



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYALARIN SICAKLIK  
VE AKIM ETKİSİNE BAĞLI OLARAK İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE  
ŞARJ DOLULUK ORANI TAHMİNİNİN YAPILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

Eyyüp ASLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Programı

**ŞUBAT 2025**

**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYALARIN  
SICAKLIK VE AKIM ETKİSİNE BAĞLI OLARAK İSTATİSTİKSEL  
YÖNTEMLERLE ŞARJ DOLULUK ORANI TAHMİNİNİN YAPILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Eyyüp ASLAN**

**(182331541008)**

**ORCID: 0000-0002-5169-5274**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Programı**

**Danışman: Doç. Dr. Yusuf YAŞA**

**ORCID: 0000-0002-2032-9810**

**ŞUBAT 2025**



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 182331541008 numaralı Doktora Öğrencisi Eyyüp ASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYALARIN SICAKLIK VE AKIM ETKİSİNE BAĞLI OLARAK İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE ŞARJ DOLULUK ORANI TAHMİNİNİN YAPILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Yusuf YAŞA** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Hakan Gürkan** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Hilmi Gürleyen** .....  
Uşak Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Koray Erhan** .....  
Marmara Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Gürkan Aydemir** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** :  
**Savunma Tarihi** : 10.02.2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Eyyüp ASLAN

İmzası:



*Beni sabırla destekleyen aileme ve eşime,*

## ÖNSÖZ

Öncelikle beni bu günlere getiren, yetiştiren ve hayatımın her anında gururla yanımda olan, sevgili babama ve anneme; kariyerimin her aşamasında sabırla beni destekleyen, cesaretlendiren ve bu çalışmanın başarılı olmasında büyük emekleri olan sevgili eşime; desteklerini hep hissettiğim kardeşlerime, hayatımın dönüm noktalarında her zaman yanımda bulduğum, rol modelim amcam Yasin Aslan'a ve beni destekleyen herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması süreci boyunca beni yönlerinden, destekleyen, bilgi ve tecrübesiyle yoluma ışık tutan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Yusuf Yaşa'ya teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren tecrübe, bilgi ve birikimlerinden faydalandığım Prof. Dr. Hakan Gürkan ve Dr. Öğr. Üyesi Hilmi Gürleyen'e teşekkür ederim.

Lisans öğrenimimden itibaren bana akademik kariyeri sevdiren ve bu kariyere başlamamda büyük emekleri olan sayın hocam Doç. Dr. Mehmet Zeki Bilgin'e teşekkür ederim.

Hayatımda ve kariyerimde rol model olarak gördüğüm ve takip etmeğe çalıştığım sayın hocam Prof. Dr. Ali Bekir Yıldız'a teşekkürlerimi sunarım.

Fikirleri ve destekleri ile kariyerime başlamamda büyük etkisi olan, desteklerini hiçbir zaman unutmayacağım Mahşuk Bulut'a teşekkür ederim.

Çalışmamın test aşamalarında cihaz desteği sağlayan Bursa Teknik Üniversitesi Orman Mühendisliği öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Muhammed Said FİDAN ve Arş. Gör. Emrecan Arpacıya, Metalürji ve malzeme mühendisliği bölümü öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Deniz Uzunsoy ve Dr. Öğr. Üyesi Gökçe Boranda, NETES Mühendislik ve Dış Ticaret A.Ş. firmasına ve firma yetkililerinden Veli Şahin'e teşekkür ederim.

Şubat 2025

Eyyüp ASLAN  
(Elektrik Mühendisi)

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                         | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                  | viii |
| KISALTMALAR .....                                                  | x    |
| SEMBOLLER .....                                                    | xii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                               | xiv  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                 | xv   |
| ÖZET.....                                                          | xvii |
| SUMMARY .....                                                      | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                     | 1    |
| 1.1 Tezin Amacı, Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı.....           | 5    |
| 1.2 Tez Metni Organizasyonu .....                                  | 6    |
| 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR .....                                        | 7    |
| 2.1 Hibrit Elektrikli Araçlar .....                                | 7    |
| 2.2 Plug-in Hibrit Araçlar.....                                    | 10   |
| 2.3 Yakıt Pilli Elektrikli Araçlar .....                           | 10   |
| 2.4 Bataryalı Elektrikli Araçlar .....                             | 11   |
| 2.5 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar .....               | 13   |
| 2.5.1 Kurşun-Asit Bataryalar .....                                 | 13   |
| 2.5.2 Nikel bazlı bataryalar .....                                 | 13   |
| 2.5.3 Lityum Bazlı Bataryalar.....                                 | 14   |
| 2.5.3.1 Lityum-Metal Bataryalar.....                               | 14   |
| 2.5.3.2 Lityum İyon Bataryalar .....                               | 15   |
| 2.5.4 Diğer Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Batarya Araştırmaları..... | 15   |
| 2.5.4.1 Metal-Hava Pilleri.....                                    | 15   |
| 2.5.4.2 Sodyum-Beta Piller .....                                   | 16   |
| 3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ.....                                    | 17   |
| 3.1.1 Batarya Hücrelerinin İzlenmesi .....                         | 18   |
| 3.1.2 Giriş-Çıkış akımı ve Geriliminin İzlenmesi.....              | 19   |
| 3.1.3 Şarj-Deşarj Kontrolü .....                                   | 20   |
| 3.1.4 Batarya koruması .....                                       | 20   |
| 3.1.5 Hücrelerin dengelenmesi ve Eşitlenmesi .....                 | 21   |
| 3.1.6 Güç yönetimi kontrolü .....                                  | 23   |
| 3.1.7 Çalışma sıcaklığı kontrolü .....                             | 24   |
| 3.1.8 Isı Yönetimi.....                                            | 24   |
| 3.1.9 Ağ ve haberleşme.....                                        | 24   |
| 3.1.10 Veri depolama .....                                         | 25   |
| 3.1.11 Veri toplama.....                                           | 25   |
| 3.1.12 Hata belirleme ve değerlendirme .....                       | 25   |
| 3.1.13 Batarya Sağlık Durumu Tahmini .....                         | 26   |
| 3.1.13.1 Deneysel Yöntemler.....                                   | 27   |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.13.2 Model Tabanlı Batarya Sağlık Durumu Tahmin Yöntemleri ..... | 27        |
| 3.1.13.3 Veriye Dayalı Yöntemler .....                               | 28        |
| 3.1.14 Batarya Şarj Durumu Tahmini .....                             | 29        |
| 3.1.14.1 Tablodan okuma yöntemi .....                                | 30        |
| 3.1.14.2 Amper-saat integral (coulomb counting) yöntemi .....        | 31        |
| 3.1.14.3 Terminal gerilimi yöntemi .....                             | 32        |
| 3.1.14.4 Model tabanlı tahmin yöntemi .....                          | 32        |
| 3.1.14.5 Veri tabanlı tahmin yöntemleri .....                        | 35        |
| <b>4. MATERYAL VE METOD.....</b>                                     | <b>37</b> |
| 4.1 Eşdeğer Devre Modelinin Oluşturulması .....                      | 41        |
| 4.2 SoC Tahmin Algoritmasının Oluşturulması .....                    | 47        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                 | <b>55</b> |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                     | <b>60</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                               | <b>62</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                    | <b>72</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                 | <b>91</b> |

## KISALTMALAR

|                                                   |                                                              |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>ADC</b>                                        | : Analog-Dijital Dönüştürücü                                 |
| <b>AFC</b>                                        | : Alkali Yakıt Hücresi                                       |
| <b>ASY</b>                                        | : Amper Saat Yöntemi                                         |
| <b>ATY</b>                                        | : Arama Tablosu Yöntemi                                      |
| <b>BEA</b>                                        | : Bataryalı Elektrikli Araç                                  |
| <b>DMFC</b>                                       | : Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi                             |
| <b>EA</b>                                         | : Elektrikli Araç                                            |
| <b>ECM</b>                                        | : Eşdeğer Devre Modeli                                       |
| <b>EES</b>                                        | : Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi                    |
| <b>EKF</b>                                        | : Genişletilmiş Kalman Filtresi                              |
| <b>EM</b>                                         | : Elektrokimyasal Model                                      |
| <b>BYS</b>                                        | : Batarya Yönetim Sistemi                                    |
| <b>HEA</b>                                        | : Hibrit Elektrikli Araç                                     |
| <b>HSF</b>                                        | : H-Sonsuz Filtresi                                          |
| <b>HUDDS</b>                                      | : Urban Dynamometer Driving Schedule for Heavy-Duty Vehicles |
| <b>İYM</b>                                        | : İçten Yanmalı Motor                                        |
| <b>KF</b>                                         | : Kalman Filtresi                                            |
| <b>LİB</b>                                        | : Lityum İyon Batarya                                        |
| <b>LiCoO<sub>2</sub></b>                          | : Lityum Kobalt Oksit                                        |
| <b>LiFePO<sub>4</sub></b>                         | : Lityum Demir Fosfat                                        |
| <b>LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>              | : Lityum Manganez Oksit                                      |
| <b>LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>              | : Lityum Manganez Oksit                                      |
| <b>LiNiCoAlO<sub>2</sub></b>                      | : Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit                        |
| <b>LiNiMnCoO<sub>2</sub></b>                      | : Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit                         |
| <b>Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub></b> | : Lityum Titanat                                             |
| <b>LTO</b>                                        | : Lityum Titanat Oksit                                       |
| <b>MCFC</b>                                       | : Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi                              |
| <b>MTY</b>                                        | : Model Tabanlı Yöntemler                                    |
| <b>Na/MCl<sub>2</sub></b>                         | : Sodyum Metal Klorid                                        |
| <b>Na/S</b>                                       | : Sodyum Kükürt                                              |

|              |                                      |
|--------------|--------------------------------------|
| <b>NiCd</b>  | : Nikel Kadmiyum                     |
| <b>NiFe</b>  | : Nikel Demir                        |
| <b>NiMH</b>  | : Nikel Metal Hidrit                 |
| <b>NiZn</b>  | : Nikel Çinko                        |
| <b>NMC</b>   | : Nikel Manganez Kobalt              |
| <b>OCV</b>   | : Açık Devre Gerilimi                |
| <b>PAFC</b>  | : Fosforik Asit Yakıt Hücresi        |
| <b>PEMFC</b> | : Proton Değişim Zarı Yakıt Hücresi  |
| <b>PF</b>    | : Parçacık Filtresi                  |
| <b>PHEA</b>  | : Plug-in Hibrit Elektrikli Araç     |
| <b>RLS</b>   | : Tekrarlı En küçük Kareler Yöntemi  |
| <b>RMS</b>   | : Root Mean Square                   |
| <b>RUL</b>   | : Kalan Faydalı Ömür                 |
| <b>SoC</b>   | : Şarj Durumu                        |
| <b>SOFC</b>  | : Katı Oksit Yakıt Hücresi           |
| <b>SoH</b>   | : Sağlık Durumu                      |
| <b>SVM</b>   | : Support Vector Machine             |
| <b>UDDS</b>  | : Urban Dynamometer Driving Schedule |
| <b>UKF</b>   | : Kokusuz Kalman Filtresi            |
| <b>VDY</b>   | : Veriye Dayalı Yöntemler            |
| <b>YPEA</b>  | : Yakıt Pilli Elektrikli Araç        |

## SEMBOLLER

|               |                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | : $\bar{x}$ etrafındaki sigma noktalarının dağılımı                |
| $\beta$       | : $\bar{x}$ etrafındaki sigma noktaları dağılımının önceki bilgisi |
| $C$           | : Batarya kapasitesi                                               |
| $P_x$         | : $x$ 'in kovaryansı                                               |
| $P_{x,k}$     | : $x$ 'in $k$ anındaki kovaryansı                                  |
| $P_y$         | : $y$ 'nin kovaryansı                                              |
| $P_{y,k}$     | : $y$ 'nin $k$ anındaki kovaryansı                                 |
| $R^v$         | : Proses gürültü kovaryansı                                        |
| $R^n$         | : Ölçüm gürültü kovaryansı                                         |
| $x$           | : $L$ boyutlu rastgele değişken                                    |
| $\bar{x}$     | : $x$ 'in ortalaması                                               |
| $\bar{y}$     | : $y$ 'nin ortalaması                                              |
| $X_i$         | : Sigma vektörü                                                    |
| $x_k$         | : $k$ anındaki durum                                               |
| $\hat{x}_k$   | : $k$ anındaki durum tahmini                                       |
| $\hat{y}_k$   | : Çıkış vektörünün $k$ anındaki tahmini                            |
| $W_i$         | : Sigma vektörüne karşılık gelen ağırlık vektörü                   |
| $\lambda$     | : Ölçeklendirme parametresi                                        |
| $k$           | : İkincil ölçeklendirme parametresi                                |
| $\tau_1$      | : Eşdeğer devre modeli zaman katsayısı                             |
| $R$           | : Direnç                                                           |
| $C_1$         | : 1. Kondansatör kapasitesi                                        |
| $U_{oc}$      | : Açık devre gerilimi                                              |
| $U_{RC}$      | : Eşdeğer devre modeli paralel kol gerilimi                        |
| $V_t$         | : Çıkış gerilimi                                                   |
| <b>C-rate</b> | : Akım oranı                                                       |
| $R_{bat}$     | : Batarya iç direnci                                               |
| $I_a$         | : Batarya akımı                                                    |
| $R_{EoL}$     | : Batarya ömür sonu direnci                                        |

$R_{BoL}$  : Batarya ömür başı (yeni batarya) direnci  
 $Q_c$  : Güncel batarya kapasitesi  
 $Q_n$  : Nominal batarya kapasitesi



