda, süperkapasitörler ana enerji depolama sistemi olarak veya bataryalarla hibrit bir sistemde kullanılabilir [38-40]. Bu durumlarda, süperkapasitörler her durakta hızla şarj edilebilir, bu da bir sonraki durağa ulaşmak için yeterli çalışma menzili sağlar.

#### 2.3.4. Hibrit enerji depolama sistemleri (batarya-süperkapasitör)

Bataryaların (yüksek enerji yoğunluğu) ve süperkapasitörlerin (yüksek güç yoğunluğu) tamamlayıcı özellikleri nedeniyle, bunları bir hibrit enerji depolama sisteminde (HEDS) birleştirmek, elektrikli araçların gereksinimlerini karşılamak için daha iyi bir çözüm sunabilir [41]. Bu sistemlerde, bataryalar uzun sürüş menzili sağlamak için ana enerji kaynağı olarak işlev görürken, süperkapasitörler tepe güç taleplerini karşılamak ve rejeneratif frenleme sırasında enerji emmek için yardımcı güç kaynağı olarak işlev görür [42].

Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinin Faydaları:

- Batarya Ömrünü İyileştirme: Yüksek güç taleplerini süperkapasitörlere yönlendirerek batarya üzerindeki stresi azaltma [41].
- Enerji Geri Kazanım Verimliliğini İyileştirme: Süperkapasitörler, rejeneratif frenleme sırasında yüksek şarj akımlarını bataryalardan daha yüksek verimlilikle emebilir [18].
- Hızlanma Performansını İyileştirme: Hızlanma ve yokuş tırmanma sırasında ek güç sağlamaktadır [43].
- Düşük Sıcaklıklarda Performansı İyileştirme: Süperkapasitörler, düşük sıcaklıklarda performanslarını bataryalardan daha iyi korurlar [17].
- Batarya Boyutunu Küçültme: Süperkapasitörler yüksek güç taleplerini karşıladığında, batarya paketi daha küçük boyutlandırılabilir [29].

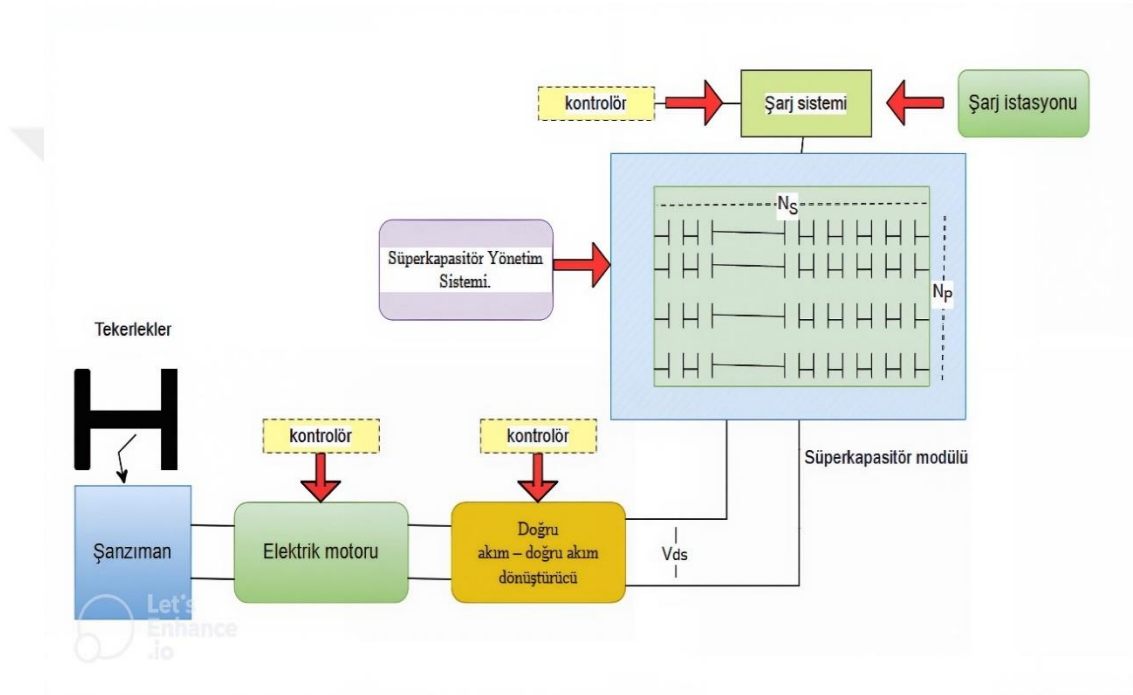
Hibrit enerji depolama sistemi konfigürasyonları:

1. Pasif Konfigürasyon: Batarya ve süperkapasitörleri herhangi bir kontrol devresi olmadan doğrudan paralel bağlama [19]. Bu konfigürasyon basit ve güvenilirdir, ancak enerji akışının optimal kontrolüne izin vermez.
2. Yarı Aktif Konfigürasyon: Süperkapasitörlere veya bataryaya giden/gelen enerji akışını kontrol etmek için bir DC-DC dönüştürücü kullanma [44]. Orta düzeyde karmaşıklıkla daha iyi kontrol sağlar.
3. Aktif Konfigürasyon: Batarya, süperkapasitörler ve yük arasındaki enerji akışının tam kontrolü için iki DC-DC dönüştürücü kullanma [45]. Daha yüksek karmaşıklık ve maliyetle maksimum esneklik ve kontrol sağlar.

Çeşitli çalışmalar, hibrit enerji depolama sistemlerinin kullanımının elektrikli araçların verimliliğini %20'ye kadar artırabildiğini ve batarya ömrünü %50'ye kadar uzatabildiğini göstermiştir [45].

### 2.3.5. Elektrikli araçlarda güç aktarma sisteminin tanımı

Bir elektrikli aracın güç aktarma sisteminin temel yapısı ve çalışma prensibi Şekil 2.1'de açıklamaktadır. Sistem, aracın hareketini sağlayan ve enerji kullanımını en verimli hâle getiren çeşitli birimlerden oluşmaktadır. Aşağıda, sistemde yer alan ana bileşenler ve görevleri özetlenmiştir [46].



**Şekil 2.2.** Elektrikli Araçlarda Güç Aktarma Sisteminin Blok Diyagramı [46].

#### ❖ Temel sistem bileşenleri

1. Tekerlekler: Aracın kara yolunda ilerlemesini sağlayan nihai tahrik parçalarıdır.
2. Şanzıman: Elektrik motorundan gelen mekanik gücü tekerleklere iletir ve farklı sürüş koşullarında tork ile hız oranlarını dengeleyerek motorun verimli çalışmasını mümkün kılar.
3. Elektrik Motoru: Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren ana tahrik sistemidir. Aracın hareket etmesini sağlar.

4. Kontrol Ünitesi (Kontrolör): Elektrik motoru, şarj sistemi ve diğer alt bileşenlerin çalışmasını düzenleyen elektronik denetim birimidir. Güç akışını optimize eder ve sistem verimliliğini artırır.
5. DC-DC Dönüştürücü: Süperkapasitör modülünden gelen doğru akımı, elektrik motorunun ve diğer DC yüklerin ihtiyaç duyduğu uygun gerilim seviyesine dönüştürür. Farklı voltaj seviyeleri arasında uyum sağlar.
6. Süperkapasitör Yönetim Sistemi: Süperkapasitör modülünün şarj ve deşarj işlemlerini kontrol eder. Hücreler arasında denge sağlar ve modülün ömrünü uzatır. Aşırı yüklenme ve boşalma durumlarını engeller.
7. Süperkapasitör Modülü: Yüksek güç yoğunluğuna sahip enerji depolama birimidir. Özellikle frenleme sırasında enerji geri kazanımı (rejeneratif frenleme) ve hızlanma esnasında ekstra güç sağlamak için kullanılır.  $N_s$  seri bağlı hücre sayısını,  $N_p$  ise paralel bağlı hücre sayısını ifade eder.
8. Şarj Sistemi: Harici güç kaynağından gelen elektriği süperkapasitör modülünü şarj etmek üzere uygun formata dönüştürür.
9. Şarj İstasyonu: Elektrikli aracın süperkapasitör modülünü yeniden şarj etmek amacıyla kullanılan dış enerji kaynağıdır.

#### ❖ Sistemin İşleyişi

Elektrikli araç çalışırken, elektrik motoru tarafından üretilen mekanik güç şanzıman yardımıyla tekerleklere aktarılır. Bu motor, enerjisini süperkapasitör modülünden alır. Gerilim seviyesi ise DC-DC dönüştürücü aracılığıyla motorun ihtiyacına göre ayarlanır. Kontrol ünitesi tüm sistem bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlar.

Araç fren yaparken, motor jeneratör gibi davranarak kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Bu enerji süperkapasitör modülünde depolanır (rejeneratif frenleme), böylece enerji tasarrufu sağlanır.

Süperkapasitör Yönetim Sistemi, bu enerji modülünün durumunu sürekli izleyerek dengeli ve güvenli çalışmasını garanti altına alır. Enerji azaldığında veya periyodik aralıklarla, şarj istasyonu üzerinden şarj sistemi aracılığıyla enerji modülü tekrar şarj edilir.

Bu entegre yapı sayesinde elektrikli araçlar daha yüksek verimlilikle, çevreye duyarlı ve performanslı bir şekilde çalışmaktadır.

## 2.4. Süperkapasitör Bankası Boyutlandırma ve Maliyet Tahmini

Elektrikli araçlarda, süperkapasitör enerji depolama sistemi genellikle istenen gerilim ve kapasiteyi elde etmek için seri ve/veya paralel bağlı bir dizi bireysel hücreden oluşan bir banka (SK bank) olarak tasarlanır [12,21]. Süperkapasitör bankasının doğru tasarımı, optimal performans, güvenilirlik ve makul maliyet sağlamak için kritik öneme sahiptir.

### 2.4.1. Süperkapasitör bankası tasarım ilkeleri

Elektrikli araçlar için bir süperkapasitör bankası tasarlarken, çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır:

- **Gerilim gereksinimleri:** Süperkapasitör bankasının gerilimi, elektrikli aracın gerilim sistemi ile uyumlu olmalıdır. Bireysel hücrenin maksimum gerilimi sınırlı olduğundan (organik elektrolitler için genellikle 2.5-2.8 volt), istenen gerilimi elde etmek için hücreler seri bağlanır [43].
- **Kapasite ve enerji gereksinimleri:** Depolanması gereken enerji miktarı, paralel bağlı hücrelerin sayısını belirler [29].
- **Güç gereksinimleri:** Süperkapasitör bankası, hızlanma sırasında gereken gücü sağlayabilmeli ve rejeneratif frenleme sırasında gücü emebilmelidir. Maksimum güç, ESR ve çalışma gerilimine bağlıdır [47].
- **Gerilim dengeleme:** Hücreler seri bağlandığında, kapasitans ve kaçak akımlardaki farklılıklar nedeniyle hücreler arasında gerilim farklılıkları oluşabilir. Bu nedenle, gerilimin eşit dağılımını sağlamak ve hücre hasarını önlemek için gerilim dengeleme devreleri kullanılmalıdır [44].
- **Isı yönetimi:** Özellikle yüksek şarj ve deşarj akımlarında hücrelerin iç direncinden kaynaklanan ısı dağılımı dikkate alınmalıdır [19].
- **Boyut ve ağırlık:** Süperkapasitör bankası, özellikle montaj alanı ve ağırlığın önemli olduğu elektrikli araç uygulamalarında mümkün olduğunca kompakt ve hafif olmalıdır [45].

### 2.4.2. Süperkapasitör bankası maliyet tahmini

Süperkapasitör bankasının maliyeti çeşitli faktörlere bağlıdır, en önemlileri şunlardır:

- **Bireysel Hücre Maliyeti:** Bireysel hücrelerin maliyeti kapasitans, gerilim, kullanılan teknoloji ve üreticiye göre değişir. Genel olarak, süperkapasitörlerin

maliyeti depolanan enerji başına 10-20 ABD doları/kilojoule arasında değişir, bu da lityum-iyon bataryaların 5-10 ABD doları/kilojoule maliyetiyle karşılaştırılabilir [15].

- Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Maliyeti: Gerilim dengeleme devreleri, izleme ve kontrol sistemleri ve koruma sistemlerini içerir. Bu sistemler genellikle bankanın toplam maliyetinin %20-30'unu oluşturur [44].
- Soğutma ve Paketleme Maliyeti: Soğutma gereksinimleri, çalışma koşulları ve gereken mekanik korumaya bağlıdır.
- Entegrasyon ve Kurulum Maliyeti: Süperkapasitör bankasını elektrikli araç sistemine entegre etmek için gereken işçilik ve malzemeleri içerir.

Tam yaşam döngüsü maliyeti karşılaştırıldığında, süperkapasitörler özellikle sık şarj/deşarj döngüleri gerektiren uygulamalarda bataryalardan daha ekonomik olabilir. Bu, süperkapasitörlerin çok uzun ömrüne (500.000-1.000.000 döngü) kıyasla bataryaların daha kısa ömrüne (1.000-2.000 döngü) bağlıdır [30].