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Çizelge 4.1 :</b> Panasonic UR18650AA pil özellikleri .....                 | <b>37</b>    |
| <b>Çizelge 5.1 :</b> SoC tahmin yöntemlerinin hata oranı karşılaştırması ..... | <b>56</b>    |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 : 2.dereceden paralel RC kola sahip batarya eşdeğer devre modeli[35].....   | 3  |
| Şekil 1.2 : Eşdeğer devre modeli R0 parametrelerinin akıma göre değişimi [36].....    | 4  |
| Şekil 1.3 : Eşdeğer devre modeli R1 parametrelerinin akıma göre değişimi [36].....    | 5  |
| Şekil 2.1 : Elektrikli araç türleri .....                                             | 7  |
| Şekil 2.2 : Seri hibrit araç yapısı.....                                              | 8  |
| Şekil 2.3 : Paralel hibrit .....                                                      | 9  |
| Şekil 2.4 : Seri-Paralel hibrit .....                                                 | 9  |
| Şekil 2.5 : Kompleks hibrit.....                                                      | 10 |
| Şekil 2.6 : PHEA temel bileşenleri .....                                              | 10 |
| Şekil 2.7 : Yakıt pilinin temel fiziksel şeması [44] .....                            | 11 |
| Şekil 2.8 : Ferdinand Porsche'nin tasarladığı ilk hibrit elektrikli araç (1901) ..... | 12 |
| Şekil 2.9 : 1977 yılında Volkswagen'in tanıttığı minivan.....                         | 12 |
| Şekil 2.10 : Lityum iyon bataryaların yıllara göre kapasite ve fiyat değişimi.....    | 14 |
| Şekil 3.1 : Batarya yönetim sistemi işlevleri .....                                   | 17 |
| Şekil 3.2 : Batarya yönetim sistemi prensip şeması .....                              | 18 |
| Şekil 3.3 : Giriş-Çıkış verilerinin izlenmesi .....                                   | 19 |
| Şekil 3.4 : Elektrikli araç şarj deşarj sistemi prensip şeması.....                   | 20 |
| Şekil 3.5 : Batarya koruması prensip şeması .....                                     | 21 |
| Şekil 3.6 : Seri dengeleme yöntemi [77]. .....                                        | 22 |
| Şekil 3.7 : Katmanlı dengeleme yöntemi [77]. .....                                    | 22 |
| Şekil 3.8 : Modüler dengeleme sistemi [77]. .....                                     | 23 |
| Şekil 3.9 : Güç yönetimi prensip şeması .....                                         | 23 |
| Şekil 3.10 : Isı yönetimi prensip şeması .....                                        | 24 |
| Şekil 3.11 : SoH tahmin Yöntemleri.....                                               | 26 |
| Şekil 3.12 : BYS'de SoC'nin kullanıldığı fonksiyonlar .....                           | 29 |
| Şekil 3.13 : Batarya şarj durumu tahmin yöntemleri.....                               | 30 |
| Şekil 3.14 : Açık devre gerilimi ölçme.....                                           | 30 |
| Şekil 3.16 : Eşdeğer devre modeli .....                                               | 33 |
| Şekil 4.1 : Panasonic UR18650AA pil görseli .....                                     | 37 |
| Şekil 4.2 : Darbe deşarj testinde uygulanan akım ve gerilim grafiği.....              | 38 |
| Şekil 4.3 : Klimatik test kabini .....                                                | 39 |
| Şekil 4.4 : Etüv ile yapılan test görseli .....                                       | 39 |
| Şekil 4.5 : Testlerde kullanılan veri toplama kartı ve geliştirme kartı.....          | 40 |
| Şekil 4.6 : Labview arayüzü .....                                                     | 40 |
| Şekil 4.7 : Akım, sıcaklık, SoC'ye bağlı Eşdeğer devre modeli.....                    | 41 |
| Şekil 4.8 : Gerilim düşümü ve eksponansiyel değişim noktalarının belirlenmesi.....    | 42 |
| Şekil 4.9 : Değişim noktalarının yakınlaştırılmış hali .....                          | 42 |
| Şekil 4.10 : Eğri uydurma aşaması .....                                               | 42 |
| Şekil 4.11 : $\tau_1$ , $\tau_2$ , $\tau_3$ değerlerinin tahmin edilmesi.....         | 43 |
| Şekil 4.12 : Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları karşılaştırması .....          | 43 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.13 : Doğrusal uydurma işlemi .....                                                | 44 |
| Şekil 4.14 : Doğrusal uydurma sonrası parametreler.....                                   | 44 |
| Şekil 4.15 : Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları karşılaştırması .....              | 44 |
| Şekil 4.16 : SDO işlemi .....                                                             | 45 |
| Şekil 4.17 : SDO sonrası devre parametreleri .....                                        | 45 |
| Şekil 4.18 : Nihai sonuç.....                                                             | 45 |
| Şekil 4.19 : Simulink eşdeğer devre modeli .....                                          | 46 |
| Şekil 4.20 : Kondansatör modeli .....                                                     | 46 |
| Şekil 4.21 : Direnç modeli .....                                                          | 47 |
| Şekil 4.22 : UKF ile SoC tahmini yöntemi akış diyagramı .....                             | 47 |
| Şekil 4.23 : Simulink UKF modeli .....                                                    | 50 |
| Şekil 4.24 : UKF algoritması modelinin detaylı gösterimi.....                             | 51 |
| Şekil 4.25 : Batarya eşdeğer devre modeli ve UKF algoritmasının entegre edilmiş hali..... | 52 |
| Şekil 4.26 : Deneysel doğrulama testi düzeneği prensip şeması .....                       | 53 |
| Şekil 4.27 : Pil sıcaklık değişimi .....                                                  | 53 |
| Şekil 4.28 : Deşarj akımı-zaman grafiği .....                                             | 54 |
| Şekil 5.1 : Doğru SoC başlangıç değeri ile yapılan test sonuçları.....                    | 55 |
| Şekil 5.2 : Hatalı SoC başlangıç değeri ile yapılan test sonuçları .....                  | 56 |
| Şekil 5.3 : UDDS çevrimine göre yöntemlerin SoC tahmin başarıları.....                    | 57 |
| Şekil 5.4 : HUDDS çevrimine göre yöntemlerin SoC tahmin başarıları.....                   | 58 |
| Şekil A.1 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R0 parametreleri.....                         | 73 |
| Şekil A.2 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R1 parametreleri.....                         | 74 |
| Şekil A.3 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R2 parametreleri.....                         | 75 |
| Şekil A.4 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R3 parametreleri.....                         | 76 |
| Şekil A.5 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için C1 parametreleri.....                         | 77 |
| Şekil A.6 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için C2 parametreleri.....                         | 78 |
| Şekil B.1 : UKF Algoritması Simulink Modeli .....                                         | 80 |
| Şekil B.2 : UKF Algoritması fonksiyon blokları .....                                      | 80 |
| Şekil B.3 : Durum geçiş fonksiyonu bloğu .....                                            | 81 |
| Şekil B.4 : Ölçme fonksiyonu bloğu .....                                                  | 81 |
| Şekil B.5 : UKF algoritması parametreleri.....                                            | 81 |
| Şekil C.1 : -10 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları.....                       | 82 |
| Şekil C.2 : 0 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                        | 82 |
| Şekil C.3 : 10 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                       | 83 |
| Şekil C.4 : 20 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                       | 83 |
| Şekil C.5 : 30 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                       | 84 |
| Şekil C.6 : 40 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                       | 84 |
| Şekil C.7 : -10 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları.....                     | 85 |
| Şekil C.8 : 0 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                      | 85 |
| Şekil C.9 : 10 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                     | 86 |
| Şekil C.10 : 20 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                    | 86 |
| Şekil C.11 : 30 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                    | 87 |
| Şekil C.12 : 40 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                    | 87 |
| Şekil C.13 : -10 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları.....                      | 88 |
| Şekil C.14 : 0 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                       | 88 |
| Şekil C.15 : 10 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                      | 89 |
| Şekil C.16 : 20 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                      | 89 |
| Şekil C.17 : 30 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                      | 90 |
| Şekil C.18 : 40 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları .....                      | 90 |

# **ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYALARIN SICAKLIK VE AKIM ETKİSİNE BAĞLI OLARAK İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE ŞARJ DOLULUK ORANI TAHMİNİNİN YAPILMASI**

## **ÖZET**

Bataryaların şarj durumu tahmini hem güvenlik hem de verimlilik açısından oldukça kritik bir konudur. Özellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon bataryaların aşırı şarj durumunda ortaya çıkan patlama ve yangın riski ve elektrikli araçların hemen hemen hepsinde lityum iyon batarya kullanıldığı gerçeği göz önünde bulundurulduğunda hatalı şarj durumu tahmininin ne kadar ciddi sorunlara yol açabileceği tahmin edilebilir. Bu sebeple yıllardır var olan ve elektrikli araçlar ile birlikte daha da önem kazanan şarj durumu tahmini son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmeyi başarmıştır.

Basit batarya uygulamalarında (insan hayatını riske atmayan, doğruluk oranının çok önemli olmadığı batarya uygulamaları) ucuz ve kolay uygulanabilir oldukları için geleneksel şarj durumu tahmin algoritmaları tercih edilmektedir. Elektrikli araçlarda şarj durumu tahmin doğruluk oranının yükseltilmesi talebiyle araştırmacılar birçok karmaşık yöntem geliştirmiştir. Bunlardan en popüler olanlardan bir tanesi kalman filtresi tabanlı yöntemlerdir.

Kalman filtresi ve uzantıları şarj durumu tahmini için bir batarya modeline ihtiyaç duymaktadır. Genellikle eşdeğer devre modeli ile birlikte kullanılan kalman filtresi algoritmalarının doğruluk oranı batarya modelinin doğruluk oranı ile orantılıdır. Bu yüzden araştırmacılar batarya modelleri üzerinde de çalışarak model doğruluk oranını artırmaya çalışmışlardır. Bunu yapmanın en iyi yollarından bir tanesi bataryayı etkileyen çevresel ve kimyasal faktörleri göz önünde bulundurmaktır.

Bu çalışma kapsamında elektrikli araçlar için akım ve sıcaklığa bağlı batarya şarj durumu (SoC) tahmin algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemde SoC tahmin doğruluk oranını artırmak için eşdeğer devre modelinde sıcaklık ve akım değişimi etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Üçüncü dereceden bir eşdeğer devre modeli kullanılarak batarya modelinde batarya karakteristiği en iyi şekilde benzetilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntemde SoC tahmininde yaygın olarak kullanılan ve yüksek doğruluk oranına sahip UKF algoritması kullanılmıştır.

Eşdeğer devre parametrelerinin tahmin edilebilmesi için belirli akım ve sıcaklık koşullarında lityum iyon batarya numuneleri anlık deşarj yöntemi ile test edilmiştir. Her sıcaklık ve akım değeri için elde edilen test sonuçları toplanarak parametre tahmin algoritması yardımı ile üçüncü dereceden eşdeğer devre modelinin parametreleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen parametreler üç boyutlu arama tabloları haline getirilerek batarya modelinde kullanılmışlardır.

Batarya parametrelerinin tahmini, batarya eşdeğer devre modelinin kurulması ve UKF SoC tahmin algoritmasının oluşturulması için MATLAB Simulink

yazılımından faydalanılmıştır. Eşdeğer devre modeli ve SoC tahmin algoritması Simulink ortamında bir araya getirilerek önerilen algoritmanın modeli oluşturulmuştur. Önerilen algoritma benzetim ortamına olgunlaştırıldıktan sonra gömülü sistem araçları kullanılarak STM32F401RE geliştirme kartına yüklenmiştir

Önerilen yöntem hem benzetim çalışması hem de uygulamalı yöntemlerle test edilerek yöntemin başarısı gözlemlenmiştir. Yöntemin ticari bir geliştirme kartı üzerinde uygulanabilmesi yöntemin ticarileşmesi açısından umut vericidir. Benzetim ve deneysel doğrulama testleri incelendiğinde önerilen yöntem geleneksel yöntemlerin önüne geçmektedir. Önerilen yöntemin mutlak hatasının %3'ün altında olması bu yöntemin elektrikli araçlarda uygulanabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Elektrikli araçlar, Batarya yönetim sistemi, Lityum iyon bataryalar, Şarj durumu tahmini, Koksuz kalman filtresi.



# **ESTIMATING THE STATE OF CHARGE OF LITHIUM-ION BATTERIES IN ELECTRIC VEHICLES WITH STATISTICAL METHODS DEPENDING ON THE EFFECT OF TEMPERATURE AND CURRENT**

## **SUMMARY**

Battery state of charge estimation is a critical issue in terms of both safety and efficiency. Considering the explosion and fire risks that occur in the event of overcharging lithium-ion batteries with high energy density and the fact that lithium-ion batteries are used in almost all electric vehicles, it is clear that how serious problems can be caused by incorrect state of charge estimation. Because of that, state of charge estimation, which has existed for years and has become more important with electric vehicles, has attracted the attention of researchers in recent years.

Traditional state of charge estimation algorithms is preferred because they are cheap and easy to apply in simple battery applications (battery applications that do not endanger human life and where accuracy is not very important). Researchers have developed many complex methods with the demand to increase the state of charge estimation accuracy rate in electric vehicles. One of the popular method is Kalman filter-based methods.

Kalman filter and its extensions require a battery model for state of charge estimation. The accuracy rate of Kalman filter algorithms, which are usually used together with the equivalent circuit model, is proportional to the accuracy rate of the battery model. Therefore, researchers have tried to increase the model accuracy rate by improving battery models. To do this, the environmental and chemical factors that affect the battery are required to be considered.

In this study, a current and temperature dependent battery state of charge estimation algorithm is proposed for electric vehicles. In the proposed method, the effect of temperature and current change in the equivalent circuit model is considered in order to increase the SoC estimation accuracy rate. A third-order equivalent circuit model was used to simulate a real battery characteristic in the battery model. The UKF algorithm, which is widely used in SoC estimation and has a high accuracy rate, was used in the proposed method.

In order to estimate the equivalent circuit parameters, lithium-ion battery samples were tested by pulse discharge method under certain current and temperature conditions. The test results obtained for each temperature and current value were collected and the parameters of the third-order equivalent circuit model were estimated by the parameter estimation algorithm. The estimated parameters were combined into three-dimensional lookup tables and used in the battery model.

MATLAB Simulink software was used to estimate the battery parameters, establish the battery equivalent circuit model and create the UKF SoC estimation algorithm. The equivalent circuit model and the SoC estimation algorithm were combined in the

Simulink environment and the proposed algorithm model was created. After the proposed algorithm was matured in the simulation environment, it was loaded onto the STM32F401RE development board using embedded system tools. The success of the proposed method was observed by testing it with both simulation and experimental assessment methods. The implementation of the proposed method on a commercial development board is promising in terms of commercialization of the method. When the simulation and experimental verification tests are examined, the proposed method surpasses traditional methods. Absolute error of the proposed method is below 3%. This result prove that this method can be applied in electric vehicle applications.

**Keywords:** Electric vehicles, Battery management system, Lithium-ion batteries, State of charge estimation, Unscented Kalman filter.



## 1. GİRİŞ

1900'lü yılların başında bataryalar güç kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktaydı. İlk üretilen bataryaların tükenebilen aktif elemanlardan ve sıvı elektrolitten oluşması, batarya kullanımını kısıtlamış ve zorlaştırmıştır. Şarj edilebilir kurşun asit bataryaların üretilmesi ile batarya teknolojisinde büyük atılımlar gerçekleşmiştir. Ancak bu bataryaların düşük güç ve enerji yoğunluğuna sahip olması yeni batarya teknolojisi arayışlarına neden olmuştur.

Yıllar boyunca Nikel Kadmiyum (NiCd), Nikel Metal Hidrit (NiMH) gibi farklı batarya teknolojileri denenmiş ve kullanılmış olsa da günümüzde en çok kullanım alanına sahip olan bataryalar Lityum iyon bataryalardır. Lityum iyon bataryalar yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip olduğu için elektrikli araçlar gibi yüksek kapasitelerde enerji ihtiyacının olduğu uygulamalarda kullanımı en uygun bataryalardandır [1]. Lityum iyon bataryaların katot elektrotunun malzeme türüne göre kimyasal yapıları farklı olan batarya türleri elde edilmiştir. Bunlardan bazıları lityum kobalt oksit ( $\text{LiCoO}_2$ ), lityum mangan oksit ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), lityum demir fosfat ( $\text{LiFePO}_4$ ), lityum nikel mangan kobalt oksit ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ), lityum nikel kobalt alüminyum oksit ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ) ve lityum titanattır ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) [2]. Gelişmiş ve güvenilir enerji depolama teknolojisinin geliştirilmesi, elektrikli araçların menzil kaygısını da ortadan kaldıracaktır [3,4].

Lityum iyon bataryaların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duymaktadır. Pil şarj durumu (SoC), pilin kalan kullanılabilir kapasitesini gösteren temel pil yönetim sistemi işlevlerinden bir tanesidir [5]. Doğru SoC tahmini pilin ömrünü uzatabilir ve aşırı şarj deşarj riskini önemli ölçüde azaltabilmektedir [6]. Lityum iyon bataryalar karmaşık, lineer olmayan bir yapıya sahip olduğundan SoC doğrudan ölçülememektedir, akım, gerilim, sıcaklık gibi parametreler kullanılarak tahmin edilebilmektedir [7].

Pil performansının optimizasyonu ve güvenli çalışma göz önüne alınarak doğru SoC tahmini yapılabilmesi için literatürde birçok yöntem önerilmiştir [8]. Bu yöntemler

temelde dört başlık altında incelenmektedir: Amper saat yöntemi (ASY) [9,10], arama tablosu yöntemi [11,12], veriye dayalı yöntemler [13,14] ve model tabanlı yöntemlerdir [15,16]. Amper-saat yöntemi doğrudan akımın integralini alarak açık çevrim çalışan ve en yaygın kullanılan yöntemdir [17]. Açık çevrim çalışmasından dolayı başlangıç SoC değerindeki bir hata sonraki çevrimlerde artarak büyüyecektir. Arama tablosu yöntemi basit bir yöntemdir, pilin önceden elde edilmiş açık devre gerilimi (OCV) ve SoC eşleme tablosuna dayanarak SoC tahmini yapar [18]. Bu yöntemin verimli ve doğru bir şekilde çalışabilmesi için pilin yaklaşık yarım saat dinlendirilmiş, kullanılmamış olması gerekmektedir [19,20]. Bu yüzden bu yöntem online SoC tahmini için uygun değildir.

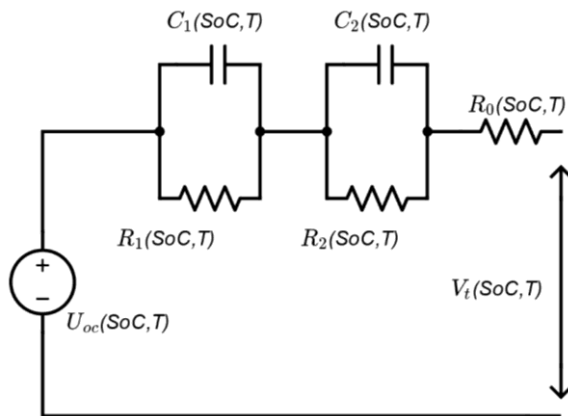
Veriye dayalı yöntemler pilin kimyasal karmaşık yapısından bağımsız olarak çalışmaktadır [21]. Bu yöntem pili bir kara kutu modeli olarak ele alır ve elektriksel parametreler ile SoC arasındaki ilişkiyi eğitmek için büyük miktarda veri kullanır. Modelsiz çalışması, doğrusal olmayan eşleme ve yüksek uygulanabilirlik gibi avantajlarından dolayı destek vektör makinesi [22], yapay sinir ağları [23] ve bulanık mantık [24] gibi akıllı algoritmalar SoC tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda veriye dayalı yöntemler SoC tahminindeki yüksek doğruluk oranları ile dikkat çekmektedirler [14]. Ancak bu yöntemin doğruluk oranı eğitim verisine, eğitim moduna bağlı olmaktadır ve yüksek hesaplama gücü gereksinimlerinden dolayı uygulanması zordur [25].

Model tabanlı yöntem, pilin karakteristik özelliklerini doğru bir şekilde tanımlayan modele ve ilgili tahmin algoritmalarına dayalı olarak pil şarj durumunu tahmin etmek için kullanılmaktadır [26]. Önceki çalışmalarda H-sonsuz filtresi [27], kalman filtresi[28], parçacık filtresi [29], doğrusal olmayan gözlemci [30] gibi birçok model tabanlı SoC tahmin algoritması önerilmiştir. Bu algoritmalarından kalman filtresi kapalı çevrim çalışabilmesi ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle hem araştırmacılar tarafından hem de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Algoritmaların doğru tahmin yapmasını sağlayan temel bileşenlerden bir tanesi de doğru bir batarya modelidir. Batarya modelleri arasında yaygın olarak kullanılan modeller elektrokimyasal modeller (EM) ve eşdeğer devre modelleridir (ECM). EM bataryanın karakteristiğini çok iyi yansıtsa da karmaşık yapısı ve çok sayıda parametre içermesinden dolayı online SoC tahmin algoritmalarında kullanımı zordur [31]. ECM direnç, kondansatör gibi pasif elektriksel devre elemanlarından meydana

gelir ve bataryanın dinamik karakteristiğini bu devre elemanları sayesinde modeller. Elektrokimyasal model gibi çok sayıda parametre barındırmaması ve onun kadar karmaşık olmaması bu yöntemin uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır. Bunun yanı sıra SoC tahmin doğruluğu açısından yeterli bir oran sağladığı için karmaşıklık-doğru tahmin dengesi açısından oldukça idealdir [32].

Eşdeğer devre modeli ile birlikte genellikle Kalman filtresi kullanılmaktadır. Kalman filtresi batarya modeli ile gerçek ölçümleri karşılaştırır ve elde edilen hataya göre SoC tahmin hatasını düzeltmeye çalışır. Bunu yaparken bataryanın lineer olmayan denklemlerini çözmeye çalışır. Lineer olmayan denklemleri çözmek ve daha doğru bir SoC tahmini sağlamak için Kalman filtresinin farklı varyantları önerilmiştir [33]. Genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) lineer olmayan denklemleri birinci dereceden Taylor serisi açılımı ile lineerleştirmeye çalışırken Kokusuz Kalman filtresi (UKF) birden fazla örnek noktası kullanarak lineer olmayan denklemin olasılık yoğunluk fonksiyonunu yaklaşık olarak hesaplar. Yapılan çalışmalar UKF'in EKF'ten daha doğru SoC tahmini sağladığını göstermektedir [34].

Lityum iyon bataryalar çevresel koşullar, akım oranı, yaşlanma gibi faktörlerden etkilenmektedirler. Batarya modeli oluşturulurken bu faktörlerin göz önünde bulundurulması batarya modelinin ve dolayısıyla SoC tahmin algoritmasının doğruluk oranının arttırmaktadır. Ancak bu faktörler göz önünde bulunduruldukça algoritmanın ve modelin karmaşıklığı arttığı için algoritmanın uygulanması zorlaşmaktadır. Bu yüzden batarya eşdeğer devre modeli ve SoC tahmin algoritması oluşturulurken karmaşıklık ve doğruluk oranı dengesi kurulmalıdır.



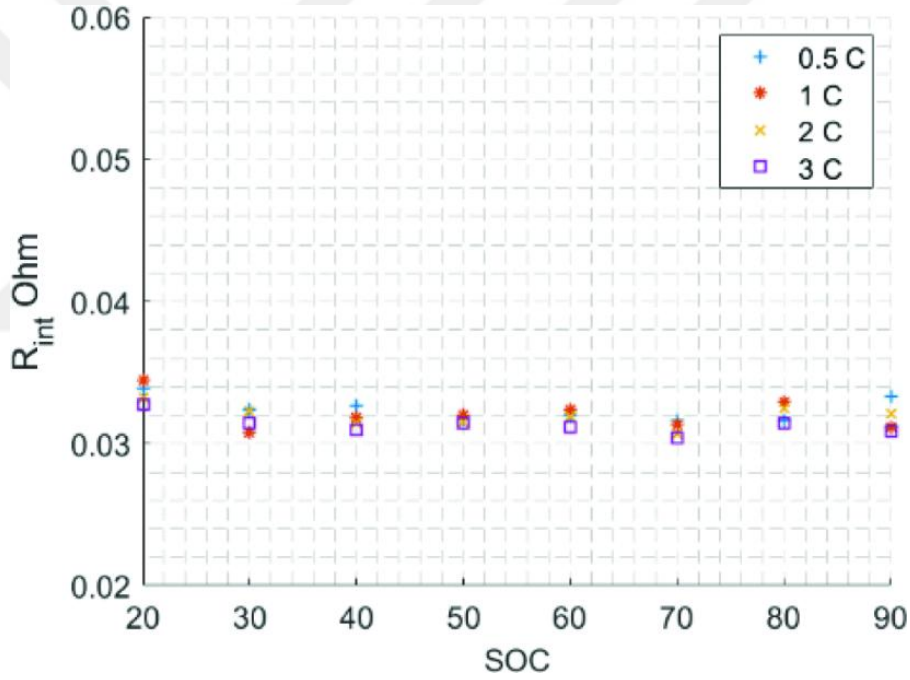
**Şekil 1.1 :** 2.dereceden paralel RC kola sahip batarya eşdeğer devre modeli [35]

Eunseok Choi ve Sekchin yaptıkları çalışmada, sıcaklık ve batarya açık devre gerilimini etkileyen histerezis etkisini dikkate alarak bir SoC tahmin yöntemi

önermiştir [35]. Çalışmada batarya modeli olarak Şekil 1.1’de verilen ikinci dereceden paralel RC kolu içeren thevenin eşdeğer devre modelini kullanmışlardır.

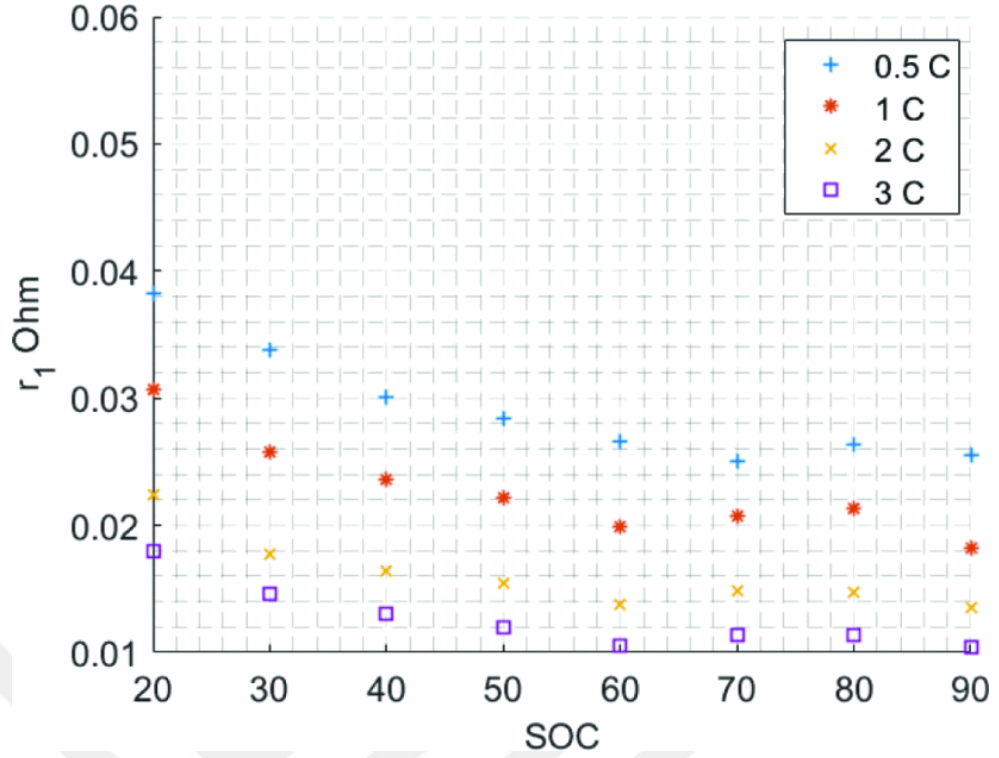
Burada UOC batarya açık devre gerilimini, SOC batarya şarj doluluk oranını, T sıcaklık değerini, URC1 ve URC2 paralel kol gerilimini, R0 batarya seri iç direncini, Vt batarya uç gerilimini temsil etmektedir.

Fonseca vd. yaptığı çalışmada farklı SOC değerlerinde ve farklı akım değerlerinde batarya model parametrelerinin değiştiği gözlemlenmiştir [36]. Bu çalışmaya göre batarya eşdeğer devre modeli olarak birinci dereceden bir model kullanılmıştır. Model parametrelerinden R0 ve R1 değerinin bataryadan çekilen akıma göre değiştiği anlaşılmaktadır. Şekil 1.2’de R0, Şekil 1.3’te R1 parametresinin akım oranına göre değişimi gösterilmiştir [36].



**Şekil 1.2 :** Eşdeğer devre modeli R0 parametrelerinin akıma göre değişimi [36]

Eunseok Choi ve Sekchin Chang’ın yaptığı çalışmada batarya eşdeğer devre modeli parametre tahmini yapılırken SoC değeri ve sıcaklık değeri dikkate alınmış ancak bataryadan çekilen akım değeri göz ardı edilmiştir. Fonseca vd. yaptığı çalışmada ise bataryadan çekilen akım değerinin batarya parametreleri üzerindeki etkisi gösterilmiş ancak bu etki dikkate alınarak SoC tahmini yapılmamıştır.