Kocaman (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, kentsel alanlarda çalışan bir elektrikli otobüs için süperkapasitör bankasının maliyeti analiz edilmiştir. Çalışma, bankanın ilk maliyetinin eşdeğer lityum-iyon bataryalardan daha yüksek olduğunu, ancak otobüsün ömrü boyunca (15 yıl) toplam maliyetin daha düşük olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, süperkapasitörlerin değiştirilmesine gerek olmaması, ancak aynı dönemde bataryaların 2-3 kez değiştirilmesi gerektiğidir [21].

#### **2.4.3. Vaka çalışmaları ve pratik uygulamalar**

Elektrikli araçlarda süperkapasitörlerin başarılı kullanımına dair birçok örnek vardır:

Elektrikli şehir otobüsleri: Çin'in Şanghai şehrinde, 2006'dan beri süperkapasitörlerle çalışan bir elektrikli otobüs filosu işletilmektedir. Bu otobüsler, duraklarda hızlı şarj özelliği (10-30 saniye) ile karakterize edilir, bu da gün boyunca sürekli çalışmalarını sağlar [49].

Elektrikli yarış araçları: Formula E yarışlarında, bazı takımlar yarış sırasında enerji depolamak ve geri kazanmak için süperkapasitörlere dayalı Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi (Kinetic Energy Recovery System, KERS) kullanır [48].

Tramvay ve hafif raylı sistemler: Almanya'nın Heidelberg şehrinde, tramvay sistemi frenleme enerjisini geri kazanmak ve hızlanma için kullanmak üzere

süperkapasitörlere dayalı bir enerji depolama sistemi ile donatılmıştır, bu da enerji tüketimini %30'a kadar azaltmıştır [50].

Hibrit araçlar: Toyota TS040 Hybrid gibi dayanıklılık yarışlarına katılan bazı hibrit araçlar, bataryalar ve süperkapasitörleri birleştiren hibrit enerji depolama sistemleri kullanır [46].

Bu örnekler, ister ana enerji depolama sistemi olarak, ister belirli uygulamalarda yardımcı sistem olarak kullanılsın süperkapasitörlerin elektrikli araçların performansını ve verimliliğini iyileştirmedeki pratik potansiyelini göstermektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, Bansal ve diğerleri [46] tarafından önerilen basit analitik yaklaşımı temel alarak, belirli bir enerji kapasitesine ulaşmak amacıyla farklı çalışma gerilimlerinde ihtiyaç duyulan toplam süperkapasitör hücresi sayısının hesaplanma yöntemini ve bu sayının ilk yatırım maliyetinin tahminine olan etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır.



### **3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA SÜPERKAPASİTÖR BANKASININ TASARIMI VE ANALİZİ**

Bu bölümde elektrikli araçlarda kullanılan süperkapasitör modüllerinin kapsamlı tasarım esasları sunulmaktadır. Süperkapasitör seçimi, elektriksel özelliklerin belirlenmesi, seri ve paralel bağlantı teknikleri, gerilim dengeleme yöntemleri, termal yönetim çözümleri, konfigürasyon analizi ve güvenlik kriterleri detaylı biçimde ele alınmaktadır. Böylece, elektrikli araç enerji depolama sistemlerinde süperkapasitör kullanımının avantajları, sınırlamaları ve tasarım gereksinimleri bütüncül şekilde değerlendirilmektedir.

#### **3.1. Elektrikli Araçlar İçin Süperkapasitör Modüllerinin Tasarım Gereksinimleri**

Süperkapasitör modüllerinin tasarımı için kesin gereksinimlerin belirlenmesi, elektrikli araçlar için etkili bir enerji depolama sistemi geliştirilmesinde ilk ve temel adımdır. Bu gereksinimler, aracın tipine, kullanım amacına ve öngörülen çalışma koşullarına göre farklılık göstermektedir. Bu bölümde, elektrikli araçlar için süperkapasitör modülleri tasarlanırken dikkate alınması gereken başlıca gereksinimler tartışılacaktır.

##### **3.1.1. Gerilim ve akım gereksinimleri**

Gerilim ve akım gereksinimleri esas olarak aracın elektrikli tahrik sisteminin teknik özelliklerine bağlıdır. Modern elektrikli araçlardaki tahrik sistemlerinin gerilimleri, hafif hibrit sistemlerde 48 volt ile yüksek performanslı elektrikli araçlarda 800 volt arasında değişmektedir [38].

##### **3.1.1.1. Gerilim gereksinimleri**

Süperkapasitör ünitesinin, aracın sistemi için gereken gerilim aralığında çalışabilmesi gerekmektedir. Tek bir süperkapasitör hücresinin nominal gerilimi genellikle 2,5 ile 2,7 volt arasındadır [5]. Bu nedenle, sistemde istenen gerilim değerine ulaşmak için uygun sayıda hücrenin seri olarak bağlanması gerekir. Örneğin, 400 voltluk bir sistem için yaklaşık 150–160 hücrenin seri bağlanması gereklidir.

Ayrıca şu hususlar dikkate alınmalıdır:

- Gerilim Çalışma Aralığı: Enerji verimliliğini ve sistem ömrünü korumak amacıyla genellikle nominal gerilimin %50–100’ü arasında tutulur [51].
- Geçici Gerilim Dayanımı: Regeneratif frenleme sırasında meydana gelebilecek ani gerilim yükselmelerine dayanabilmelidir.
- Gerilim Düşüşü: Deşarj sırasında süperkapasitör ünitesinin düşebileceği minimum kabul edilebilir gerilim seviyesidir.

### **3.1.1.2. Akım gereksinimleri**

Süperkapasitör ünitesinin akım gereksinimleri, aracın dinamik çalışma koşullarına bağlı olarak belirlenmekte ve üç temel kategoriye ayrılmaktadır. İlk olarak, maksimum deşarj akımı, genellikle ani hızlanma veya yokuş tırmanma sırasında ortaya çıkar ve motorun kapasitesine bağlı olarak yüzlerce amper seviyesine ulaşabilir. İkinci olarak, maksimum şarj akımı, yoğun regeneratif frenleme sırasında meydana gelir; bu durumda süperkapasitör ünitesi, bu akımı güvenlik sınırlarını aşmadan absorbe edebilmelidir. Üçüncü olarak, sürekli çalışma akımı, süperkapasitörün uzun süre boyunca önemli bir sıcaklık artışı ya da elektrokimyasal bozulma olmadan taşıyabileceği akımı ifade eder [43].

Süperkapasitörler yüksek şarj ve deşarj akımlarını yönetme kapasitesi bakımından bataryalardan üstündür ve nominal kapasitelerinin 100 katına kadar (100C) akım sağlayabilir veya çekebilir [18,43].

### **3.1.2. Kapasite ve enerji gereksinimleri**

Süperkapasitör ünitesinin kapasitesi, depolanabilecek toplam enerji miktarını belirler ve elektrikli aracın performansına süperkapasitörlerin katkısını doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur.

#### **3.1.2.1. Kapasite gereksinimleri**

Süperkapasitörlerin sistemdeki farklı görevlerine göre kapasite gereksinimleri değişmektedir. Örneğin, modellere göre hızlanma için gereken toplam hücre sayısı dikkate alınarak uygun kapasite değeri belirlenir [43]. Sürüş Döngüsü: Beklenen sürüş döngüsünün doğası kapasite gereksinimini etkiler. Sık dur-kalk yapılan kentsel kullanım senaryolarında sık regeneratif frenleme enerjisini depolamak için daha yüksek kapasiteye ihtiyaç duyulur [52].

Gerekli Tepki Süresi: Enerjinin sağlanması için gereken süre ne kadar kısa ise, hızlı deşarj sırasında gerilim düşüşünü azaltmak amacıyla kapasitenin o kadar yüksek olması gerekir [53].

#### 3.1.2.2. . Enerji gereksinimleri

Süperkapasitörde depolanan enerji aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$E = 0.5 \times C \times V^2 \quad (3.1)$$

Burada:

- E: Enerji (joule cinsinden),
- C: Kapasite (farad cinsinden),
- V: Gerilim (volt cinsinden) olarak tanımlanır.

Süperkapasitörlerin özgül enerji değerleri genellikle 5–10 Wh/kg arasında değişmekte olup, bu değerler lityum-iyon bataryalara kıyasla oldukça düşüktür . Enerjinin kullanılabilirliği, süperkapasitörlerin çalışma geriliminin karesi ile orantılıdır; dolayısıyla teorik toplam enerjiye kıyasla kullanılabilir enerji daha azdır. Örneğin, süperkapasitörler tam şarj geriliminden yarı gerilime kadar deşarj edildiğinde, depolanan enerjinin yaklaşık %75'i kullanılabilir. Ayrıca, hacimsel enerji yoğunluğu 10–20 Wh/litre aralığında olup, bu parametre sistemin boyutlandırılmasında kritik rol oynar [54].

#### 3.1.3. Hacim ve ağırlık gereksinimleri

Hacim ve ağırlık konuları, elektrikli araçlar için süperkapasitör modüllerinin tasarımında kritik faktörler arasında yer almakta olup, aracın verimliliği ve menzili üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

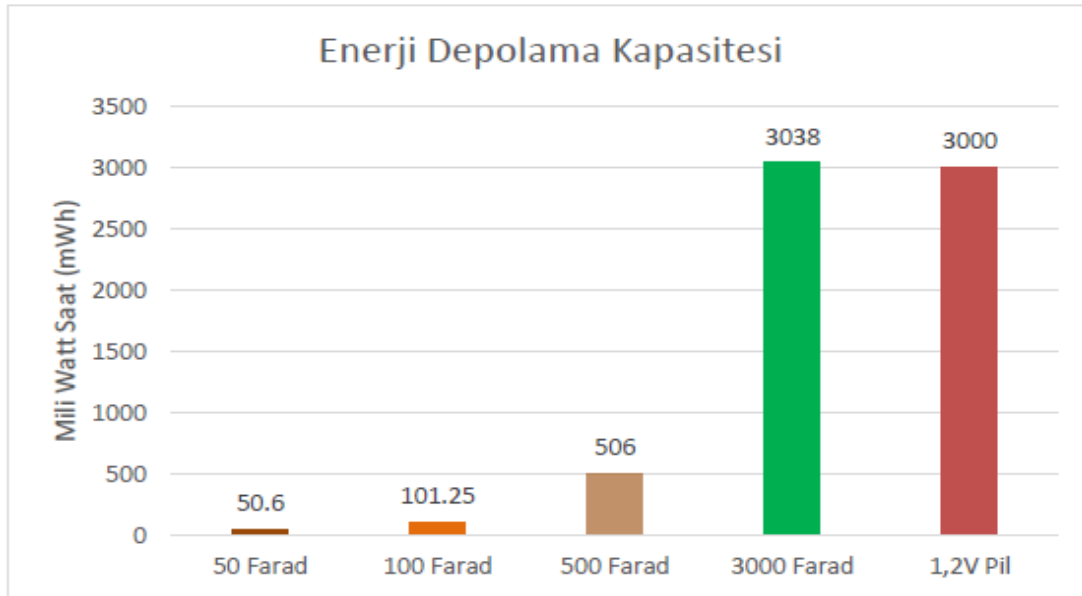
##### 3.1.3.1. Hacim gereksinimleri

Elektrikli araçlar için süperkapasitör modüllerinin tasarımında; modülün toplam hacmi, şekli ve enerji yoğunluğu gibi birçok kriter dikkate alınmalıdır. Bu modüllerin araca entegre edilebilmesi için kompakt bir yapıya sahip olmaları gerekirken, aynı zamanda araç içindeki sınırlı alanla uyumlu bir geometrik yerleşim sunmaları önemlidir. Süperkapasitörlerin hacimsel enerji yoğunluğu genellikle yaklaşık 10 Wh/L civarındadır ve bu değer, lityum-iyon bataryaların sahip olduğu 200–500 Wh/L aralığına kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, benzer miktarda enerji depolamak için

süperkapasitörlerin daha fazla fiziksel alana ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Öte yandan, süperkapasitörlerin hacimsel güç yoğunluğu 10 ila 30 kW/L arasında değişmekte olup, bu değer bataryalara göre (1–2 kW/L) oldukça yüksektir. Bu özellik sayesinde süperkapasitörler, kısa sürede yüksek güç talep edilen uygulamalarda avantaj sağlamaktadır [55].

Süperkapasitör modül tasarımında hacim, özellikle EA'lar, taşınabilir cihazlar ve akıllı şehir altyapısı gibi uygulamalarda sınırlı alan ve kompaktlık ihtiyacı nedeniyle kritik bir tasarım faktörüdür [46]. Süperkapasitörlerin seri ve paralel bağlanmasıyla oluşturulan kapasitör bankalarının büyük boyutları, araçların içine monte edilme imkanını engellemektedir [56]. Süperkapasitör geliştirmenin temel zorluklarından biri, enerji yoğunluğunu artırmak ve minyatürleştirmeyi başarmaktır [15]. Gelecekte, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip daha kompakt süperkapasitörlerin geliştirilmesi beklenmektedir [57].