**Şekil 1.3 :** Eşdeğer devre modeli R1 parametrelerinin akıma göre değişimi [36]

### 1.1 Tezin Amacı, Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı

Bu tez çalışmasında birden fazla değişkene bağlı gelişmiş ve doğruluk oranı yüksek bir SoC tahmin yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde SoC değeri tahmin edilirken anlık SoC değeri ve sıcaklık değerinin yanı sıra bataryadan çekilen akım da dikkate alınarak daha doğru bir SoC tahmini sunan bir algoritma geliştirilmiştir. Eşdeğer devre modeli olarak daha yüksek tahmin doğruluğu sağlayan üçüncü dereceden (3RC) bir batarya modeli oluşturulmuş, SoC tahmin algoritması olarak da yüksek doğruluk oranına sahip Kokusuz Kalman filtresi kullanılmıştır. Bu çalışmada SoC tahmini yaparken geniş aralıkta sıcaklık değerinin (-10 °C ile 40 °C) ve akım oranının dikkate alınması literatürde işlenmeyen bir konuya açıklık getirmiştir. Önerilen yöntem literatürdeki yaygın yöntemlerle karşılaştırılarak önerilen yöntemin başarısı ve akım oranının SoC tahmini üzerindeki etkisi açıkça gösterilmiştir. Eşdeğer devre modelinin farklı sıcaklık şartları ve akım oranlarına göre oluşturulması için detaylı batarya testleri gerçekleştirilmiş ve veriler titizlikle toplanarak işlenmiştir. Gerçek verilerle oluşturulan eşdeğere devre modeli ve geliştirilen algoritma gerçek devre üzerinde doğrulanarak çalışmanın başarısı gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

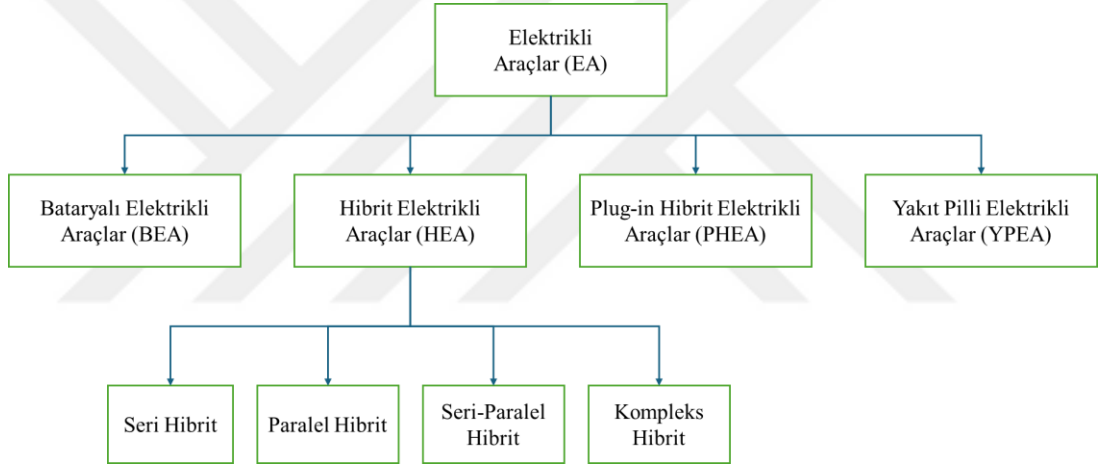
- Üçüncü dereceden batarya eşdeğer devre modeli kullanılarak daha gelişmiş ve gerçek batarya davranışına daha yakın bir batarya modeli oluşturulmuştur.
- Önerilen yöntem ticari bir geliştirme kartı üzerinde uygulanarak çalışmanın ticarileşme potansiyeli ve uygulanabilirliği gösterilmiştir.
- Yapay veriler yerine gerçek batarya testleri ile elde edilen parametreler kullanılarak farklı etkenlerin SoC tahmin başarısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.
- Kokusuz Kalman filtresinin gelişmiş tahmin başarısından faydalanılarak doğruluk oranı yüksek bir SoC tahmin algoritması geliştirilmiştir.
- Önerilen yöntemin elektrikli araçlara uygulanabileceği elde edilen başarı oranı ile ispatlanmıştır.

## 1.2 Tez Metni Organizasyonu

Bu çalışma toplam 6 bölümde sunulmuştur. Çalışmanın 2.bölümünde Elektrikli araçların türleri, tarihçesi ve yapılarına değinilmiştir. Ayrıca elektrikli araçların kritik birimlerinden olan bataryaların çeşitleri gösterilmiş ve elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. 3. Bölümde bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde çalışması için büyük öneme sahip olan batarya yönetim sistemi hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Batarya yönetim sisteminin işlevleri tek tek açıklanmış, bu tezin konusu ve batarya yönetim sisteminin önemli bir fonksiyonu olan Şarj durumu tahmini ne özel bir yer verilmiştir. 4. Bölümde tez çalışmasında kullanılan araçlar, materyaller verilmiş ve tezde önerilen yöntem adım adım açıklanmıştır. Bu bölümde özellikle tezde kullanılan batarya eşdeğer devre modeli ve SoC tahmin yöntemi detaylı bir şekilde sunulmuştur. 5. Bölümde yapılan testler, deneyler ve benzetim çalışmalarında elde edilen bulgular tek tek gösterilip tartışılarak sunulmuştur. Bu bulgular ışığında 6. Bölümde çalışmanın sonucu, avantajları ve sonraki çalışmalar için faydalı olacağı düşünülen önerilere yer verilmiştir.

## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Son yıllarda artan sera gazı salınımının çevreyi olumsuz etkilemesi ve konvansiyonel araçlardan salınan gazların bunun büyük bir parçası oluşu, otomotiv sektörünü elektrikli araç teknolojisine itmiştir. Elektrik enerjisinin araç tahriki için enerji kaynağı olarak kullanıldığı araçlar temel olarak dört gruba ayrılır: Hibrit Elektrikli Araç (HEA), Plug-in Hibrit Araç (PHEA), Bataryalı Elektrikli Araç (BEA) ve Yakıt Pili Elektrikli Araçlar (YPEA). Şekil 2.1’de elektrikli araç türleri özet olarak gruplandırılmıştır.

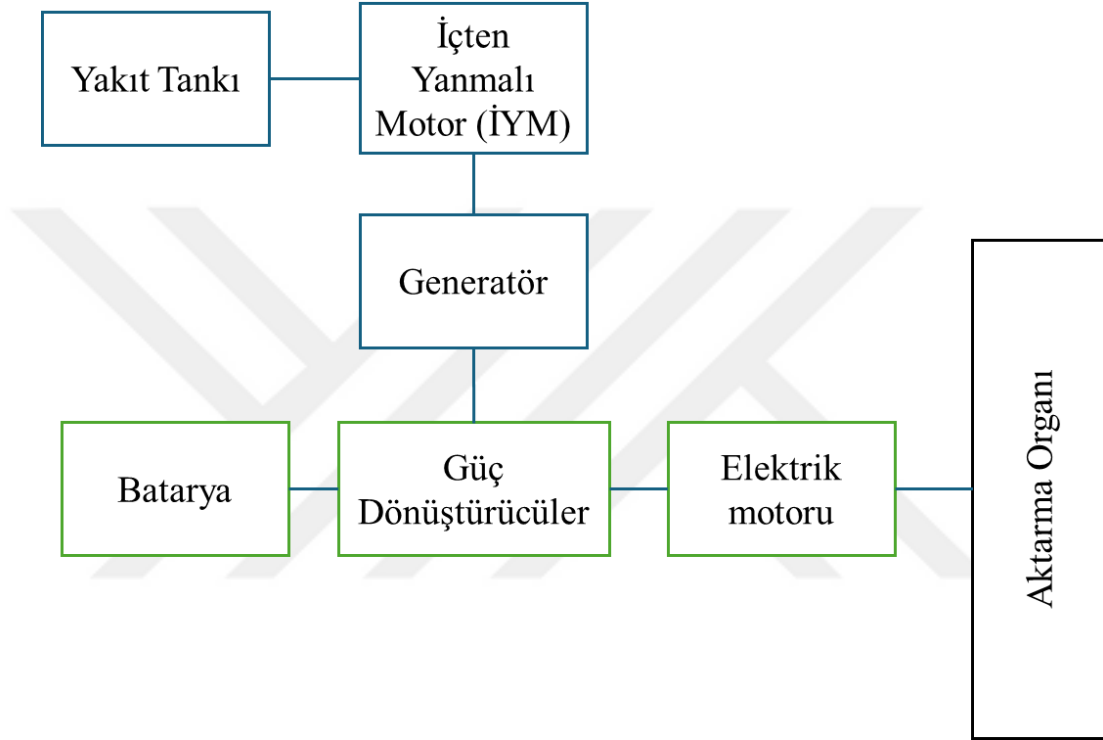


Şekil 2.1 : Elektrikli araç türleri

### 2.1 Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit elektrikli araçların yakıt verimliliği sağlaması ve gaz salınımını düşürmesinin en büyük sebeplerinden birisi yüksek verimli elektrik motorlarıyla donatılmış olmalarıdır. Elektrik motoru ve içten yanmalı motorun birlikte kullanılarak yük paylaşımı yapması, içten yanmalı motor boyutunun küçülmesini ve bu motorun en yüksek verim noktasında kullanılabilme imkanını sağlamıştır. Elektrik motorunun generatör modunda çalışabilme yeteneği sayesinde ise frenleme enerjisinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülerek enerjinin geri kazanımı sağlanmıştır. Böylece yakıt verimliliği daha da artmıştır. Hibrit araçlar, elektrik motorunun ve içten yanmalı motorun birlikte kullanım şekline göre farklı konfigürasyonlarda üretilmişlerdir.

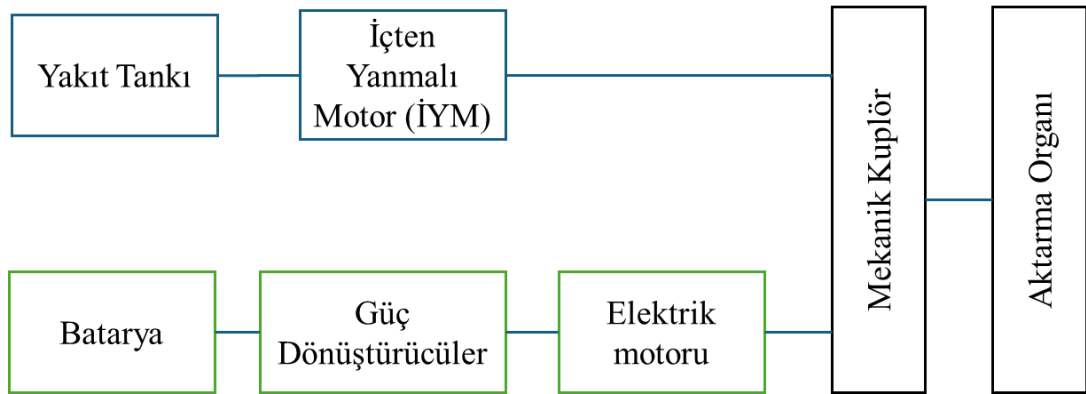
Seri hibrit konfigürasyonunda içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında herhangi bir bağ bulunmamaktadır, gerekli güç elektrik motorları tarafından aktarma organlarına sağlanmaktadır. Böylece içten yanmalı motor boyutu küçülmekte ve bu motor sürekli en yüksek verimde çalıştırılabilmektedir [37]. Bu konfigürasyon günümüzde sadece otobüs gibi ağır araçlarda kullanılsa da otomotiv üreticileri bu konfigürasyonun diğer araç sınıflarındaki uygulamalarını arttırmaya çalışmaktadır [38].



**Şekil 2.2 : Seri hibrit araç yapısı**

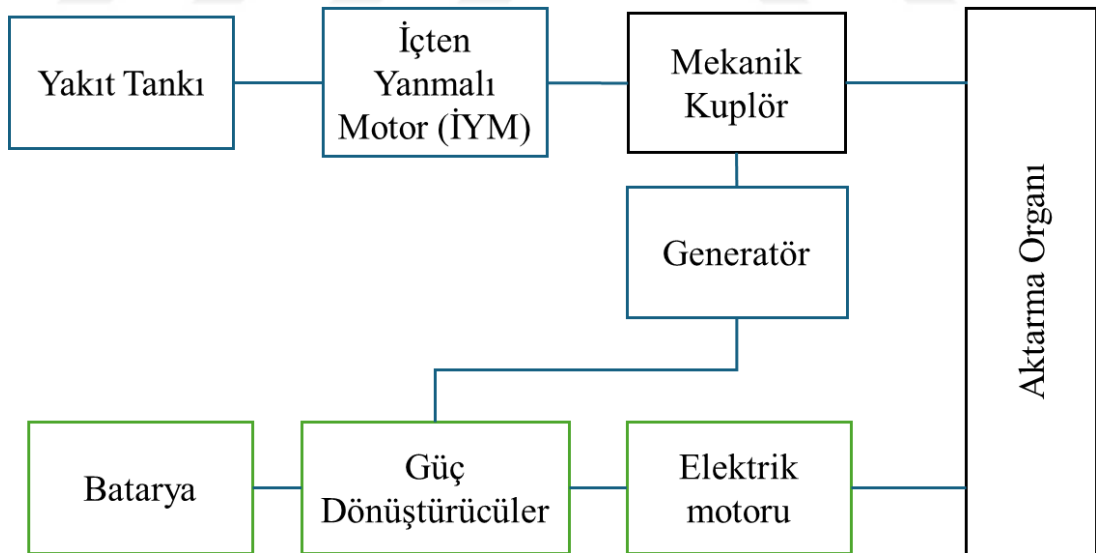
Paralel hibrit konfigürasyonunda elektrik motoru ve içten yanmalı motor araç tahrikini birlikte ya da ayrı ayrı sağlayıp ortak tork katkısı yapabilir. Elektrik motorunun bu konfigürasyondaki konumuna göre de tek ya da çift motorlu mimariler ortaya çıkar. Bu seçeneklere göre paralel hibrit konfigürasyonu farklı alt kategorilere ayrılır [38].

Paralel hibrit araçlarda araç hızı motor hızı ile sınırlandırılmaktadır ancak uygun kontrol teknikleri ile her iki motor da en verimli olduğu noktada çalıştırılabilir [39-41]. Bu konfigürasyonda içten yanmalı motor birincil güç kaynağı olarak çalışır ve elektrik motoru hızlanma sırasında destekleyici güç olarak devreye girer. Bu yüzden paralel hibritteki içten yanmalı motorlar seri hibrittekilerden genelde daha büyüktür [37].



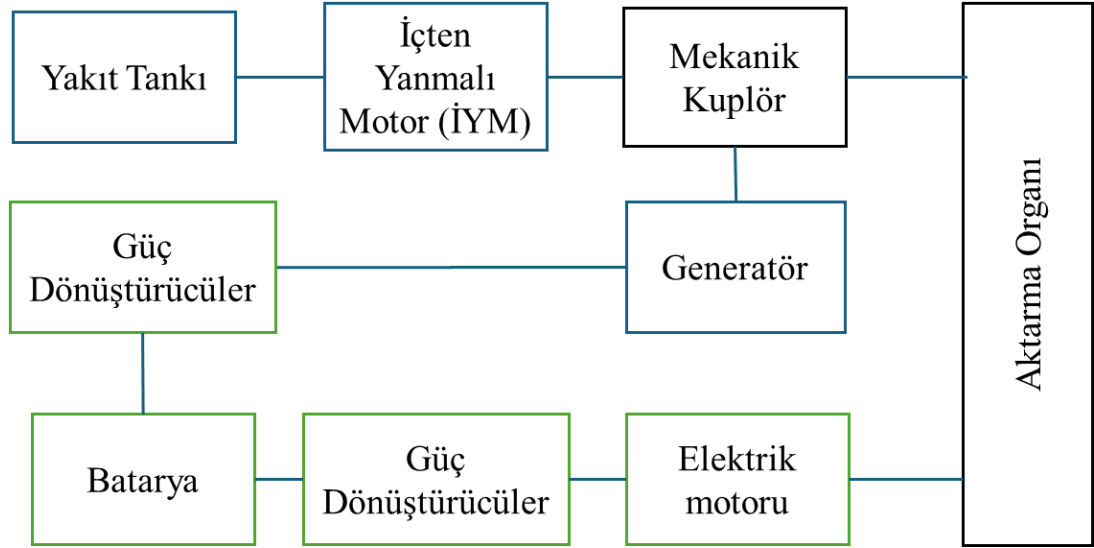
**Şekil 2.3 : Paralel hibrit**

Seri-Paralel ya da Güç Bölmeli olarak adlandırılan üçüncü konfigürasyon, seri hibrit ve paralel hibrit konfigürasyonun avantajlarını kullanmıştır. Güç bölmesi olarak adlandırılan gezegen dişlisi, seri ve paralel konfigürasyonların bütünleşmesini sağlayarak elektrikli ya da hibrit-elektrikli sürüş imkânı sağlar ve enerji verimliliğini artırır [42]. Bu konfigürasyon karmaşık kontrol yöntemleri gerektirse de yüksek enerji verimliliğinden dolayı günümüzün modern araçlarında tercih edilmektedir.



**Şekil 2.4 : Seri-Paralel hibrit**

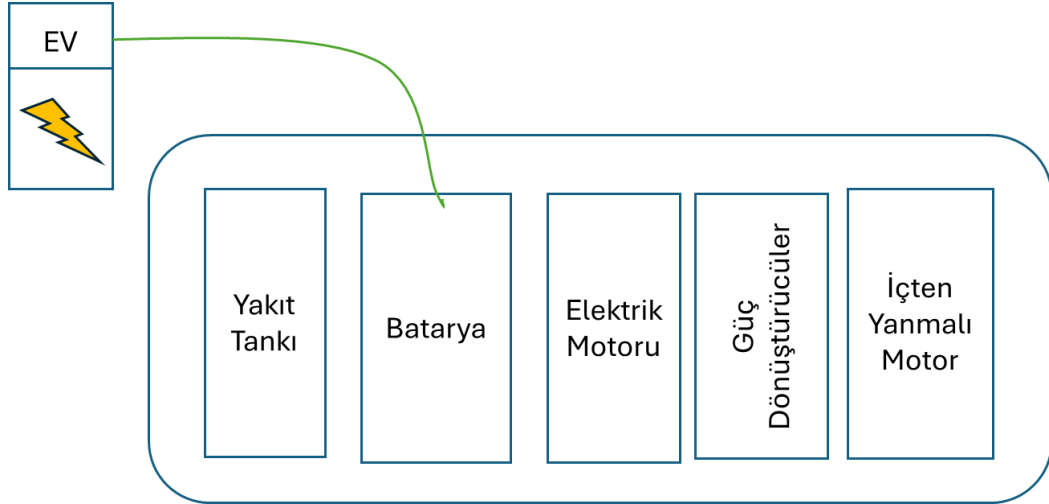
Kompleks hibrit araçlar karmaşık konfigürasyonundan dolayı diğer üç sınıf içerisinde yer bulamadığı için bu şekilde isimlendirilmiştir. Kompleks hibritte seri-parallel hibritten farklı olarak generatör gerekli durumlarda mekanik güç üreterek tahrik sistemine destek verebilmektedir.



Şekil 2.5 : Kompleks hibrit

## 2.2 Plug-in Hibrit Araçlar

Plug-in hibrit araçların geleneksel hibrit araçlardan temel farkı, daha büyük bir bataryaya sahip olması ve bu bataryanın harici olarak (Şebeke, Şarj istasyonu vb.) şarj edilebilmesidir. Tahrik sistemleri hibrit araçlardaki tahrik sistemleriyle neredeyse aynıdır. Ancak PHEA'lar daha büyük bir bataryaya sahip olduğu için enerjinin yeterli olduğu durumlarda sadece elektrik modunda kullanılabilmektedirler.



Şekil 2.6 : PHEA temel bileşenleri

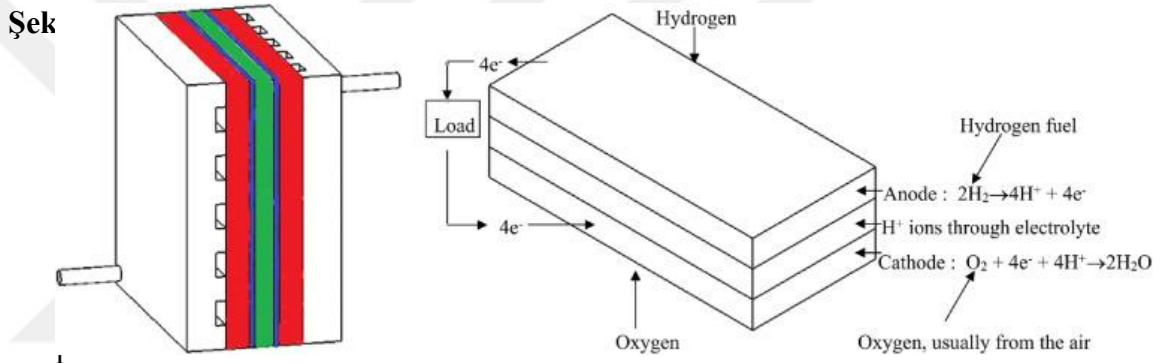
## 2.3 Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

Yakıt pili, hidrojeni yakıt olarak kullanarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlardır [43]. Fiziksel yapı olarak anot ve katot tabakası arasında bir

elektrolit malzeme yerleştirilmesi ile oluşturulurlar. Kullanılan elektrolit türü ve çalışma sıcaklığına göre yaygın kullanılan yakıt pilleri aşağıda sıralanmıştır:

- Proton Değişim Zarı Yakıt Hücresi (PEMFC), ~80 °C
- Alkali Yakıt Hücresi (AFC), ~100 °C
- Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC), ~200 °C
- Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi, ~650 °C
- Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC), ~650–1000 °C
- Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC), ~80 °C.

Yakıt pillerin temel fiziksel şeması Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Yakıt pillerin temel fiziksel şeması [44]

Elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere ilgi çeken yakıt pilleri PEMFC ve SOFC yakıt pilleridir.

Yakıt pilli elektrikli araçlar bataryalı elektrikli araçlarda olduğu gibi şarj işlemi gerektirmediğinden ve yakıt olarak hidrojen kullandığından gelecek vadeden bir teknoloji olarak görülmektedir.

## 2.4 Bataryalı Elektrikli Araçlar

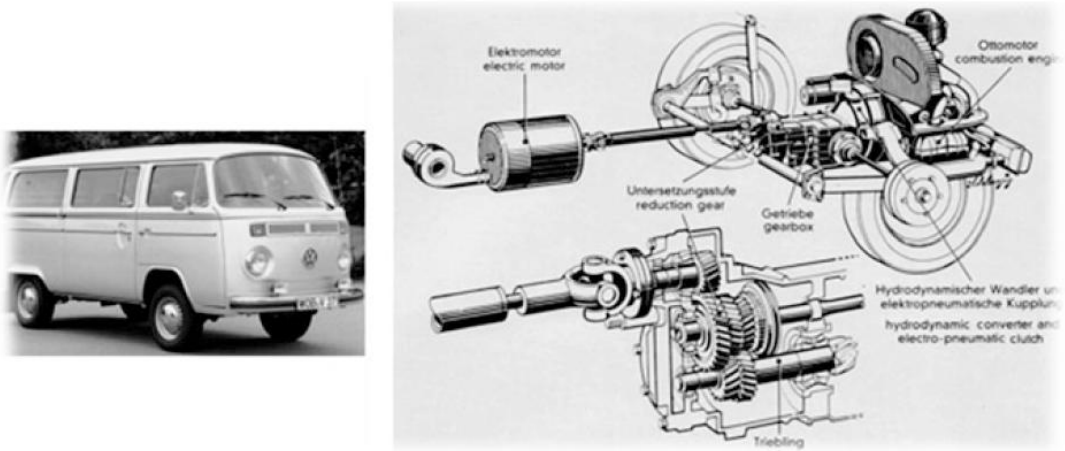
Tarihi yüz yıldan uzun bir süre öncesine dayanan elektrikli araçların ilk üreticisi belirsiz olsa da 1898 yılında Ferdinand Porsche’nin tasarladığı elektrikli araba resmi olarak Egger-Lohner EV adıyla biliniyordu. Bu araç tekerleklerin göbeğinde bulunan elektrik motorlarıyla doğrudan tahrik ediliyordu. Dönemin batarya teknolojisi uzun menzil sağlamak için yeterli olmadığı için, batarya boyutu küçültülüp araca iki adet

benzinli generatör eklenerek motorların enerjisi batarya ve generatörlerden sağlanmış oldu. Bu tasarım (Şekil 2.8) ile ilk hibrit elektrikli araç üretilmiş oldu [45].



**Şekil 2.8 :** Ferdinand Porsche'nin tasarladığı ilk hibrit elektrikli araç (1901) [45].

1920'li yıllarda akaryakıtta erişimin kolay olması ve elektrikli araçların menzillerinin düşük olması nedeniyle elektrikli araçlara olan ilgi azalmıştı. İkinci dünya savaşı yıllarına gelindiğinde yakıt kıtlığı nedeniyle elektrikli araç fikri tekrar gündeme gelse de elektrikli araçlar yine yeterli ilgi toplayamamıştır. 1977 yılında Volkswagen'in tanıttığı minivan aracı (Şekil 2.9) elektrik tahrik sistemine sahipti ancak menzil probleminin önüne geçmek için hibrit tahrik sistemi çözümünü sunuyordu.



**Şekil 2.9 :** 1977 yılında Volkswagen'in tanıttığı minivan

80'li yıllardan sonra elektrik ve hibrit tahrik sistemine sahip araç tanıtımları ve üretimleri ivme kazanmaya başlamıştır. 1990 yılında General Motor EV1 adında bir elektrikli araç tanıttı. 2011 yılında Mitsubishi MiEV 10000 adet satan ilk elektrikli araç olmuştur. Nissan Leaf birkaç ay sonra bu sayıyı geçerek en çok satan elektrikli araç ünvanını kazanmıştır. Günümüzde elektrikli araç girişimlerinin yanı sıra neredeyse bütün araç üreticileri kendi elektrikli araç modelleri üretip satmaktadır. Amerika'da Tesla, Çin'de BYD gibi firmalar büyük yatırımlarla elektrikli araç sektörüne yön vermiş ve dünya genelindeki satışlarda milyon adetlere ulaşmışlardır.

## **2.5 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar**

Elektrikli araçların tarihi boyunca menzil sorunu elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden birisi olmuştur. Araştırmacılar sürekli yeni batarya teknolojileri üzerinde çalışarak elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlarla rekabet edebilmesi için gerekli enerjiyi sağlayacak batarya teknolojisini keşfetmeye çalışmıştır. Günümüz elektrikli araçlarında lityum bazlı bataryalar kullanılmaktadır. Lityum batarya teknolojisinden önce elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar kurşun asit bataryalar ve nikel bazlı bataryalardır [46].

### **2.5.1 Kurşun-Asit Bataryalar**

Kurşun-Asit bataryalar güvenilirlik ve düşük maliyetlerinden dolayı bir asırdan daha fazla bir süredir kullanılmaktadır [47]. En yaygın kullanım alanı marş aküsü olsa da elektrikli araçlarda ana tahrik elemanlarını besleyen batarya olarak da kullanılmıştır [47]. Elektrikli araçlar yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip bataryalara ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel kurşun asit bataryalar düşük ve yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklı olmasıyla iyi bir adayken düşük enerji yoğunluğundan dolayı uzun menzil sağlayamamaktadır. Valf düzenlemeli kurşun asit bataryalarda spesifik güç ve enerji değerleri geliştirilmiştir ancak yine de günümüz lityum iyon batarya teknolojisi ile karşılaştırıldığında geri planda kalmaktadırlar [48].