Süperkapasitörler, istenen voltaj ve kapasite değerlerine ulaşmak için seri ve paralel kombinasyonlarda bağlanır, bu da doğal olarak toplam modül hacmini etkiler [57]. Farklı kapasitörlerin ve 1.2 V AA pilin enerji depolama kapasiteleri Şekil 3.1’de verilmiştir [56].



**Şekil 3.1.** Farklı kapasitörlerin enerji depolama karakteristiği [56]

Örneğin, 1.2 V'luk bir AA kalem pille yaklaşık 3000 mWh enerji depolayabilen 3000 F'lık bir ultra kapasitörün, AA pile kıyasla boyut olarak yaklaşık 10 kat daha büyük olduğu Şekil 3.2’de verildiği gibidir. Bu, aynı enerji depolama kapasitesini elde etmek

için süperkapasitör bankalarının bataryalara göre daha fazla hacim kaplayabileceğini göstermektedir [56].



**Şekil 3.2.**Kalem pil ile 3000 F ultra kapasitör [56]

Bir elektrikli araçta 50 kW'lık bir motoru beslemek üzere tasarlanacak 270 V, 100 kWh (35,420 Wh) kapasiteli bir ultra kapasitör bankası için, Tesla'nın batarya düzenlemesine benzer şekilde 7000 adet 500 F'lık kapasitör kullanılması gerektiği öngörülmüştür. Bu, otomotiv uygulamaları için gereken toplam hacmin önemli boyutlarda olabileceğini göstermektedir [56].

Optimal boyutlandırma yaklaşımları, bir dizi bağlı hücre ( $N_s$ ) ve paralel bağlı dallar ( $N_p$ ) kullanarak süperkapasitör modüllerini oluşturur. Bu yapılandırma, sistemin gerekli voltaj ve kapasite özelliklerini karşılarken, eşdeğer seri direnç (ESR) gibi parametrelerin de optimize edilmesini sağlar. ESR'nin minimize edilmesi, güç kayıplarını azaltarak sistemin verimliliğini artırır, bu da daha kompakt ve hafif bir tasarıma olanak tanır [18, 58].

Ancak bazı kaynaklar, süperkapasitörlerin bataryalara veya elektrolitik kapasitörlere kıyasla daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olduğunu ve daha küçük hacim ve ağırlıkla birlikte geldiğini belirtmektedir. Bu durum, özellikle yüksek anlık güç (kW) gerektiren uygulamalarda, süperkapasitörlerin belirli bir performans için daha kompakt bir sistem çözümü sunabileceği anlamına gelebilir [18].

Sonuç olarak, süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj yetenekleriyle öne çıksa da, benzer enerji depolama kapasitesine sahip bataryalara kıyasla bankalar halinde genellikle daha büyük hacim kaplarlar. Ancak malzeme ve mimari tasarımdaki sürekli ilerlemeler, hacimsel performansı önemli ölçüde artırmaya devam etmektedir.

### 3.1.3.2. Ağırlık gereksinimleri

Süperkapasitörlerin elektrikli araçlarda kullanımında, sistemin toplam ağırlığının aracın genel performansını ve menzilini olumsuz etkilemeyecek düzeyde tutulması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, süperkapasitör ünitesinin kütleli enerji yoğunluğu tipik olarak 5–10 Wh/kg aralığında yer almakta olup, bu değer bataryaların 100–250 Wh/kg seviyesindeki enerji yoğunluğuna göre oldukça düşüktür. Öte yandan, süperkapasitörlerin kütleli güç yoğunluğu 5–10 kW/kg düzeyinde olduğundan, bataryaların 0,5–1 kW/kg’lık güç yoğunluğuna kıyasla önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu teknik özelliklerin yanı sıra, sistemin araca entegrasyonunda ağırlık dağılımı da dikkatle planlanmalı, böylece araçta denge ve sürüş stabilitesi sağlanmalıdır [17].

Hacim ve ağırlık arasında daha iyi bir denge sağlamak amacıyla şu stratejiler uygulanabilir [59].

- Ünite gövdesi ve muhafazasında hafif malzemeler kullanmak.
- Hücrelerin yerleşimini optimize ederek kullanılmayan boşlukları azaltmak.
- Büyük ve ağır soğutma sistemlerine olan ihtiyacı azaltan etkili termal yönetim çözümleri kullanmak.

### 3.1.4. Termal performans gereksinimleri

Sıcaklık, süperkapasitörlerin performansı ve ömrü üzerinde önemli ölçüde etkili olup, termal yönetimi elektrikli araçlar için süperkapasitör modüllerinin tasarımında kritik bir unsur hâline getirmektedir.

#### 3.1.4.1. Çalışma sıcaklığı aralığı

Süperkapasitör ünitesi, çeşitli çevresel koşullar altında yüksek verimlilikle çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda, örneğin -40 °C’ye kadar olan değerlerde, bataryaların performansı belirgin şekilde azalırken süperkapasitörler daha kararlı bir performans sergilemektedir. Aynı zamanda, ünitenin sürekli çalışma koşullarında 65 °C’ye kadar olan yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması ve kısa süreli aşırı sıcaklıklara karşı tolerans gösterebilmesi beklenmektedir. Ayrıca, ani sıcaklık değişimlerinin sıkça yaşandığı operasyonel ortamlarda süperkapasitörlerin bu hızlı termal geçişlere karşı dirençli olması, uzun ömür ve güvenli çalışma açısından büyük önem taşımaktadır [51].

#### 3.1.4.2. Sıcaklığın performans üzerindeki etkisi

Süperkapasitörlerin iç direnci sıcaklık düştükçe artar; özellikle  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $-40^{\circ}\text{C}$  aralığında ESR'nin yaklaşık iki katına çıktığı gözlemlenmiştir 'bu da enerji verimliliğini azaltır ve çalışma sırasında daha fazla ısı oluşmasına neden olur 'ayrıca kapasite de  $25^{\circ}\text{C}$ 'den  $-40^{\circ}\text{C}$ 'ye düştüğünde genellikle %10–20 oranında azalır. Servis ömrü açısından ise Arrhenius kanununa uygun olarak her  $10^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık artışı, hücrenin bozulma hızını yaklaşık iki katına çıkarır 'çünkü yüksek sıcaklıkta meydana gelen kimyasal reaksiyonlar elektrolit ayrışmasını ve performans azalmasını hızlandırır [16, 31, 60].

#### 3.1.4.3. Soğutma gereksinimleri

Soğutma sistemi aşağıdaki işlevleri yerine getirmelidir [52]:

- Üretilen ısıнын dağıtılması: Şarj ve deşarj döngülerinde, süperkapasitörlerin iç direnci nedeniyle oluşan ıyı etkili şekilde uzaklaştırmalıdır.
- Homojen sıcaklık dağılımının korunması: Hücrelerdeki termal gerilimi ve dengesiz bozulmayı önlemek amacıyla sıcaklık eşit dağılmalıdır.
- Termal yük değişimlerine hızlı tepki verme: Özellikle yoğun çalışma döngülerinde ani sıcaklık artışlarına karşı hızlı bir soğutma tepkisi sağlamalıdır.
- Farklı çevresel koşullarda verimli çalışabilme: Soğuk iklimlerden sıcak ortamlara kadar değişen çevre koşullarında etkin şekilde çalışmalıdır.

#### 3.1.5. Güvenilirlik ve ömür gereksinimleri

Güvenilirlik ve beklenen ömür, süperkapasitör ünitelerinin elektrikli araçlarda kullanılabilirliğini değerlendirmede kritik faktörlerdir. Özellikle geleneksel bataryalarla kıyaslandığında bu faktörler daha da önem kazanmaktadır.

##### 3.1.5.1. Beklenen ömür gereksinimleri

Süperkapasitör üniteleri şu gereksinimleri karşılamalıdır [44]:

- Şarj/deşarj döngü sayısı: Ünite, performansta önemli bir düşüş olmaksızın yüz binlerce hatta milyonlarca şarj/deşarj döngüsüne dayanmalıdır. Bu, süperkapasitörlerin en önemli avantajlarından biridir; zira bataryalar genelde sadece birkaç bin döngüye dayanabilir.

- Çalışma ömrü: Beklenen kullanım ömrü en az 10–15 yıl olmalıdır ve bu süre aracın ömrüyle uyumlu olmalıdır.
- Performans bozulma oranı: Çalışma süresi boyunca kapasite kaybı oranı %20’yi geçmemeli, iç direnç ise orijinal değerinin %100’ünden fazla artmamalıdır.

### 3.1.5.2. Güvenilirlik gereksinimleri

Aşağıdaki hususlara dikkat çekmektedir [61]:

1. Arıza oranı: Süperkapasitör ünitesinin arıza oranı son derece düşük olmalı, genellikle yılda 1 milyonda 100 parça (100 PPM) seviyesinin altında kalmalıdır.
2. Arıza mekanizmaları: Ünite, aşağıda sıralanan yaygın arıza mekanizmalarına karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır:
  - Elektrolit sızıntısı.
  - Elektriksel izolasyon kaybı.
  - Aktif malzemelerin bozulması.
  - İç bağlantıların arızası.
  - Gerilim dengeleme sistemlerinin bozulması.

Zorlu çalışma koşullarında kararlılık: Ünite, titreşim, darbe, nem ve aşırı sıcaklık gibi zorlayıcı çevresel koşullarda performansını korumalıdır.

Güvenilirlik ve Ömür Artırma Stratejileri:

Aşağıdaki yöntemlerle güvenilirlik ve ömür iyileştirilebilir [52]:

- Koruyucu tasarım: Süperkapasitörlerin nominal gerilimin %90–95’i gibi daha düşük gerilimlerde çalıştırılması.
- Etkili sıcaklık yönetimi: Çalışma sıcaklığının 15–35 °C aralığında tutulması.
- Hassas gerilim dengelemesi: Seri bağlı hücreler arasında gerilimin eşit şekilde dağıtılması ve düzensiz gerilim stresinin önlenmesi.
- Sürekli izleme: Performanstaki sapmaları erken aşamada tespit etmek için gelişmiş izleme sistemlerinin uygulanması.
- Modüler tasarım: Sistemin tamamını değiştirmeye gerek kalmadan arızalı bileşenlerin kolayca değiştirilebilmesi.

### 3.1.6. Emniyet gereksinimleri

Enerji depolama sistemlerinin, özellikle elektrikli araçlarda kullanılan süperkapasitörlerin tasarımında güvenlik en öncelikli konudur. Süperkapasitörler bazı açılardan bataryalara göre daha güvenli kabul edilse de, kendine özgü riskler taşır ve dikkatle yönetilmelidir.

#### 3.1.6.1. Başlıca güvenlik riskleri

Süperkapasitörlerle ilişkili temel güvenlik riskleri şunlardır [51, 52]:

- Elektriksel riskler: Çok yüksek miktarda enerjiyi hızlıca depolayıp boşaltabildiklerinden, yanlış kullanım durumunda ciddi elektrik çarpması, yanıklar veya elektrik arkı oluşturabilirler.
- Termal riskler: Zorlu çalışma koşulları veya arızalar aşırı sıcaklık artışına yol açabilir, bu durum bileşenlerde hasar ya da nadiren yangın riskine neden olabilir.
- Kimyasal riskler: Bazı süperkapasitörlerde, sızıntı durumunda tehlike oluşturabilecek yanıcı veya toksik organik elektrolitler bulunur.
- Mekanik riskler: Şiddetli titreşim, darbe veya mekanik deformasyon iç yapıda hasara yol açarak kısa devreye veya diğer arızalara neden olabilir.

#### 3.1.6.2. Emniyet gereksinimleri

Üniteler, aşağıdaki koruma önlemlerine sahip olmalıdır [59, 61]:

- Aşırı gerilim koruması: Gerilimin güvenli sınırların üzerine çıkmasını önlemek için sınırlama devreleri veya anahtar sistemleri bulunmalıdır.
- Aşırı akım koruması: Aşırı şarj veya deşarj akımları tespit edilmeli ve sınırlandırılmalıdır; aksi halde sıcaklık yükselmesi veya bileşen arızası oluşabilir.
- Aşırı sıcaklık koruması: Sıcaklık sensörleri ve aşırı sıcaklık durumunda akımı sınırlayacak veya sistemi kapatacak mekanizmalar yer almalıdır.
- Kısa devre koruması: Kısa devre durumlarında sistemi koruyacak sigortalar veya devre kesiciler içermelidir.
- Elektriksel izolasyon: Aktif parçalar ile aracın metal gövdesi arasında yeterli izolasyon sağlanmalıdır.
- Sızıntı kontrolü: Kaplama, olası elektrolit sızıntısını güvenli şekilde içerecek kapasitede olmalıdır.