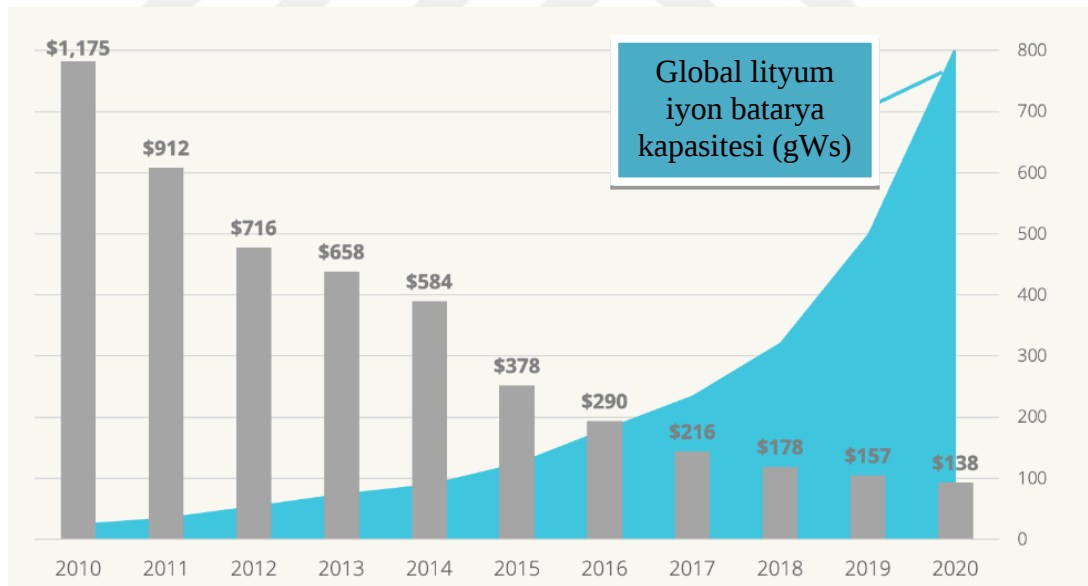
### **2.5.2 Nikel bazlı bataryalar**

Nikel bazlı piller katot malzemesi olarak nikel oksihidroksit kullanılmaktadırlar. Nikel-demir (NiFe), nikel kadmiyum (NiCd), nikel-çinko (NiZn), nikel metal hidrit (Ni-MH) ve nikel hidrojen (Ni-H<sub>2</sub>) gibi bataryalar nikel hidroksit kullanılarak

türetilmiştir. Ni-Zn piller bu ailenin en yüksek hücre gerilim seviyesine sahip ve yüksek enerji yoğunluğu sunan üyesi olmasına rağmen, çinkonun çözeltide kısmi olarak çözünmesinden dolayı düşük bir çevrim ömrüne sahiptir. Ticarileşerek elektrikli araçlarda kullanılan nikel bazlı batarya Ni-MH bataryalardır. Bu bataryalar kurşun asit bataryalardan nispeten daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve günümüzde Honda ve Toyota'nın bazı araçlarında kullanılmaktadır [49].

### 2.5.3 Lityum Bazlı Bataryalar

İlk lityum bazlı batarya denemeleri 1912 yılına dayanmaktadır [50]. Lityum bazlı bataryalar yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olmalarından dolayı batarya teknolojisinde yeni bir çağ başlatmıştır. Kurşun asit bataryalar ve nikel bazlı bataryaların yerini lityum bazlı bataryalar almıştır, özellikle uzun menzil sağlamaları nedeniyle lityum bazlı bataryalar elektrikli araçların gelişmesine büyük katkı sağlamıştır [51]. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi Lityum iyon bataryaların üretim kapasitesi arttıkça maliyetler düşmektedir. Bu durum lityum iyon bataryaların uygulanabilirliğini ve ulaşılabilirliğini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 2.10 : Lityum iyon bataryaların yıllara göre kapasite ve fiyat değişimi [125]

#### 2.5.3.1 Lityum-Metal Bataryalar

1970'li yıllarda Lityum metal piller üzerine yapılan çalışmalarda pillerin gösterdiği performans ile birlikte Lityum bazlı piller araştırmacıların ilgisini çekmiştir [50,52]. Bu piller nikel bazlı ve kurşun asit piller ile karşılaştırıldığında çok daha düşük ağırlıkla yüksek enerji ve güç sağlamışlardır. Ayrıca 3.04V hücre gerilimi,

3860mAh/g kapasite değeri ile devrim niteliğinde bir gelişme olmuştur. Bu gelişmeler ile beraber lityum metal piller için farklı katot malzemeleri denenmiş ve lityum sülfür, lityum-oksijen, katı hal piller gibi lityum metal pil temelinde farklı pil teknolojileri türemiştir [53,54].

### **2.5.3.2 Lityum İyon Bataryalar**

1980 yılında lityum iyon bataryalar (LİB) ile birlikte güç bataryaları için yeni bir dönem başlamıştır. Lityum iyon pillerin ilk nesilleri anot malzeme olarak  $\text{LiCoO}_2$ 'ye, katot malzeme olarak petrol kokuna dayanmaktadır [55]. İkinci ve üçüncü nesil LİB anot malzemesinin grafit ile değiştirilmesi ve elektrolit kullanılması ile bu pillerin enerji yoğunluğu yükselmiştir [56]. Son teknoloji LİB anot malzeme olarak grafit kullanmaya devam ederken, elektrolit olarak yüksek enerji yoğunluğu ve düşük maliyetleri nedeni ile nikel kobalt mangan (NMC) oksitler kullanılmaktadır. Bu pillerin enerji yoğunluğunun daha da artırılması için nikel oranı %80'in üzerine çıkarılırken grafit negatif elektroda Silikon eklenebilmektedir [46]. Ancak düşük enerji yoğunluklarına rağmen  $\text{LiFePO}_4$  piller daha güvenli olmaları, yüksek çevrim ömrü ve düşük maliyetleri nedeniyle elektrikli araç sektöründe daha çok tercih edilmektedirler [57].

1990-2008 yılları arasında lityum iyon pillerin spesifik enerjisi 98 Wh/kg seviyelerinden 195 Wh/kg seviyesine yükselmiştir [58]. Günümüzde lityum titanat (LTO) bataryalar alternatif bir batarya türü olarak değerlendirilmektedir. Özellikle hızlı şarj teknolojisinin gerekli olduğu koşullarda LTO batarya kimyası tercih edilebilmektedir [59,60].

### **2.5.4 Diğer Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Batarya Araştırmaları**

Lityum iyon bataryaların özgül enerjisi ve enerji yoğunluğu belli bir sınıra kadar yükselebileceğinden dolayı son yıllarda yeni nesil batarya teknolojileri araştırılmaktadır.

#### **2.5.4.1 Metal-Hava Pilleri**

Metal-hava pilleri metalik anot ve hava katot bileşiminden oluşurlar. Özgül enerjileri ve enerji yoğunlukları sırasıyla 600 Wh/kg ve 400 Wh/L değerlerine ulaşırken enerji kapasiteleri anot kapasitesi ve işleme prosedürü ile sınırlı olmaktadır. Metal-Hava pilleri Lityum-Hava pillerinin yanı sıra, Çinko, Alüminyum, Magnezyum, Demir gibi

metaller yaygın olarak metal hava pillerinde kullanılmaktadır [61]. Metal-hava pilleri şarj edilebilir pil olarak üretilmektedir ancak yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluklarına rağmen düşük özgül güç değerine sahiptirler. Ayrıca alkali elektrolitlerinde karbonatlaşma görülmesi bu pillerin en büyük dezavantajlarından [62,63]. Çinko-hava pilleri gelecek vadetmektedir ancak henüz tam olarak ticarileşmemiştir [64].

#### **2.5.4.2 Sodyum-Beta Piller**

Sodyum-Beta piller yükek enerji yoğunluğuna sahip pillerdir ancak bu ailenin sadece iki türü araştırmacıların ilgisini çekmeyi başarmıştır. Bunlar Sodyum-metal klorid ( $\text{Na/MCl}_2$ ) ve Sodyum-Kükürt ( $\text{Na/S}$ ) bataryalardır. Bu bataryalar 270 °C'den 350 °C'ye kadar yüksek bir sıcaklık aralığında çalışmayı gerektirirler [65-67].

Yeni nesil batarya teknolojileri sadece bunlarla sınırlı değildir. Sodyum-iyon, Çinko-iyon, Magnezyum-iyon gibi birçok batarya kimyası araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır [68-70].

### 3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

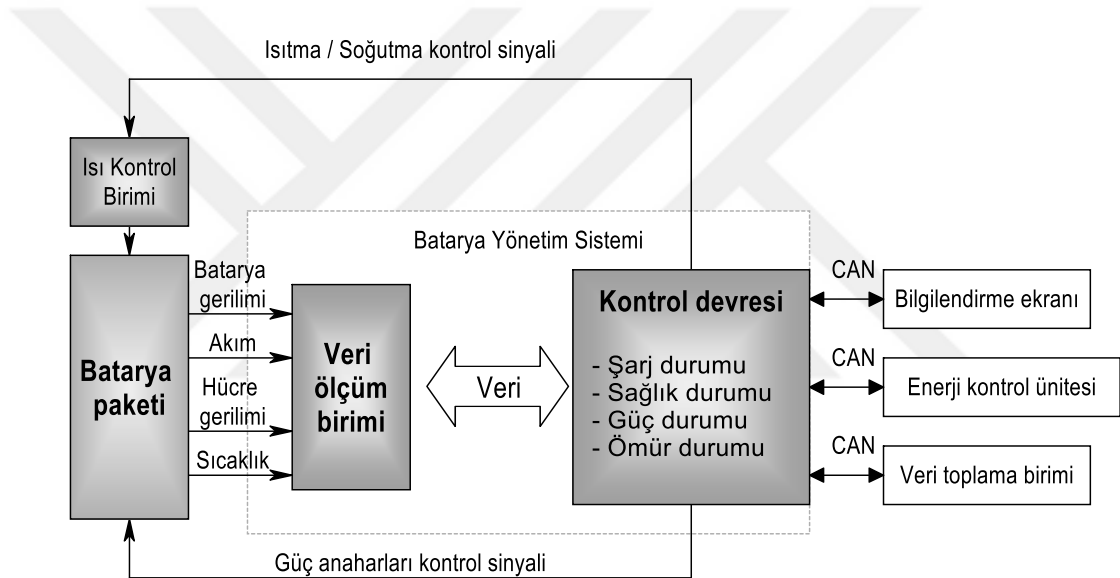
Önceki bölümlerde günümüzde ticarileşen ve araştırma sürecinde olan batarya teknolojilerinin farklı özelliklerine değinilmiştir. Dikkat çekici noktalardan bir tanesi her bir batarya türünün verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için belirli koşullar altında çalışması gerekmektedir. Bu koşullara sıcaklık aralığı, gerilim aralığı ve akım sınırı gibi kısıtlamalar örnek verilebilir.

Aşırı akım, aşırı gerilim veya aşırı şarj / deşarj gibi işlemler bataryalar için önemli güvenlik sorunlarına neden olmakta, yaşlanma sürecini belirgin şekilde hızlandırmakta, yangına veya patlamaya neden olabilmektedir [71]. Yüzlerce hücreden meydana gelen batarya paketinin elektrikli araç içerisinde güvenli ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için, iyi bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya yönetim sisteminin gerçekleştirdiği işlevler Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Batarya yönetim sistemi işlevleri

Batarya yönetim sistemi Şekil 3.1'deki işlevleri yerine getirmek için belli bir düzene göre çalışmaktadır. Şekil 3.2'de verilen prensip şemaya göre, bataryanın akım, gerilim, sıcaklık ve hücre gerilim değerleri veri toplama biriminde ölçülerek saklanmaktadır. Sonrasında kontrol devresi veri ölçüm biriminden gerekli verileri toplamakta ve kontrol algoritmasını çalıştırmaktadır. Veriler işlendikten sonra aracın bilgilendirme ekranına, enerji kontrol ünitesine ve veri toplama birimine bilgi gönderilmektedir. Bataryanın sıcaklık durumuna göre kontrol devresinden batarya sıcaklık kontrol birimine ısıtma / soğutma kontrol sinyali gönderilmektedir. Böylelikle, bataryanın sıcaklığı optimum değerde tutulmaya çalışılmaktadır. Ayrıca kontrol devresi bataryadaki enerji akışını kontrol etmek amacıyla batarya girişinde bulunan güç anahtarlarına tetikleme sinyali göndermektedir.



**Şekil 3.2 : Batarya yönetim sistemi prensip şeması**

### 3.1.1 Batarya Hücrelerinin İzlenmesi

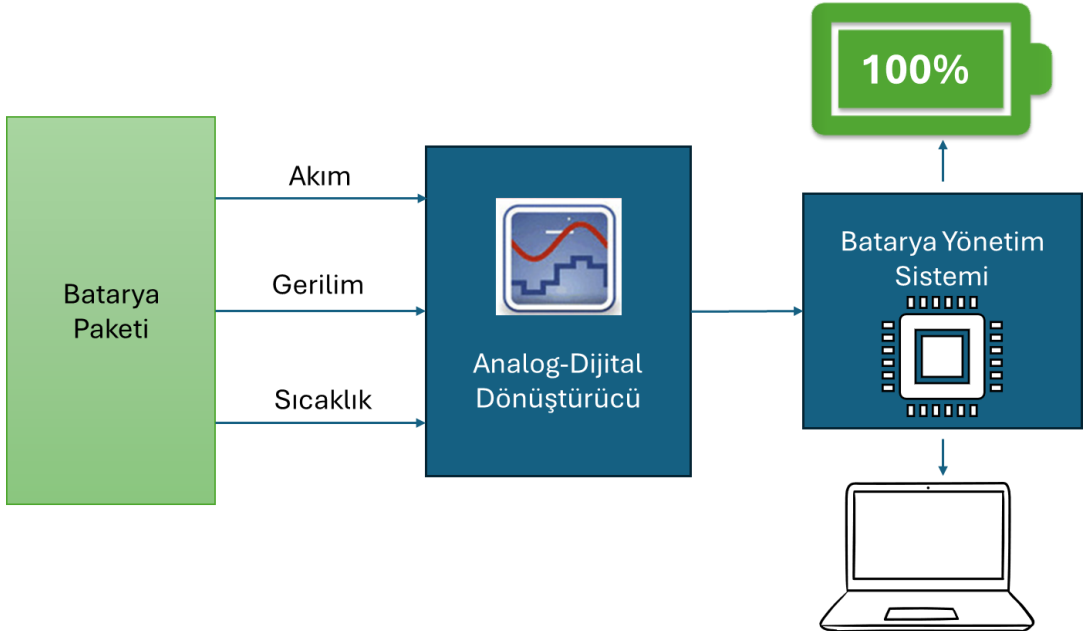
Batarya paketi içerisinde bulunan hücreler gerek üretim toleransları gerekse batarya paketi içerisindeki konumları sebebiyle birbirinden farklı davranışlar gösterebilmekte, hücreler arası gerilim, şarj doluluk oranı, sıcaklık farklılıkları oluşmaktadır. Bu sebeple hücrelerin akım, gerilim, sıcaklık ve şarj doluluk oranı dengesizlikleri izlenmelidir [72,73]. İzleme sonucunda elde edilen veriler yönetim sisteminde kullanılarak;

- Batarya performansı arttırılmakta,
- Güvenli şartlarda çalışma sağlanmakta,

- Hücreler dengelenmekte,
- Şarj-deşarj kontrolü yapılmakta,
- Aşırı şarj/deşarj durumlarına karşı korunma sağlanmaktadır [72,73].

### 3.1.2 Giriş-Çıkış akımı ve Geriliminin İzlenmesi

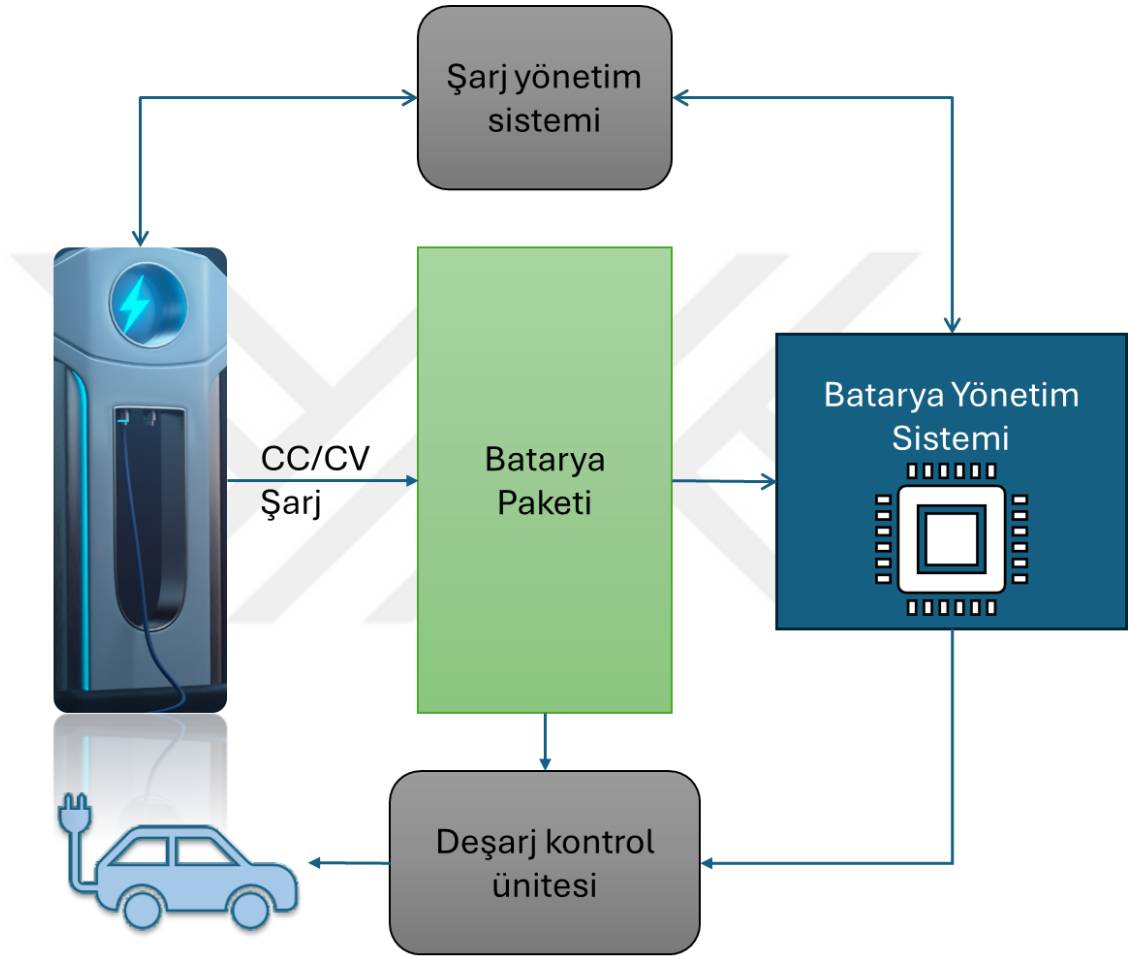
Li-ion bataryalar sabit akım ve gerilim değeri altında şarj edilmelidir. Akım ve gerilim değerlerindeki anormal değişimler batarya üzerinde risk oluşturmaktadır. Bu sebeple batarya gerilim ve akım değerlerinin sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Akım ve gerilim değerlerinin anlık olarak kaydedilmesi, batarya yönetim sisteminin bir sonraki adımda vereceği kararda yardımcı olur ve sistemin daha verimli çalışmasını sağlar [73]. Özellikle bataryanın şarj durumu, sağlık durumu ve ömür tahmininin doğru yapılabilmesi için akım ve gerilim değerlerinin doğru ölçülmesi oldukça önemlidir [25]. Şekilde görüldüğü gibi yüksek doğruluk oranına sahip akım ve gerilim sensörleri ile ölçülen analog ölçümler bir ADC dönüştürücü yardımı ile dijital bir değere dönüştürülerek bir mikroişlemciye aktarılır. Daha sonra bu veriler SoC, SoH, RUL gibi tahminlerin yapılması için ya da olağanüstü bir durumda sistemi korumak için kullanılır. Şekil 3.3'te giriş-çıkış verilerinin izlenmesi işlevi prensip şeması gösterilmiştir.



**Şekil 3.3 : Giriş-Çıkış verilerinin izlenmesi**

### 3.1.3 Şarj-Deşarj Kontrolü

Li-ion bataryaların performansı ve ömrünü şarj/deşarj döngü sayısı etkilemektedir. Uygun şarj-deşarj, bataryanın ömrünü uzatmakta ve verimliliğini arttırmaktadır [74]. Li-ion bataryaların şarj esnasında sabit akım ve sabit gerilim kontrolü ile şarj edilmesi önerilmektedir [73]. Elektrikli araçlarda şarj-deşarj kontrolünün yapılmasını sağlayan sistemin prensip şeması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

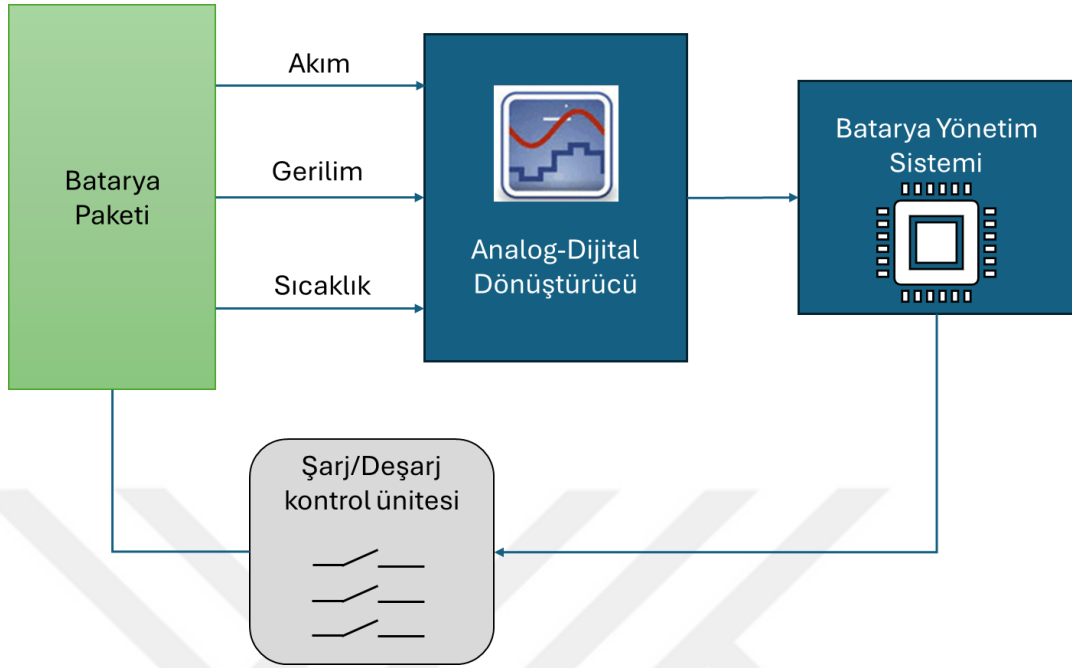


Şekil 3.4 : Elektrikli araç şarj deşarj sistemi prensip şeması

### 3.1.4 Batarya koruması

Batarya paketleri ve modülleri hücrelerden meydana geldiği için hücrelerin sürekli şarj deşarj edilmesinden dolayı şarj oranının dengesiz olması beklenen bir olaydır. Bu durum batarya performansını önemli ölçüde düşürmektedir. Aşırı şarj bataryanın patlamasına sebep olurken, aşırı deşarj ise bataryanın kimyasal yapısının bozulmasına ve batarya ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Batarya, ideal çalışma koşulları dışına çıktığı zaman BYS bataryayı korumaya alarak bataryanın güvenli sınırlar arasında çalışmasını sağlamaktadır [75]. BYS tarafından aşırı akım,

aşırı gerilim, düşük gerilim, aşırı sıcaklık gibi anormal durumlar algılandığı zaman koruma elemanları tetiklenerek bataryanın ve sistemin korunması sağlanır.



Şekil 3.5 : Batarya koruması prensip şeması

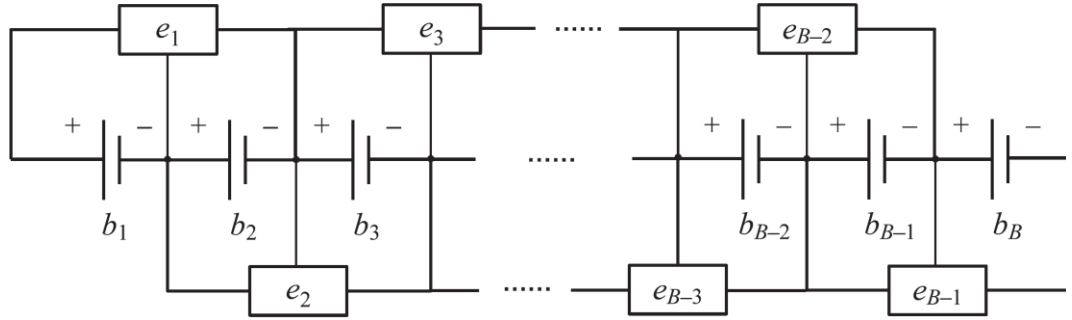
### 3.1.5 Hücrelerin dengelenmesi ve Eşitlenmesi

Batarya hücre dengeleme sistemi, hem bataryanın verimli bir şekilde kullanılabilmesi hem de batarya güvenliği için önemli bir unsurdur. Elektrikli aracın verimli bir şekilde beslenmesi ve bataryanın performansının artırılması için hücrelerin dengelenmesi gerekmektedir. Hücre izleme devreleri hücrelerin şarj doluluk oranını, akımını ve sıcaklığını sürekli olarak izlemektedir. Bu izleme sonucunda alınan verilerden yararlanılarak, hücrelerin doluluk oranı belirlenmektedir. Hücre doluluk oranlarına göre; hücreler, modüller ve paketler arasında şarj dengesi sağlanmaktadır. Hücrelerin dengelenmesi konusunda farklı yöntemler önerilmiştir.

Hücre dengeleme sistemlerinde aktif ve pasif dengeleme olmak üzere iki çeşit dengeleme sistemi mevcuttur. Pasif dengelemede, doluluk oranı yüksek olan hücrenin enerjisi rezistif bir yük üzerinden harcanarak, doluluk oranı düşük olan hücrenin seviyesine indirilmektedir. Buna karşılık aktif dengelemede ise, sistemdeki her bir hücre ayrı ayrı ölçülerek, kontrol devresi ile dengeleme sağlanmaktadır [76].

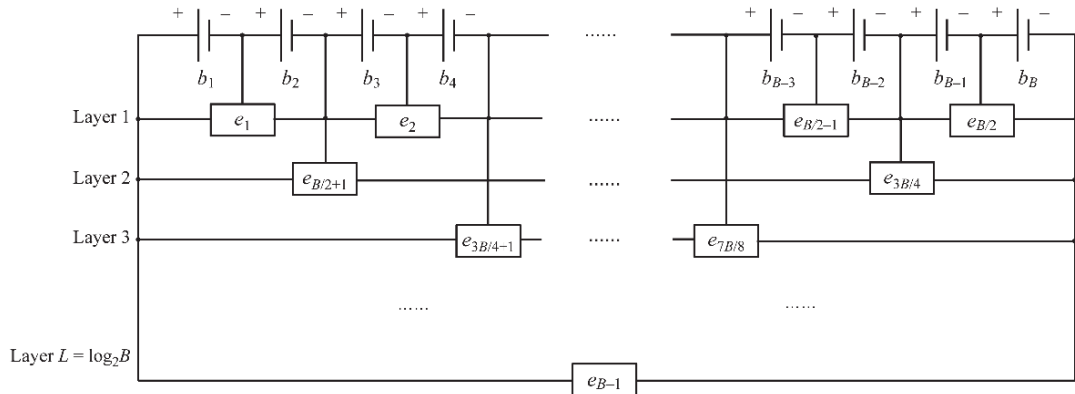
Şekil 3.6’da önerilen sisteme göre birbirine seri bağlı hücreler kendi arasında şarj-deşarj edilerek dengeleme sağlanmaktadır. Bu yöntemde artarda gelen her iki hücre için bir kontrolör kullanılmaktadır. Bir elektrikli araç bataryasının onlarca belki

yüzlerce hücreden oluştuğu düşünülürse hem uygulanabilirlik hem de maliyet açısından bu yöntemin sınırlılıkları bulunmaktadır [77] .