- Darbe ve titreşim dayanımı: Ünite, araç çalışması sırasında maruz kalabileceği mekanik zorlanmalara dayanabilmelidir.
- Basınç tahliye mekanizmaları: Arıza durumunda oluşabilecek aşırı basıncı tahliye edecek sistemler bulunmalıdır.

### 3.1.6.3. Emniyet standartları ve sertifikalar

Elektrikli araçlarda kullanılan süperkapasitör üniteleri aşağıdaki standartlarla uyumlu olmalıdır [61]:

- Araçlardaki elektrikli ve elektronik donanımlar için çevresel ve mekanik testler (Environmental and mechanical testing for electrical and electronic equipment in road vehicles, ISO 16750).
- Araç fonksiyonel güvenliği standartları (Functional safety standards for road vehicles, ISO 26262).
- Elektrokimyasal kapasitörlerin güvenlik standardı (Safety standard for electrochemical capacitors, UL 810A).
- Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan yüksek kapasiteli kapasitörler için standart (High-capacitance capacitors for use in hybrid electric vehicles, IEC 62576)
- Lityum içeren bazı süperkapasitör tipleri için taşıma testi ve güvenlik gereksinimleri (Transport testing and safety requirements for certain lithium-containing supercapacitor types, UN 38.3).

### 3.1.7. Maliyet gereksinimleri

Enerji depolama sistemi boyutlandırmasında temel amaçlardan biri, maliyet, ağırlık ve hacim gibi hedefleri en aza indirmektir [20]. Özellikle elektrikli araçlar gibi uygulamalarda, genel depolama sistemi ağırlığını en aza indirmek kritik öneme sahiptir, ancak maliyet de diğer uygulamalar için önemli bir kriterdir [62].

Endüstri, süperkapasitörlerin üretim maliyetlerini düşürmeye odaklanmaktadır. Küresel süperkapasitör pazarında malzeme maliyeti büyük bir kısıtlamadır [15].

Süperkapasitör bankalarının pil bankalarına göre ana dezavantajlarından biri daha yüksek fiyattır [63]. Ticari düzeyde kullanılan süperkapasitörlerin yüksek maliyeti ve düşük enerji yoğunluğu, onların şimdilik pillerin yerini almasını engellemektedir [20]. Süperkapasitörler, aynı enerji depolama kapasitesine sahip pillere göre daha büyük

boyutludur. Bu durum, araçlara entegrasyonu zorlaştırır ve yerleştirme maliyetlerini etkileyebilir [56].

Öte yandan süperkapasitörler, pillere kıyasla çok daha uzun ömürlüdür (pillere göre 1000 kata kadar daha uzun çevrim ömrü) ve düşük bakım gerektirir, bu da uzun vadede işletme maliyetlerini azaltır [18,19, 64]. Süperkapasitörler saniyeler içinde şarj olabilme özelliğine sahiptir[56]. Bu hızlı şarj yeteneği, operasyonel maliyet tasarrufları sağlayabilir.

"Önce paralel sonra seri" bağlantı konfigürasyonu, süperkapasitör modüllerinde voltaj dengeleme devresi gereksinimlerini azaltarak maliyetleri düşürebilir [65].

Anahtarlamasız bir SK bankasının (8.7 kJ enerji) ortalama maliyeti 250 Kanada Doları'dır [44].

Bansal vd. çalışmalarında optimal boyutlandırma ile elde ettikleri süperkapasitör modül maliyetlerini Tablo 3.1'de sunmuşlardır [46]. Tablo 3.1'den görüldüğü gibi 350 F ve 650 F süperkapasitör modüller arasındaki maliyet farkı 43,980 ABD Dolarıdır. 100 F ve 1200 F hücreler en düşük EDS maliyetini sağlamıştır.

**Tablo 3.1.** Farklı SK Hücrelerinin Özellik Karşılaştırması[46].

| <b>Kapasite / Özellikler</b> | <b>100 F</b> | <b>350 F</b> | <b>650 F</b> | <b>1200 F</b> | <b>3000 F</b> |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| <b>SCM Kütlesi (kg)</b>      | 8469         | 6606.72      | 9158.24      | 8711.82       | 7405.2        |
| <b>SCM Maliyeti (\$)</b>     | 1 323 419    | 1 270 717    | 1 226 737    | 1 325 754     | 1 436 263     |

### 3.2. Süperkapasitörlerin Uygun Şekilde Seçilmesi

Elektrikli araçlar için enerji depolama sistemlerinin tasarımında süperkapasitör seçimi kritik bir aşamayı oluşturmaktadır. Bu seçim, farklı süperkapasitör tiplerinin elektriksel, termal, mekanik ve güvenlik özelliklerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Süperkapasitörlerin özellikleri, sistem performansını, güvenilirliğini ve ekonomik verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

#### 3.2.1. Süperkapasitör seçim kriterleri

Süperkapasitör seçimi yapılırken aşağıdaki temel kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir:

### **3.2.1.1. Elektriksel özellikler**

Süperkapasitörün kapasitesi, nominal gerilimi, ESR, sızıntı akımı, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu, seçimin en belirleyici unsurlarıdır. Kapasite (Farad cinsinden), depolayabileceği toplam yük miktarını tanımlar. Nominal gerilim, süperkapasitörün güvenli şekilde çalışabileceği maksimum gerilimi ifade eder ve genellikle organik elektrolitli hücrelerde 2,5–2,7 V, sulu elektrolitli hücrelerde 1,2–1,5 V aralığındadır. ESR değeri, yüksek akım çekişi sırasında kayıpları ve ısınmayı belirler; düşük ESR değeri, yüksek güç gereksinimli uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, sızıntı akımı düşük olan süperkapasitörler, enerjinin uzun süre korunmasına katkıda bulunur. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu parametreleri, sistem boyutu ve ağırlığı açısından kritik öneme sahiptir.

### **3.2.1.2. Termal özellikler**

Süperkapasitörlerin çalışma sıcaklığı aralığı, otomotiv uygulamalarında geniş bir sıcaklık skalasında kararlı performans sunmalıdır. Çalışma aralığı genellikle -40 °C ile +65 °C arasındadır. Termal direnç, ısının hücrelerden çevreye etkin biçimde aktarılmasını sağlar. Sıcaklık değişimlerine karşı performans stabilitesi de uzun ömür ve güvenilirlik açısından önem arz eder.

### **3.2.1.3. Mekanik özellikler**

Süperkapasitörün fiziksel boyutu ve geometrisi, araçta ayrılan montaj alanına uyumlu olmalıdır. Ağırlık faktörü, özellikle menzil ve enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Ayrıca, titreşim ve darbelere dayanım, otomotiv ortamının zorlu koşullarında uzun ömürlü çalışmayı güvence altına alır. Bağlantı elemanlarının sağlamlığı ve bakım kolaylığı da dikkate alınmalıdır.

### **3.2.1.4. Ömür ve güvenilirlik özellikleri**

Süperkapasitörlerin tercih edilme nedenlerinden biri, çok yüksek döngü ömrüne sahip olmalarıdır. Yüz binlerce ila milyonlarca şarj/deşarj döngüsüne dayanabilen ürünler mevcuttur. Düşük performans bozulma oranı ve kimyasal stabilite, uzun süreli kullanımda kararlılığı artırır.

### **3.2.1.5. Güvenlik özellikleri**

Elektrolit tipi, güvenlik düzeyi üzerinde belirleyici rol oynar. Sulu elektrolitler genellikle daha güvenli kabul edilmekle birlikte, enerji ve gerilim kapasitesi sınırlıdır. Organik elektrolitler ise daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamakla birlikte yanıcılık

riski taşır. Entegre güvenlik mekanizmaları (örneğin basınç tahliye valfleri, aşırı sıcaklık korumaları) ve uluslararası sertifikalar (UL, CE, ISO) ürün seçiminde öncelikli dikkate alınmalıdır [32,52].

### 3.2.2. Ticari süperkapasitör türlerinin karşılaştırılması

- Elektrolit Türüne Göre Sınıflandırma:

Organik Elektrolitli Süperkapasitörler: 2,5–2,7 V nominal gerilim, 5–10 Wh/kg enerji yoğunluğu. İç direnç yüksek, düşük sıcaklık performansı sınırlıdır. Yanıcılık riski taşır. Örnek üreticiler: Maxwell (Tesla), Skeleton Technologies.

Sulu Elektrolitli Süperkapasitörler: 1,2–1,5 V gerilim, 1–3 Wh/kg enerji yoğunluğu. Düşük iç direnç ve iyi düşük sıcaklık performansı. Güvenli yapıdadır. Örnek üreticiler: NEC-Tokin, CAP-XX.

Katı/Polimer Elektrolitli Süperkapasitörler: Sızıntı riski yoktur, uzun raf ömrüne sahiptir, maliyeti yüksektir. Örnek üreticiler: Yunasko, APowerCap.

- Elektrot Malzemesine Göre Sınıflandırma:

Aktif Karbon Elektrotlu: Yaygın, orta enerji-güç yoğunluğu.

Grafen Elektrotlu: Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, düşük iç direnç. Maliyeti yüksektir.

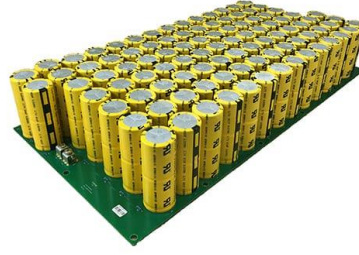
Hibrit (Lityum-iyon katkılı): 15–25 Wh/kg enerji yoğunluğu, daha yüksek hücre gerilimi, daha kısa döngü ömrü [17, 61].

### 3.3. Süperkapasitör Bağlantı Konfigürasyonları

Elektrikli araç sistemlerinde hedeflenen gerilim, kapasite ve akım değerlerine ulaşmak için süperkapasitör hücreleri seri, paralel veya seri-paralel (hibrit) biçimde bağlanır. Süperkapasitörlerin bağlantı konfigürasyonlarını açıklarken, modül yapısını göstermek faydalı olur. Aşağıdaki Şekil 3.3'te (a) ve (b) olmak üzere iki farklı modül görseli sunulmaktadır [59].



(a)



(b)

Şekil 3.3. İki farklı örnek modül görseli [59]

### 3.3.1. Seri Bağlantı

Seri bağlantı gerilimi artırmak amacıyla kullanılır. Şekil 3.4 Seri bağlı süperkapasitörler görseli sunulmaktadır [15].



Şekil 3.4. Seri Bağlı Süperkapasitörler Görseli [15]

Toplam Kapasite:

$$C_{Toplam} = \frac{C_{hücre}}{n} \quad (3.2)$$

$n$ : Seri hücre sayısı.

$C_{hücre}$ : Tek hücre kapasitesi.

Toplam Gerilim:

$$V_{Toplam} = n \times V_{hücre} \quad (3.3)$$

Toplam ESR:

$$ESR_{Toplam} = n \times ESR_{hücre} \quad (3.4)$$

Seri bağlantıda gerilim dengesizliği riski yüksektir. Bu nedenle dengeleme devreleri kritik öneme sahiptir.

### 3.3.2. Paralel bağlantı

Paralel bağlantı kapasiteyi ve akım dayanımını artırır.

Toplam Kapasite:

$$C_{Toplam} = n \times C_{hücre} \quad (3.5)$$

Toplam Gerilim:

Tüm hücrelerde aynıdır.

Toplam ESR:

$$ESR_{Toplam} = \frac{ESR}{n} \quad (3.6)$$

### 3.3.3. Seri-paralel (hibrit) bağlantı

Hedef gerilim ve kapasiteye ulaşmak için yaygın kullanılan konfigürasyondur. m paralel gruptan oluşan n seri hücre dizisi olmak üzere:

Toplam Kapasite:

$$C_{Toplam} = \frac{m \times C_{hücre}}{n} \quad (3.7)$$

Toplam Gerilim:

$$V_{Toplam} = n \times V \quad (3.8)$$

Toplam ESR:

$$ESR_{Toplam} = \frac{n \times ESR}{m} \quad (3.9)$$

## 3.4. Dengeleme (Balancing) Teknolojileri

Seri bağlı süperkapasitörlerde gerilim dengesizliği oluşur. Hücrelerin kapasite, ESR ve sızıntı akım farklılıkları nedeniyle yük dağılımı bozulur. Bu dengesizlik ömür ve güvenliği riske sokar [66].

### ❖ Dengeleme yöntemleri

Enerji depolama sistemlerinde (örneğin batarya paketleri veya süperkapasitör modülleri), hücreler seri şekilde bağlandığında zamanla her bir hücrenin gerilim

seviyesi farklılaşabilir [25, 67]. Bu durum, özellikle şarj ve deşarj döngülerinde hücrelerin aşırı yüklenmesine veya boşalmasına neden olarak sistemin performansını ve ömrünü olumsuz etkiler [67].

Bu nedenle, hücreler arasındaki gerilim farklarını dengelemek amacıyla çeşitli dengeleme yöntemleri geliştirilmiştir [1, 68]. Bu yöntemler, sistemin güvenli çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini artırır ve hücrelerin ömrünü uzatır [25, 68].

Dengeleme yöntemleri genel olarak üç ana kategoriye ayrılır: Pasif Dengeleme, Aktif Dengeleme ve Hibrit Dengeleme. Tablo 3.2'de bu yöntemlerin temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak verilmiştir [69].

**Tablo 3.2.** Hücre Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [69].

| <b>Yöntem</b>          | <b>Açıklama</b>                                                    | <b>Avantaj</b> | <b>Dezavantaj</b>         |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------|
| <b>Pasif Dengeleme</b> | Paralel direnç ile enerji harcayarak hücreleri eşitler             | Basit, ucuz    | Sürekli kayıp gücü (%1–2) |
| <b>Aktif Dengeleme</b> | Enerjiyi yüksek gerilimli hücreden düşük gerilimliye transfer eder | Verimli, hızlı | Karmaşık, pahalı          |
| <b>Hibrit</b>          | Her iki yöntemi kombine eder                                       | Dengeli çözüm  | Orta karmaşıklık          |

#### 4. SÜPERKAPASİTÖR MODÜLÜ TASARIMI

Süperkapasitör modülleri, belirli bir uygulama için gerekli olan gerilim ve kapasite seviyelerini sağlamak amacıyla tekil süperkapasitör hücrelerinin seri ve paralel kombinasyonları ile oluşturulur. Modülün toplam enerji depolama kapasitesi ( $E_{modül}$ ), toplam kapasitesi ( $C_{modül}$ ) ve çalışma gerilimi ( $V_{modül}$ ) ile denklem (4.1) kullanılarak hesaplanır:

$$E_{modül} = \frac{1}{2} C_{modül} \cdot V_{modül}^2 \quad (4.1)$$

Bu formülden hareketle toplam kapasite belirlenmiş ve ardından hedef değerlere ulaşmak için gereken hücre sayıları tespit edilmiştir. Toplam hücre sayısı denklem (4.2)'de ifade edilmektedir:

$$\text{Toplam hücre sayısı} = N_p \cdot N_s = \frac{C_{modül}}{C_{hücre}} \left( \frac{V_{modül}}{V_{hücre}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Modülün eşdeğer seri direnci ( $ESR_{modül}$ ) ve maksimum akım kapasitesi ( $I_{modül}$ ) gibi diğer önemli parametreler de birim hücre özelliklerine ve bağlantı şekline bağlı olarak denklem (4.3) ve (4.4)'deki gibi hesaplanır:

$$ESR_{Toplam} = \frac{N_s \times ESR_{hücre}}{N_p} \quad (4.3)$$

$$I_{Sk,modül} = N_p \cdot I_{Sk,hücre} \quad (4.4)$$

Bu metodoloji, farklı tasarım hedefleri ve kısıtlamaları altında süperkapasitör modüllerinin performansını değerlendirmek için bir çerçeve sunmaktadır.

##### 4.1. Sabit Enerji ve Değişen Çalışma Gerilimleri Altında Modül Konfigürasyonları

Sabit bir enerji ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan süperkapasitör modüllerinde, farklı çalışma gerilimlerinin (16 V, 24 V ve 32 V) modül yapılandırılmaları ve performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, 2304 J sabit enerji değeri ve 20 F kapasiteli süperkapasitör birim hücreleri temel alınmıştır. Her bir hücrenin nominal çalışma gerilimi 2.7 V, ESR değeri 20 mΩ ve maksimum akım taşıma kapasitesi 25 A olarak kabul edilmiştir [58].

Bu analiz kapsamında, çalışma gerilimine bağlı olarak modülün toplam kapasitansı ( $C_{\text{modül}}$ ) enerji denklemi (4.1) den hesaplanmıştır:

$$C_{\text{modül}} = \frac{2.E}{V_{\text{modül}}^2} \quad (4.5)$$

Hedeflenen gerilim seviyesine ulaşmak için gerekli olan seri bağlı hücre sayısı ( $N_s$ ), eşitlik (4.6) ile belirlenmiştir:

$$N_s = \frac{V_{\text{modül}}}{V_{\text{hücre}}} \quad (4.6)$$

Toplam hücre sayısı 36 olarak sabit tutulmuştur çünkü hedeflenen 16 V, 24 V ve 32 V gerilim seviyelerine en yakın değeri sağlayan uygun hücre sayısıdır, paralel bağlı hücre sayısı ( $N_p$ ) (4.7) eşitliği ile hesaplanmıştır:

$$N_p = \frac{36}{N_s} \quad (4.7)$$

Bu yapılandırmalara göre, her bir modül için toplam iç direnç değeri seri bağlı hücre sayısına bağlı olarak denklemi (4.3) ten hesaplanmıştır.

Ayrıca, her yapılandırmanın uygulanan gerilimi ve buna bağlı olarak enerji depolama kapasitesi denklemi (4.1) den hesaplanmıştır.

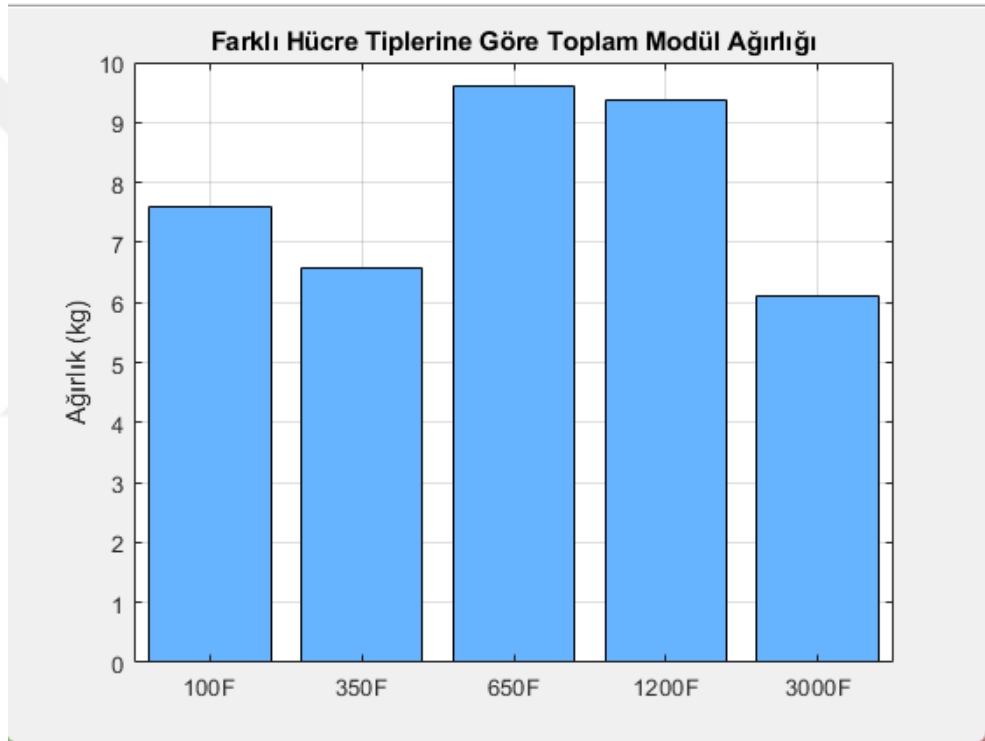
Çalışma gerilimi arttıkça modül kapasitesinin düştüğü, buna karşılık seri hücre sayısının arttığı ve toplam ESR değerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, paralel bağlı hücre sayısının azalmasıyla birlikte sistemin akım taşıma kapasitesi de azalmaktadır. Bu durum, farklı uygulama senaryoları için modül tasarımında denge kurulması gereken bir parametre olarak değerlendirilmiştir.

Her bir çalışma gerilimi için elde edilen modül yapılandırmaları, ESR değerleri, hesaplanan enerji miktarları ve akım kapasiteleri Tablo 4.1’de sunulmaktadır.

**Tablo 4.1.** Süperkapasitör Modül Konfigürasyonları ve Performans Değerleri

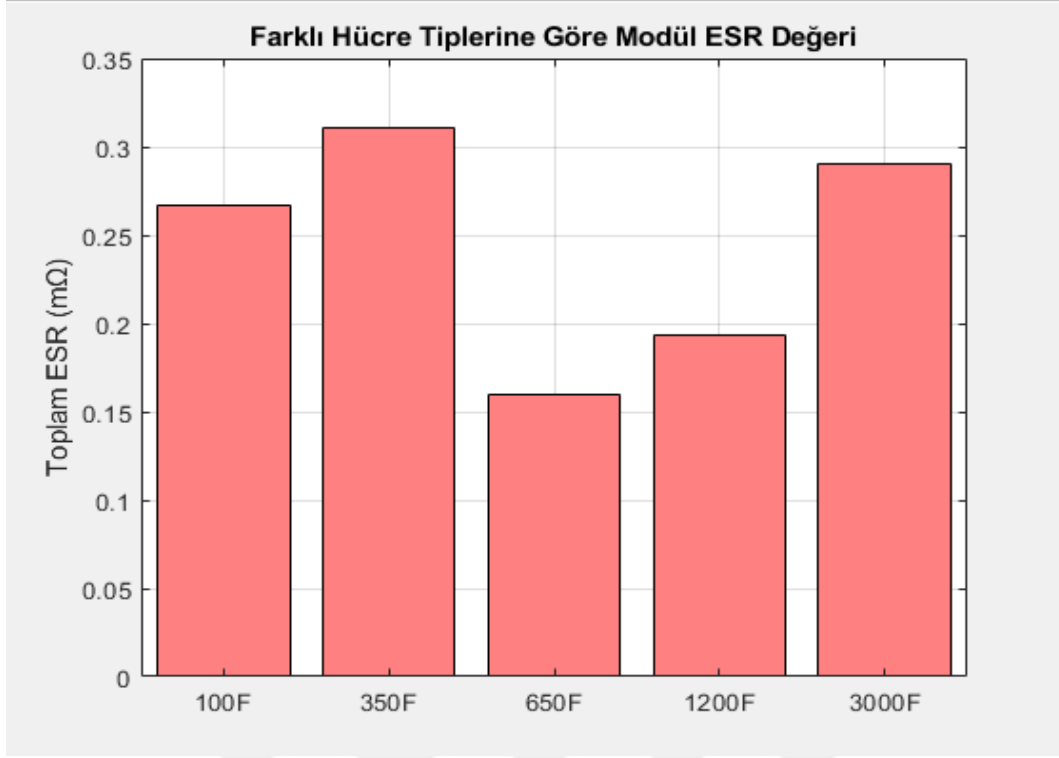
| Çalışma Gerilimi (V) | Modül Kapasitesi (F) | $N_s$ | $N_p$ | Toplam Hücre | Gerçek Gerilim (V) | Maksimum Akım (A) | ESR ( $\Omega$ ) | Hesaplanan enerji (J) |
|----------------------|----------------------|-------|-------|--------------|--------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| 16                   | 18                   | 6     | 6     | 36           | 16.2               | 150               | 0.12             | 2361.96               |
| 24                   | 8                    | 9     | 4     | 36           | 24.3               | 100               | 0.18             | 2361.72               |
| 32                   | 4.5                  | 12    | 3     | 36           | 32.4               | 75                | 0.24             | 2363.88               |

Farklı süperkapasitör hücre tipleri kullanıldığında elde edilen modülün toplam ağırlığını Şekil 4.1’de göstermektedir. Aynı hedef kapasite (3000 F) ve aynı modül gerilimi (32 V) sağlanacak şekilde yapılan hesaplamalar sonucunda, daha düşük kapasiteli hücrelerin daha fazla sayıda kullanılmasını gerektirdiği ve dolayısıyla toplam modül ağırlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca, hedef voltaja ulaşmak için hücrelerin seri bağlanması gerekmektedir ve seri bağlantı, modülün toplam kapasitesini azaltmaktadır. Özellikle, hücre ağırlısı nedeniyle 650 F kapasiteli hücrelerin toplam modül ağırlığı en yüksek seviyede olmaktadır. 100 F kapasiteli hücrelerde ise hücre sayısı çok fazla olmasına rağmen hücrelerin hafif olması nedeniyle toplam ağırlık, 650 F hücrelere göre daha düşüktür.



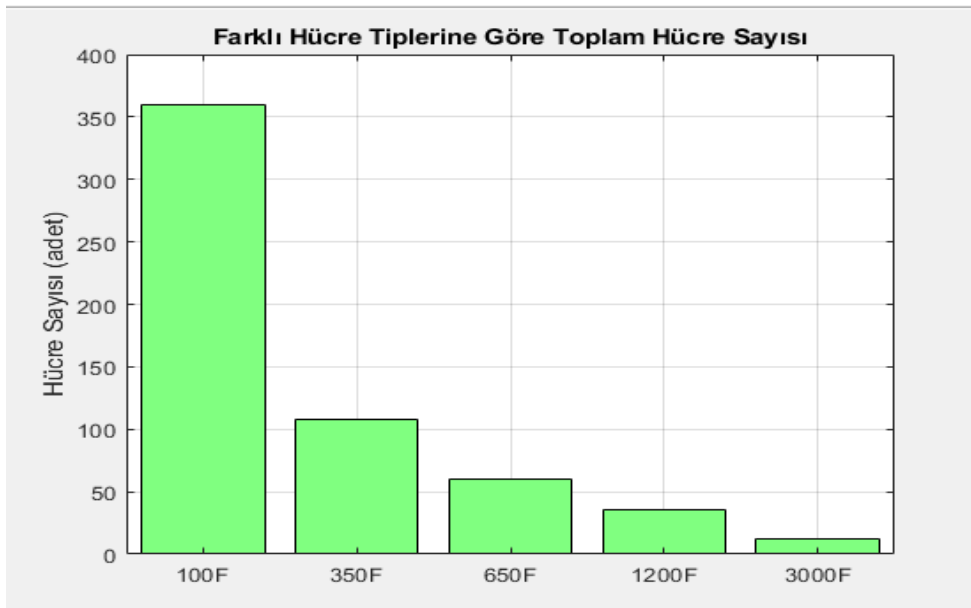
**Şekil 4.1.** Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Ağırlığı

Farklı hücre kapasitelerine göre modülün toplam ESR değeri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Paralel bağlanan hücre sayısı arttıkça toplam ESR azalır. Ancak hücre başına ESR değeri düşük olan modeller (örneğin 3000F ve 1200F), daha az paralel bağlantı gerektirdiğinden toplam modül ESR değerinde bazı durumlarda artış gözlemlenebilir. Bu nedenle, optimum ESR değeri hem hücre başına ESR’ye hem de kullanılan paralel hücre sayısına bağlıdır.



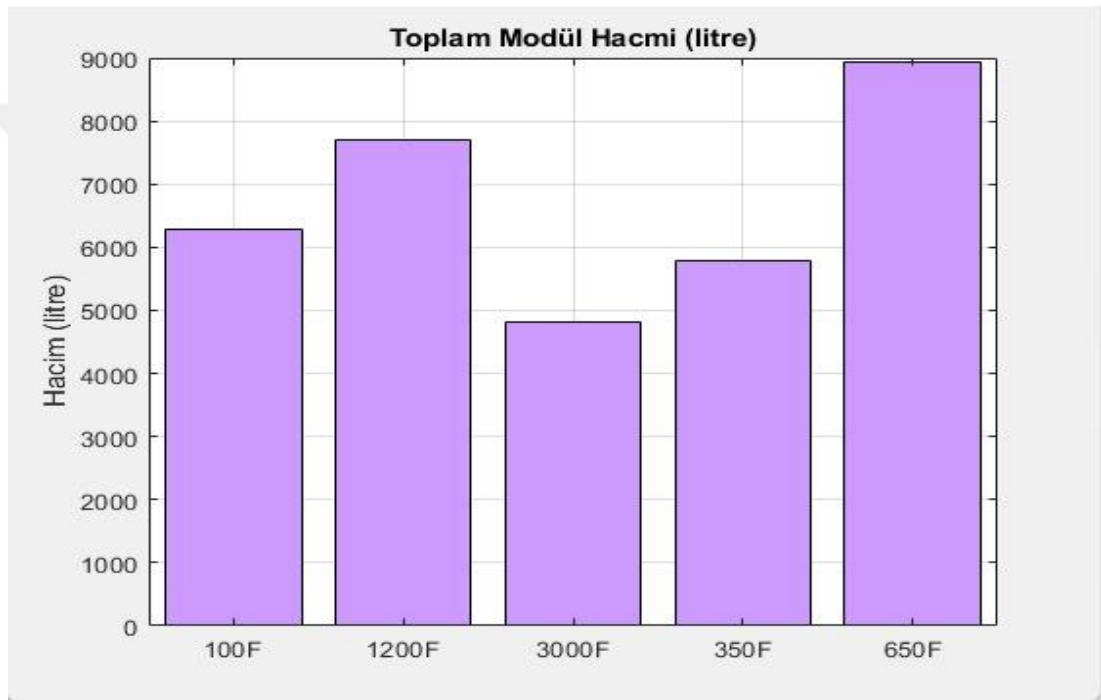
**Şekil 4.2.** Farklı Hücre Tiplerine Göre Modül ESR Değeri

Hedeflenen kapasiteyi elde etmek için gerekli toplam hücre sayısını şekil.4.3’de göstermektedir. Düşük kapasiteli hücreler (örneğin 100F, 350F) hedef kapasiteye ulaşmak için daha fazla sayıda paralel bağlantı gerektirirken, yüksek kapasiteli hücreler (örneğin 1200F, 3000F) daha az sayıda hücre ile aynı kapasiteyi sağlayabilmektedir. Bu durum, hem maliyet hem de montaj açısından önemli bir optimizasyon parametresidir.



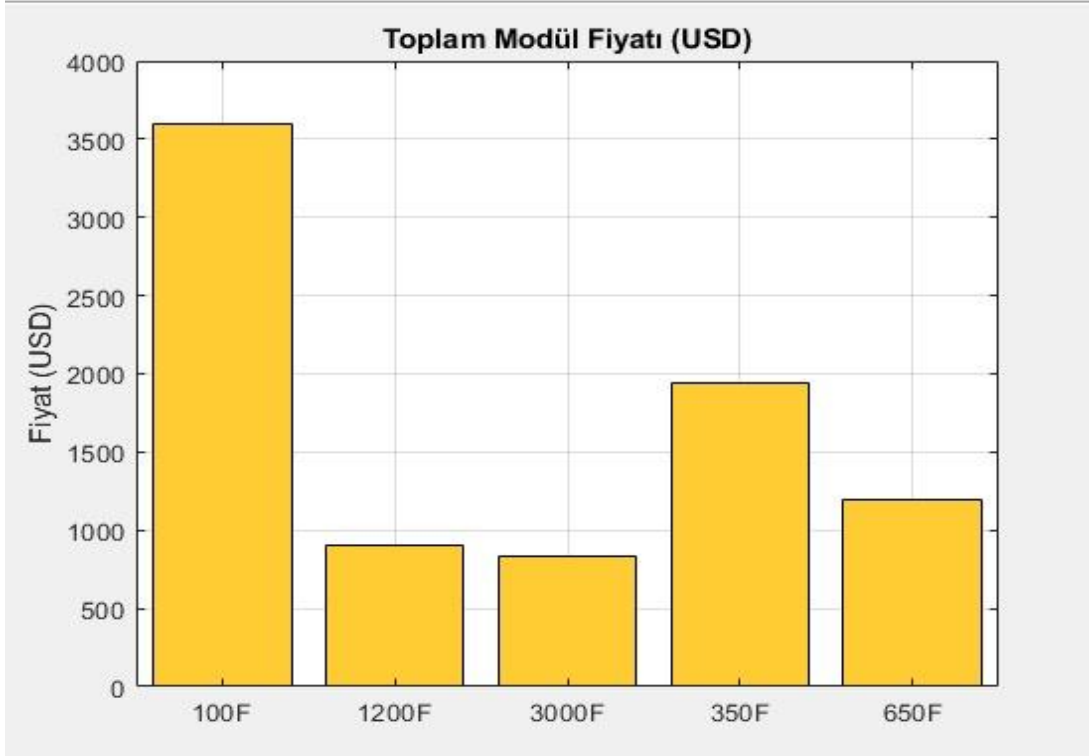
**Şekil 4.3.** Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Hücre Sayısı

Farklı süperkapasitör hücre tipleri kullanıldığında elde edilen modülün toplam hacmi Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Aynı hedef kapasite (3000 F) ve aynı modül gerilimi (32 V) sağlanacak şekilde yapılan hesaplamalar sonucunda, düşük kapasiteli hücrelerin daha fazla sayıda kullanılması gerektiği ve buna bağlı olarak modül hacminin arttığı görülmektedir. Özellikle 650 F kapasiteli hücrelerden oluşturulan modül en yüksek hacme sahipken, 3000 F kapasiteli hücrelerden oluşturulan modül en düşük hacme sahiptir. 100 F ve 1200 F hücreleri için hesaplanan değerler ise orta seviyelerde yer almakta ve kullanılan hücre tipine bağlı olarak modül hacminin önemli ölçüde değiştiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.4.** Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Hacmi

Farklı süperkapasitör hücre tipleri kullanıldığında elde edilen modülün toplam maliyeti Şekil 4.5’de gösterilmektedir. Hesaplamalar sonucunda, düşük kapasiteli hücrelerin fazla sayıda kullanılması gerektiğinden, bu hücrelerden oluşturulan modüllerin toplam maliyetlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 100 F kapasiteli hücrelerden oluşan modül en yüksek maliyete sahip olurken, 1200 F ve 3000 F kapasiteli hücrelerden oluşan modüller en düşük maliyet seviyelerinde yer almaktadır. 350 F ve 650 F hücrelerinden oluşturulan modüllerin maliyetleri ise orta seviyede gerçekleşmiştir. Bu sonuç, hücre seçiminin yalnızca modülün boyutlarını değil, aynı zamanda ekonomik uygunluğunu da doğrudan etkilediğini göstermektedir.



**Şekil 4.5.** Farklı Hücre Tiplerine Göre Toplam Modül Fiyatı

#### **4.2. Farklı Birim Hücre Kapasitelerinin Modül Tasarımına Etkisi**

Belirli bir toplam modül kapasitesi (3000 F) ve çalışma gerilimi (32 V ve 24 V) hedeflendiğinde, farklı birim süperkapasitör hücre kapasitelerinin modül konfigürasyonları, ağırlığı ve ESR üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizler, Maxwell Technologies firmasına ait çeşitli kapasitelerdeki süperkapasitör hücrelerinin teknik verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir[70].

##### **4.2.1. Hesaplama varsayımları ve yöntem**

- Hedeflenen toplam modül kapasitesi: 3000 F
- Çalışma gerilimleri: 32 V ve 24 V
- Birim hücre nominal gerilimi: 2.7 V (tüm Maxwell hücreleri için) [70].

Kullanılan Maxwell birim hücrelerinin temel teknik özellikleri Tablo 4.2’de özetlenmiştir:

**Tablo 4.2.** Kullanılan Maxwell Süperkapasitör Hücrelerinin Teknik Özellikleri [70]

| Ürün Kodu         | Kapasite (F) | ESR (mΩ) | Kütle (g) | Depolanan Enerji (J) |
|-------------------|--------------|----------|-----------|----------------------|
| BCAP0100 P270 S07 | 100          | 8.0      | 21.1      | 360                  |
| BCAP0350 P270 S18 | 350          | 2.8      | 61        | 2376                 |
| BCAP0650 K2       | 650          | 0.8      | 160       | 2376                 |
| BCAP1200 K2       | 1200         | 0.58     | 260       | 4392                 |
| BCAP3000 K2       | 3000         | 0.29     | 510       | 10,944               |

Modülün toplam kapasitesi ve çalışma gerilimi hedefleri doğrultusunda, her bir birim hücre kapasitesi için gerekli ve değerleri hesaplanmıştır. Ardından, toplam hücre sayısı, toplam modül ağırlığı ve toplam modül ESR değerleri belirlenmiştir.

#### 4.2.2. 32 V Çalışma gerilimi durumu

32 V çalışma gerilimi için her bir modülde seri bağlanması gereken hücre sayısı 12 olarak belirlenmiştir. Tablo 4.3'te, farklı birim hücre kapasitelerine göre oluşturulan modül yapılarına ilişkin karşılaştırmalı veriler sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, hücre kapasitesi arttıkça toplam hücre sayısı ve modül ağırlığı azalmaktadır. Ancak, ESR değerleri hücre tipine göre farklılık göstermektedir.

**Tablo 4.3.** 3000 F Kapasitesi ve 32 V Çalışma Gerilimi İçin Karşılaştırmalı Tablo

| Birim Hücre Kapasitesi (F) | Seri Hücre Sayısı (N <sub>s</sub> ) | Paralel Hücre Sayısı (N <sub>p</sub> ) | Toplam Hücre Sayısı | Toplam Modül Ağırlığı (kg) | Toplam Modül ESR (mΩ) |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|
| 100                        | 12                                  | 360                                    | 4320                | 91.152                     | 0.267                 |
| 350                        | 12                                  | 103                                    | 1236                | 75.396                     | 0.320                 |
| 650                        | 12                                  | 55                                     | 660                 | 105.600                    | 0.175                 |
| 1200                       | 12                                  | 30                                     | 360                 | 93.600                     | 0.240                 |
| 3000                       | 12                                  | 12                                     | 144                 | 73.440                     | 0.290                 |

#### 4.2.3. 24 V Çalışma gerilimi durumu

24 V gerilim seviyesi için her bir modülde seri bağlanması gereken hücre sayısı 9 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.4'te, bu çalışma gerilimi altında oluşturulan modül yapılarına ait karşılaştırmalı değerler sunulmaktadır. Bu konfigürasyonlar, uygulama gereksinimlerine göre uygun hücre tipinin seçilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle

ağırlık, yerleşim alanı ve termal yönetim gibi tasarım kriterleri, hücre seçimini doğrudan etkilemektedir.

**Tablo 4.4.** 3000 F Kapasitesi ve 24 V Çalışma Gerilimi İçin Karşılaştırmalı Tablo

| Birim Hücre Kapasitesi (F) | Seri Hücre Sayısı ( $N_s$ ) | Paralel Hücre Sayısı ( $N_p$ ) | Toplam Hücre Sayısı | Toplam Modül Ağırlığı (kg) | Toplam Modül ESR ( $m\Omega$ ) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 100                        | 9                           | 270                            | 2430                | 51.273                     | 0.333                          |
| 350                        | 9                           | 78                             | 702                 | 42.822                     | 0.346                          |
| 650                        | 9                           | 42                             | 378                 | 64.080                     | 0.229                          |
| 1200                       | 9                           | 22                             | 198                 | 53.820                     | 0.391                          |
| 3000                       | 9                           | 8                              | 72                  | 41.310                     | 0.322                          |

#### 4.3. Elektrikli Araçlar İçin Gerekli Temel Süperkapasitör Sistem Değerleri

Elektrikli bir binek araçta süperkapasitör destekli bir sistem için hedeflenen tipik parametreler, Tablo 4.5’de sunulmuştur [71, 72].

**Tablo 4.5.** Süperkapasitör destekli bir sistem için hedeflenen tipik parametreler

| Parametre              | Değer Aralığı                | Açıklama                                                                           |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Gerilim (V)            | 48 V – 150 V                 | Hafif araçlar için 48 V, daha güçlü sistemler için 100 V üzeri tercih edilir [71]. |
| Kapasite (F)           | 100 – 2000 F (modül bazında) | Süperkapasitörlerin paralel bağlantısına göre ayarlanır [72].                      |
| Enerji Kapasitesi (Wh) | 100 – 500 Wh                 | Süperkapasitörler bataryaya göre düşük enerji sunar ama yüksek güç sağlar [25].    |
| Güç Kapasitesi (kW)    | 20 – 100 kW                  | Ani hızlanma ve frenleme gereksinimleri için [71, 72].                             |
| Anlık Akım (A)         | 200 – 1000 A                 | Yüksek akım desteği kısa süreli pik güç çıkışları içindir [68, 72].                |

#### ❖ Örnek Uygulama:

100 V gerilimli bir sistem hedeflendiğinde ve her hücre 2.7 V ise, yaklaşık 38 hücre seri bağlanmalıdır [70]. Hedeflenen toplam kapasiteye ulaşmak için paralel bağlanacak hücre sayısı hücre tipine göre değişir. Örneğin:

- 3000 F’lik hücre ile sadece 1 paralel dizi yeterlidir [70].

650 F’lik hücre kullanılırsa, aynı kapasiteyi sağlamak için 4 paralel dizi gereklidir [70, 72].

## **5. TARTIŞMA VE SONUÇ**

### **5.1. Çalışma Geriliminin Modül Tasarımına Etkisi**

Tablo 4.1’de sunulan sonuçlar incelendiğinde, sabit enerji hedefi altında çalışma geriliminin artırılmasının süperkapasitör modül tasarımı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Çalışma gerilimi yükseldikçe, aynı enerjiyi depolayabilmek için gerekli toplam kapasitans değeri azalmaktadır. Bu da paralel bağlı hücre sayısının düşmesine neden olmakta ve dolayısıyla modül kapasitesinde azalma meydana gelmektedir. Buna karşılık, hedeflenen gerilime ulaşabilmek için daha fazla hücrenin seri bağlanması gerekmekte, bu da modülün toplam hücre sayısını sabit tutarken seri bağlantı oranını artırmaktadır.

### **5.2. ESR Değerindeki Değişim ve Termal Etkiler**

Seri bağlı hücre sayısındaki bu artış, modülün ESR üzerinde belirgin bir yükselmeye yol açmaktadır. ESR değerindeki bu artış, özellikle yüksek akım gerektiren uygulamalarda güç kayıplarını artırabileceği gibi, sistemin termal yönetimini de zorlaştırmaktadır. Örneğin, 32 V çalışma gerilimine sahip modülde 12 hücre seri bağlanmış ve ESR değeri 0.24  $\Omega$ ’ye ulaşmıştır. Buna karşın, 16 V’luk modülde sadece 6 hücre seri bağlı olup ESR değeri 0.12  $\Omega$  olarak kalmıştır. Bu fark, yüksek gerilimli sistemlerde oluşan ek direnç kayıplarını ortaya koymaktadır.

### **5.3. Akım Taşıma Kapasitesi ve Paralel Yapılandırma**

Paralel bağlı hücre sayısındaki azalma ise modülün akım taşıma kapasitesini sınırlandırmaktadır. Daha fazla paralel hücre ile daha yüksek akım değerlerine ulaşmak mümkünken, paralel yapı sayısının azalması akım kapasitesini kısıtlayıcı bir etki yaratmaktadır. 16 V’luk sistemde modül 150 A’ye kadar akım taşıyabilirken, 32 V’luk sistemde bu değer 75 A’ye kadar düşmektedir. Bu durum, sistemin kullanılacağı uygulamaya göre gerilim ve yapılandırma seçimlerinin dikkatle değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

#### **5.4. Enerji Hesaplamaları ve Güvenlik Payı**

Hesaplanan enerji değerleri incelendiğinde, tüm yapılandırmalarda hedeflenen 2304 J enerji miktarına oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Gerilim değerleri, hücre başına düşen gerilimin (örneğin 2.7 V) tam katı olamamasından dolayı hafif sapmalar göstermiştir. Bu durum enerji değerlerinin yaklaşık 2360 J civarında çıkmasına yol açmış; ancak bu fazlalık, sistem tasarımında güvenlik payı olarak değerlendirilebilecek bir avantaj olarak öne çıkmıştır.

#### **5.5. Hücre Seçimi ve Uygulama Uygunluğu**

Yapılan karşılaştırmalar neticesinde, bölüm 4’de verilen örnek uygulama için 3000 F kapasiteli BCAP3000 K2 hücresinin en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Bu tercihin öne çıkmasındaki başlıca nedenler; daha az hücreyle aynı gerilimin elde edilebilmesi, sistemin toplam ağırlığının düşük olması (örneğin 32 V sistemde yalnızca 73.44 kg), yüksek güç yoğunluğu sağlayan düşük ESR değeri (0.29 mΩ) ve devre karmaşıklığını azaltan basit montaj yapısıdır. Bu avantajlar, özellikle rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı ve yüksek güç gerektiren anlık senaryolarda süperkapasitörün destekleyici bir rol üstlenmesini mümkün kılmaktadır.

#### **5.6. Uygulama Odaklı Tasarım Stratejileri**

Süperkapasitörlerin elektrikli araç sistemlerinde ana veya yardımcı enerji depolama birimi olarak kullanılmaları, sistem performansı ve verimliliği üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır. Düşük gerilimli sistemler düşük ESR ve yüksek akım kapasitesi sağlarken, yüksek gerilimli sistemler daha kompakt modül yapılarına olanak tanımaktadır. Ancak bu yapıların iç direnç ve termal yük gibi parametreler açısından dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir. Tasarımcı, uygulamanın gereksinimlerine göre bu parametreler arasında uygun bir denge kurmalıdır.

#### **5.7. Gelecek Çalışmalar**

Bu çalışma, elektrikli araçlarda enerji depolama amacıyla kullanılabilecek süperkapasitör (SK) modüllerinin boyutlandırılmasına yönelik analitik bir yaklaşım sunmaktadır. Belirli bir enerji ihtiyacı ve çalışma gerilimi aralığı verildiğinde, modülün yaklaşık olarak kaç hücreden oluşacağı hesaplanabilmektedir. Bu hesaplama, sistem tasarımının erken aşamalarında, özellikle de maliyet tahmini açısından önemli

bir avantaj sağlamaktadır. Bir süperkapasitör modülün ana maliyet bileşeni olan hücre sayısının belirlenmesi sayesinde sistemin enerji depolama birimi için ihtiyaç duyduğu modülün maliyeti hakkında kabaca bir fikir sağlanmaktadır. Elektrikli araç enerji depolama birimi için tezin üçüncü bölümünde ayrıntılı olarak yer verilen modül tasarımına ilişkin diğer parametrelerin (akım, direnç, ağırlık, hacim, sıcaklık vb.) de göz önünde bulundurulması gerektiği açıktır. Ancak bu çalışmanın amacı, depolama biriminin ana maliyet unsuru olan hücre sayısı bilgisi ile başlangıç maliyeti için bir fikir vermektir.

Ayrıca çalışma, belirli bir enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla gerilim değerinin değişmesi durumunda, mevcut hücrelerin farklı konfigürasyonlarla yeniden düzenlenebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, modüler bir SK modül tasarımının mümkün olabileceğine işaret etmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı gerilim seviyelerinde aynı enerji miktarını sağlayabilecek esnek ve yeniden yapılandırılabilir modüler yapılar üzerine odaklanılması planlanmaktadır. Böylece, farklı uygulama gereksinimlerine uyarlanabilen, ölçeklenebilir ve maliyet etkin çözümler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, farklı süperkapasitör hücre teknolojilerinin (örneğin, farklı elektrot malzemeleri, kapasitans değerleri) analitik boyutlandırma yaklaşımı ve genel sistem performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, analitik yaklaşımla boyutlandırılmış süperkapasitör bankaları için gelişmiş enerji yönetim sistemleri algoritmalarının —özellikle Model Predictive Control (MPC) ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin— geliştirilmesi ve simülasyon ortamında test edilmesi de önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş ve rüzgâr gibi) elektrikli araç sistemlerine entegrasyonu kapsamında süperkapasitör bankalarının ara enerji depolama birimi olarak kullanıldığı senaryoların incelenmesi hedeflenmektedir. Bu entegrasyonun sistem verimliliği ve kararlılığı üzerindeki etkisinin analizi, sürdürülebilir ulaşım teknolojileri açısından büyük önem taşımaktadır. Bu örnekler, ister ana enerji depolama sistemi olarak, ister belirli uygulamalarda yardımcı sistem olarak kullanılsın, süperkapasitörlerin elektrikli araçların performansını ve verimliliğini iyileştirmedeki pratik potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] Ehsani, M., Gao, Y., & Longo, S. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press.
- [2] Sangüesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F.J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>.
- [3] Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292–308.
- [4] Camara, M. B., & Dakyo, B. (2015). Energy management for hybrid electric vehicles using load power fluctuation compensation – ultracapacitors and lithium-battery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 4031–4038. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048834>.
- [5] González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189–1206.
- [6] Sharma, S., & Bhatti, T. S. (2010). A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2901–2912.
- [7] European Commission. (2021). Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM (2021) 550 final.
- [8] Cavalcante, F., Ferreira, J., & Dias, V. (2024). Sustainability in Electric Vehicles with Supercapacitor Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113215.
- [9] U.S. Department of Energy. (2022). Benefits and considerations of electricity as a vehicle fuel. Alternative Fuels Data Center (AFDC). Retrieved from <https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-benefits>. Son Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2025.
- [10] Massachusetts Institute of Technology (MIT). (2023). Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars? MIT Climate Portal. Retrieved from <https://climate.mit.edu/ask-mit/are-electric-vehicles-definitely-better-climate-gas-powered-cars>. Son Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2025.
- [11] Authors' Names. (2024). Sustainable power management in light electric vehicles with hybrid energy storage and machine learning control. *Scientific Reports*, 14(1), Article 55988. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55988-5>.
- [12] Özada, S., Toros, H., & Yılmaz, M. (2023). Comparative assessment of supercapacitor bank switching techniques. *Journal of Energy Storage*, 55, 105786.

- [13] Madessa, H. B., Shakerin, M., Reinskau, E. H., & Rabani, M. (2024). Recent progress in the application of energy technologies in Large-Scale building Blocks: A State-of-the-Art review. *Energy Conversion and Management*, 305, Article 118210. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118210>.
- [14] Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2), 72–79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102).
- [15] Stevic, Z., & Radovanovic, I. (2022). Supercapacitors: The Innovation of Energy Storage. In *Updates on Supercapacitors*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106705>
- [16] Zubietta, J. L., & Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 199–205. <https://doi.org/10.1109/28.821816>.
- [17] Zhang, E., Qi, Z., & Wei, T. (2010). Research on combination of series and parallel with supercapacitor module. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545936>.
- [18] Prasad, G. G., Shetty, N., Thakur, S., & Bommegowda, K. B. (2019). Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561(1), 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>.
- [19] Naseri, F., Farjah, E., Allahbakhshi, M., & Kazemi, Z. (2017). Online condition monitoring and fault detection of large supercapacitor banks in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(4), 318–326. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2017.0013>.
- [20] Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., Kumar, S., Mehmood, A., & Kwon, E. E. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology. *Nano Energy*, 52, 441–473. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.012>.
- [21] Kocaman, B. (2021). Enerji Depolama Teknolojileri. İksad Yayınevi. Retrieved from <https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/12/ENERJİ-DEPOLAMA-TEKNOLOJİLERİ.pdf>.
- [22] Tasdemirci, C., & Özkan, A. (2021). Ultra kapasitör kullanan elektrikli araç ve şarj istasyonu tasarımı ve efektif durumunun araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2). <https://doi.org/10.29130/dubited.840542>.
- [23] Knowles Precision Devices. (2024). *Supercapacitors vs. Batteries: A Comparison in Energy Storage Solutions*. Knowles Precision Devices Blog. Retrieved from [https://blog.knowlescapacitors.com/blog/supercapacitors-vs.-batteries-a-comparison-in-energy-storage-solutions?utm\\_source=chatgpt.com](https://blog.knowlescapacitors.com/blog/supercapacitors-vs.-batteries-a-comparison-in-energy-storage-solutions?utm_source=chatgpt.com) Son Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2025.
- [24] Pay, S. Y., & Baghzouz, Y. (2003). Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles. In *Proceedings of the 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference (Vol. 3)*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304472>.

- [25] Burke, A. (2007). Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 806–820. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892490>.
- [26] Shubha, B. S., Praveen, B. M., & Bhat, V. (2023). Graphene – Calculation of specific surface area. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*, 7(1), 91–97. <https://doi.org/10.47992/IJAEML.2581.7000.0168>.
- [27] Lemian, D., & Bode, F. (2022). Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*, 15(15), 5683. <https://doi.org/10.3390/en15155683>.
- [28] *Frontiers in Chemistry*, (2025). Pseudocapacitive materials for energy storage: properties and mechanisms. *Frontiers in Chemistry*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2025.1636683/full> Son Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2025
- [29] Şahin, M. E., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2021). Modelling of Supercapacitors Based on Simplified Equivalent Circuit. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 6(1), 18–27. <https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2021.00003>.
- [30] Groenendaal, L., Zotti, G., Aubert, P. H., Waybright, S. M., & Reynolds, J. R. (2003). Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: Past, present, and future. *Advanced Materials*, 15(11), 855–879. <https://doi.org/10.1002/adma.200300381>.
- [31] Burke, A. (2000). Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91(1), 37–50. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00373-](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00373-).
- [32] Conway, B.E. (1999) *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>.
- [33] Raza, N., Aziz, K., Javed, M. S., Tariq, R., Kanwal, N., Raza, W., Sarfraz, M., Khan, S., Ismail, M. A., Akkinapally, B., & Wang, X. (2025). Advancements in separator design for supercapacitor technology: A review of characteristics, manufacturing processes, limitations, and emerging trends. *Energy Storage*, 115328. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115328>.
- [34] UCLA Newsroom. (2025). Plastic supercapacitors could solve energy storage problems. <https://newsroom.ucla.edu/releases/plastic-supercapacitors-could-solve-energy-storage-problems>. Son Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2025
- [35] Semerci, F. (2024). Kobalt içermeyen, nikel ve mangan bazlı süperkapasitör elektrotlarının geliştirilmesine yönelik proje çalışmaları. *Anadolu Ajansı*. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/kirkclarelinde-lityum-iyon-bataryalara-alternatif-superkapasitor-batarya-gelistiriliyor/3389053>.
- [36] Worku, A., et al. (2022). Review of low-temperature lithium-ion battery progress: New battery system design imperative. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.8194>.

- [37] Partridge, J., & Abouelamaimen, D. I. (2019). The Role of Supercapacitors in Regenerative Braking Systems. *Energies*, 12(14), Article 2683. <https://doi.org/10.3390/en12142683>.
- [38] Wang, E., Ouyang, M., Zhang, F., & Zhao, C. (2018). Performance evaluation and control strategy comparison of supercapacitors for a hybrid electric vehicle. In *New Trends in Electrical Vehicle Powertrains*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80948>.
- [39] Haerri, V. V., & Martinovic, D. (2007). Supercapacitor module SAM for hybrid busses: An advanced energy storage specification based on experiences with the TOHYCO-Rider bus project. In *2007 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460395>.
- [40] Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Wang, J., Shu, H., Li, S., He, T., Lan, C., & Yu, T. (2020). Applications of battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles using perturbation observer based robust control. *Journal of Energy Storage*, 30, 101531. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101531>.
- [41] Cao, J., & Emadi, A. (2010). A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1), 122–132. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2151206>.
- [42] Kuperman, A. and Aharon, I. (2011) Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 981–992. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
- [43] De Villers, N., Jemei, S., Péra, M.-C., Bienaimé, D., & Gustin, F. (2014). Review of characterization methods for supercapacitor modelling. *Journal of Power Sources*, 246, 596–608. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.07.116> (Son Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2025).
- [44] Ronanki, D., Dasari, Y., & Williamson, S. S. (2020). Comparative assessment of supercapacitor bank switching techniques under constant resistor, constant current, and constant power loads. *IET Electric Power Applications*, 14(14), 2832–2842. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2020.0524>.
- [45] Pay, S. Y., & Baghzouz, Y. (2003). Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles. In *Proceedings of the 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference* (Vol. 3, pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304472>.
- [46] Bansal, S., Nambisan, P., Sahab, P., & Khanra, M. (2022). Effect of supercapacitor modelling and unit cell capacitance selection towards economic sizing of energy storage system in electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 51, 104517. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104517>.
- [47] Würth Elektronik. Supercapacitor: A Guide for the Design-In Process. Application Note ANP077, 2019. Erişim adresi: <https://community.element14.com/products/manufacturers/wuerth-elektronik/b/blog/posts/anp077-supercapacitor-a-guide-for-the-design-in-process> (Son Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2025).

- [48] Melzack, N., Wills, R. G. A., & Cruden, A. (2024). An environmental perspective on developing dual energy storage for electric vehicles—a case study exploring Al-ion vs. supercapacitors alongside Li-ion. *Frontiers in Energy Research*, 11, Article 1266670. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1266670>.
- [49] Hamilton, T. (2009, October 19). Next Stop: Ultracapacitor Buses – A U.S.-Chinese venture is out to prove the benefits of quick-charge buses. *MIT Technology Review*. <https://www.technologyreview.com/2009/10/19/209306/next-stop-ultracapacitor-buses/>. Son Erişim Tarihi: 15 Eylül 2025.
- [50] Hnatov, A., Arhun, S., Ulyanets, O., & Ponikarovska, S. (2018). Ultracapacitors electrobus for urban transport. In *Proceedings of the 38th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2018)* (pp. 539–543). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477449>.
- [51] Naseri, F., Karimi, S., Farjah, E., & Schaltz, E. (2022). Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 155, 111913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111913>.
- [52] Wong, Y. C. E., Wei, R., Tsang, C. W., & Ho, D. (2023). Supercapacitor energy storage for electric bus in the urban public transport system for the GBA: A Case Study of Greensource Technology Company. In *Proceedings of the International Conference on Building and Sustaining the Momentum of Cross-border E-commerce for the GBA*.
- [53] Devillers, N., Jemei, S., Marion-Péra, M.-C., Gustin, F., & Trigui, R. (2014). Review of characterization methods for supercapacitor modelling. *Journal of Power Sources*, 246, 596-608. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.07.116>.
- [54] Burke, A., Miller, M. R., & Zhao, H. (2014). Ultracapacitors in the Place of Batteries in Hybrid Vehicles. Presented at the European Electric Vehicle Congress 2014, Brussels, Belgium. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/08c8b94>.
- [55] Rade, M., More, P., & Kanse, A. (2024). Elektrikli Araçlar için Batarya/Süperkapasitör Enerji Yönetim Sistemi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1285(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1285/1/012032>.
- [56] Taşdemirci, Ç., & Özkan, A. (2021). Elektrikli Araçlarda Ultra Kapasitör Kullanımı ve Uygulanabilirlik Durumunun Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 712-722. doi:10.29130/dubited.840542
- [57] Bommegowda, K. B., & Prasad, D. (2019). Design & Implementation of Power Bank using Supercapacitor. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(1), 1224-1228. doi:10.35940/ijeat.A9592.109119
- [58] Frivaldský, M., Biel, Z., Pčola, M., Kácsor, G., Franko, M., & Surový, J. (2023). Supercapacitor module sizing concerning operational constraints of the

- power converter. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 25(4), C62–C69. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.063>
- [59] Eaton Corporation. (2023). Supercapacitor Modules Resource Center . Eaton. <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/capacitors/supercapacitor-modules.html>. Son Erişim Tarihi: 15 Eylül 2025.
- [60] Abele, A., & Büchel, M. (2014). Electrical Double Layer Capacitors (EDLCs) in High Power Applications. In *Proceedings of the 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*. IEEE.
- [61] Nkembi, A. A., Simonazzi, M., Santoro, D., Cova, P., & Delmonte, N. (2024). Comprehensive review of energy storage systems characteristics and models for automotive applications. *Batteries*, 10(3), 88. <https://doi.org/10.3390/batteries10030088>.
- [62] Saenger, P., Devillers, N., Deschinkel, K., Péra, M. C., Couturier, R., & Gustin, F. (2017). Optimization of electrical energy storage system sizing for an accurate energy management in an aircraft. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 5572-5583.
- [63] Martins, E., Veridiano, V., Rocha, Â., & Araujo, L. (2020). Analysis of Supercapacitor Banks Applied for Smart Cities. In *International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management-ABEPRO-ADINGOR-IISE-AIM-ASEM (IJCIEOM 2020)*.
- [64] Berrueta, A., Ursúa, A., San Martín, I., Eftekhari, A., & Sanchis, P. (2019). Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends. *IEEE Access*, 7, 50869-50889.
- [65] Enhui, Z., Zhiping, Q., & Tongzhen, W. (2010, November). Research on combination of series and parallel with Supercapacitor Module. In *2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems* (pp. 685-689). IEEE.
- [66] Yazid, M. A. M., Jazlan, A., Rodzi, M. Z. M., Husman, M. A., Afif, A. R., Zaki, H. F. M., & Kumar, D. (2020). *Towards the implementation of energy harvesting for IoT sensor nodes in an early warning flood detection system. Journal of Communications*, 15(5), 398–405. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/340619263\\_Towards\\_the\\_Implementation\\_of\\_Energy\\_Harvesting\\_for\\_IoT\\_Sensor\\_Nodes\\_in\\_an\\_Early\\_Warning\\_Flood\\_Detection\\_System](https://www.researchgate.net/publication/340619263_Towards_the_Implementation_of_Energy_Harvesting_for_IoT_Sensor_Nodes_in_an_Early_Warning_Flood_Detection_System).
- [67] Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. (2001). Methods for State-of-Charge Determination and Their Applications. *Journal of Power Sources*, 96, 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00560-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00560-2).
- [68] Miller, M. R., & Burke, A. F. (2010). Testing of electrochemical capacitors: Capacitance, resistance, energy density, and power capability. *Electrochimica Acta*, 55(25), 7538–7548. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.04.074>.
- [69] Zhao, C., & Zheng, W. (2015). A review for aqueous electrochemical supercapacitors. *Frontiers in Energy Research*, 3:23. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00023>.
- [70] Maxwell Technologies, Inc. (2021). Application note: Test Procedures for Capacitance, ESR, Leakage Current, and Self-Discharge Characterization of

Ultracapacitors. Maxwell Technologies.  
<https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/downloads/>. Son Erişim  
Tarihi: 22 Temmuz 2025

- [71] Gao, D. W., Mi, C. C., & Emadi, A. (2007). Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 729–745.  
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.890127>
- [72] Chatterjee, D. P., & Nandi, A. K. (2021). A review on the recent advances in hybrid supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 9, 15880–15918.  
<https://doi.org/10.1039/D1TA02505H>.





## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Salih ELDERVIŞ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2022-

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2020 – 2022 yılları arasında Şırnak'taki Nebahat Onuk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde uzman öğretmen olarak görev aldı.
- 2022 – 2023 yılları arasında Sakarya'daki Anadolu Teknik Makina firmasında endüstriyel elektrikçi olarak çalıştı.
- 2023 – 2025 yılları arasında Hatay'daki eRdoor fabrikasında bakım mühendisi olarak görev yaptı.
- 17 Mart – 17 Nisan 2025 tarihleri arasında Suudi Arabistan'da Al-Wadi Al-Yani'ah Genel Müteahhitlik firması aracılığıyla Taldeen Plastik şirketinde bakım mühendisi olarak çalıştı.
- 17 Nisan – 2 Haziran 2025 tarihleri arasında yine Al-Wadi Al-Yani'ah Genel Müteahhitlik firması aracılığıyla saha mühendisi (şantiye mühendisi) olarak görev yaptı.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Sazak, N., & ELDERVIŞ, S. (2025, 11–14 May). An Initial Investment Cost Estimation Approach for the Supercapacitor Banks in Electric Vehicles. Uluslararası Enerji Sistemleri Konferansı (International Conference on Energy Systems - ICES-2025), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.