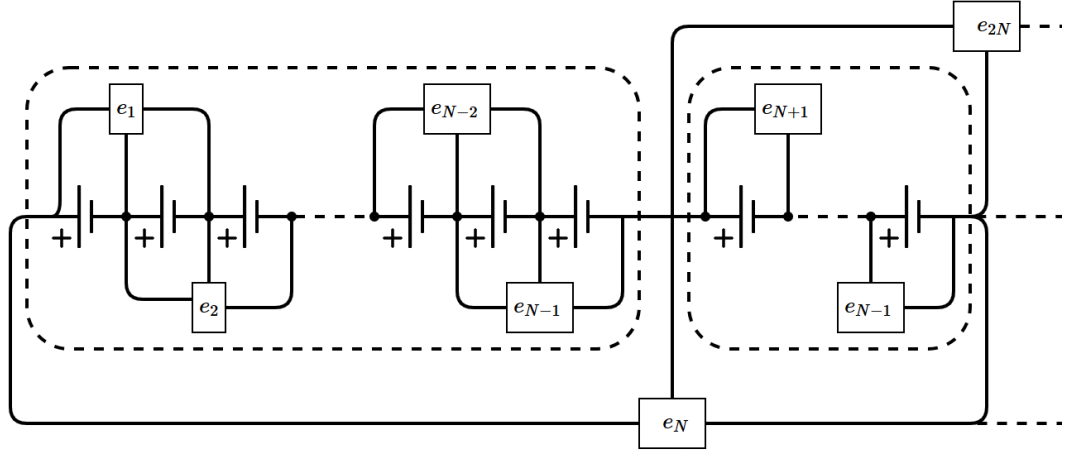
**Şekil 3.6 :** Seri dengeleme yöntemi [77].

Şekil 3.7’de önerilen yöntemde seri dengelemeden farklı olarak hücreler ikişerli gruplara ayrılmıştır. İkişer ikişer dengelenen hücreler bir üst katmanda ikişerli gruplar kendi arasında dengelenmektedir. Bütün paket dengelenene kadar en üst katmana doğru gidilir. Seri dengelemeye göre daha hızlı olmasına rağmen kontrolör sayısının fazla olmasından dolayı yine uygulanabilirliği düşüktür [77].



**Şekil 3.7 :** Katmanlı dengeleme yöntemi [77].

Modüler dengeleme sisteminde hücreler bir araya getirilerek modüller oluşturulmaktadır. Her bir modül içindeki hücreler, seri dengeleme yöntemiyle dengelendikten sonra modüller de kendi aralarında seri dengeleme yöntemiyle dengelenmektedir (Şekil 3.8). Bu yöntem hızlı bir yöntem olmakla birlikte kontrolör sayısından dolayı maliyeti yüksektir [77].

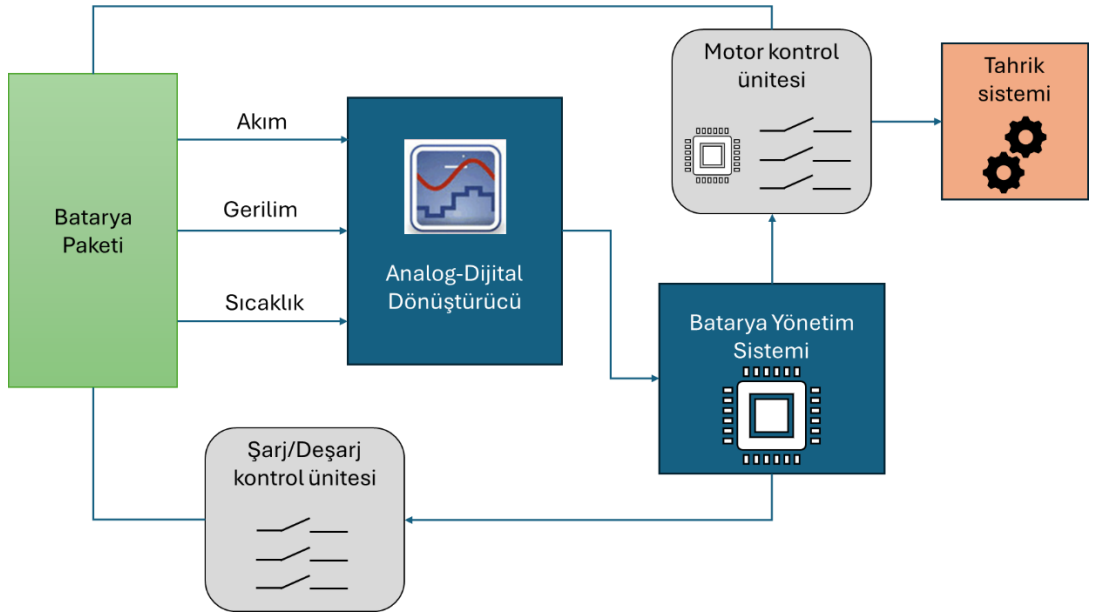


Şekil 3.8 : Modüler dengeleme sistemi [77].

### 3.1.6 Güç yönetimi kontrolü

Elektrikli araçtaki tahrik sistemi ve bütün elektronik aksamalar bataryadan beslenmektedir. Elektrikli araçtaki elektronik aksam sayısı dikkate alındığı zaman bütün sistemin şarj doluluk oranı ve batarya sağlık durumu üzerinde büyük etkisi vardır. Çünkü birçok koldan batarya ile sürekli bir enerji alışverişi olacaktır. Batarya ömrünü arttırmak, sistem performansını arttırmak ve güvenli bir sürüş için iyi optimize edilmiş bir güç yönetimine ihtiyaç duyulmaktadır [78]

BYS bataryadan aldığı veriler ve aracın güç talebini dikkate alarak tahrik sistemini kontrol eder. Beklenmeyen durumlarda tahrik sistemini devreden çıkarır ve sistemi koruma altına alır. Şekil 3.9’da güç yönetimi prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Güç yönetimi prensip şeması

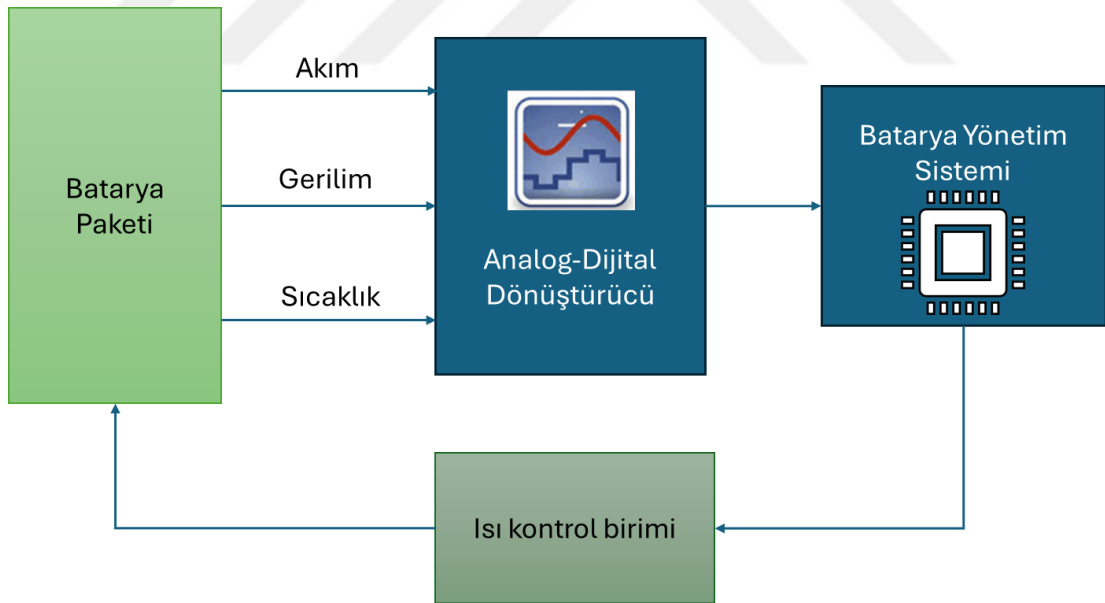
### 3.1.7 Çalışma sıcaklığı kontrolü

Li-ion bataryaların gerekli çalışma sıcaklığının (15 °C – 45 °C) dışına çıkmaması için bataryanın sıcaklık kontrolü yapılmaktadır. Sıcaklık değeri ideal değerlerin üzerine çıktığında soğutma sistemi devreye girmekte ve batarya korunmaktadır. Ortam soğuduğu zaman ise ortam ısıtılarak bataryanın uygun sıcaklık değerleri arasında çalışması sağlanmaktadır [73].

### 3.1.8 Isı Yönetimi

Li-ion bataryalar eşit dağılmış sıcaklık koşullarında daha verimli çalışmaktadırlar. Bu yüzden batarya paketleri ısıtma ve soğutma sistemleri ile donatılmaktadırlar. Ortam sıcaklığının eşit bir şekilde dağılması için ısı yönetimi fonksiyonu, çalışma sıcaklığı kontrolü ile birlikte ihtiyaca göre ısıtma veya soğutma sistemini devreye alır [79].

Şekil 3.10'da ısı yönetimi fonksiyonunun prensip şeması gösterilmiştir. Burada ısı yönetim birimi batarya yönetim sisteminden aldığı bilgiye göre batarya paketindeki ısıtma/soğutma sistemini devreye almaktadır.



Şekil 3.10 : Isı yönetimi prensip şeması

### 3.1.9 Ağ ve haberleşme

Elektrikli araç sistemi ve ağlar arası sistem arasında haberleşmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrikli araç performansını optimize etmek, batarya durumunu online izlemek, BYS'yi modifiye etmek ve güncellemeler yapmak için haberleşme

biriminde gerekli işlemler yapılmaktadır. Ayrıca sürüş menziline tahmin edilmesi, şarj istasyonlarının GPS yardımıyla bulunup sürücüye komut verilmesi gibi yöntemlerin gerçekleşmesi için batarya SoC ve SoH değerlerinin haberleşme aracılığıyla online izlenmesi gerekmektedir [79].

Batarya yönetim sistemi kendi bünyesindeki fonksiyonları yerine getirmek ve çevre birimleri ile haberleşmek, veri toplamak için SPI, I2C, UART gibi haberleşme protokollerini kullanırken aracın diğer birimleri ile haberleşmek için genelde CAN haberleşme protokolü kullanılmaktadır.

### **3.1.10 Veri depolama**

BYS'de batarya şarj doluluk oranı, sağlık durumu, sıcaklık durumu ve sensör verilerinin kayıt altına alınması gerekmektedir. Çünkü bu veriler işlenerek batarya durumu izlenmekte, batarya hücreleri dengelenmekte, sıcaklık kontrolü yapılmakta ve meydana gelen hatalar düzeltilmektedir [79].

Veri depolama için hard disk, EEPROM ve bulut tabanlı depolama sistemleri kullanılabilir. EEPROM elektronik kart üzerinde kullanıldığı için genellikle BYS için kritik öneme sahip olan bilgileri depolamaktadır. Hard disk ve bulut tabanlı yöntemler genellikle arıza tespiti amaçlı veri depolamak için kullanılmaktadır.

### **3.1.11 Veri toplama**

Batarya yönetim sisteminde kullanılan veriler çeşitli sensörlerle ölçülerek ya da bir mikro işlemcide hesaplanarak, CAN, SPI, RS485 gibi haberleşme araçları yardımı ile toplanır. Toplanan veriler çeşitli algoritmalarla işlenmek üzere BYS'nin ilgili birimlerinde kullanılmaktadır [80].

BYS toplanan verilerin doğruluğu oranında doğru karar verebilmektedir. Toplanan verilerin doğruluğundan emin olmak için sensörler ve kullanılan haberleşme protokolleri özenle seçilmelidir.

### **3.1.12 Hata belirleme ve değerlendirme**

Li-ion Batarya depolama sisteminde aşırı şarj, düşük şarj, dengesizlik, düşük veya yüksek sıcaklık gibi problemlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Bunların yanı sıra batarya yönetim sisteminde veri toplama, programlama, elektriksel bağlantı hataları gibi hatalarla da karşılaşmaktadır. Bu hataları belirlemek, değerlendirmek ve ilgili

birime bildirmek için akıllı kontrol sistemleri ve çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [79].

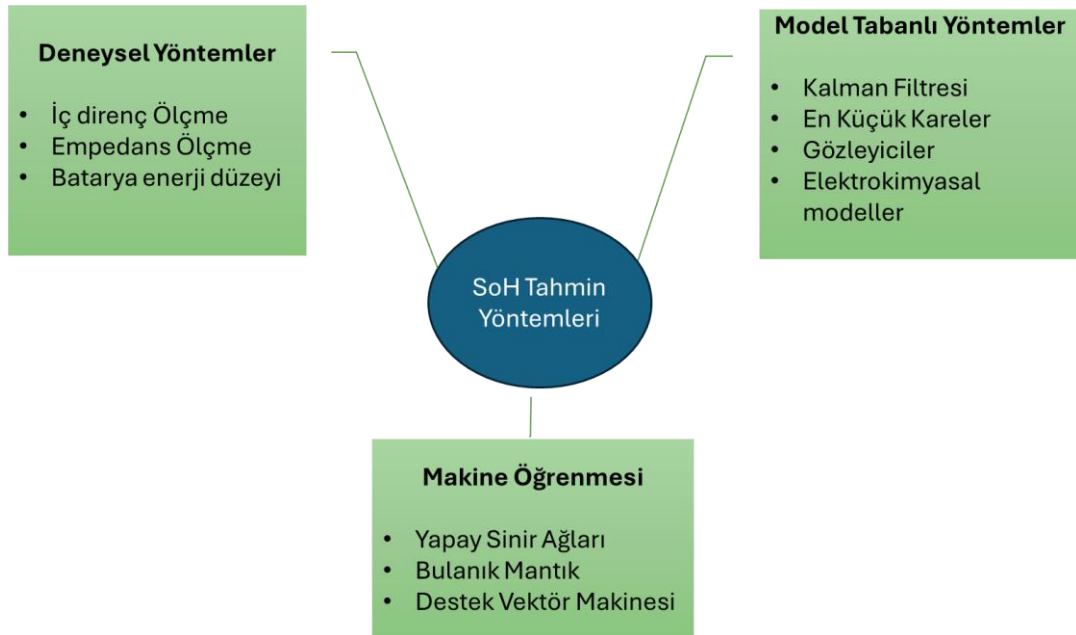
### 3.1.13 Batarya Sağlık Durumu Tahmini

Bataryanın bir süre şarj – deşarj edilmesinden sonra bataryanın kullanılabilir kapasitesi bir miktar düşer. Bu düşüş tahmininin çeşitli algoritmalarla yapılmasıyla elde edilen sonuç bataryanın sağlık durumunu ifade eder[81].

$$SoH(\%) = \frac{Q_c}{Q_n} \times 100 \quad 3.1$$

$$SoH(\%) = \frac{R_{EoL} - R}{R_{EoL} - R_{BoL}} \times 100 \quad 3.2$$

Batarya sağlık durumu denklem 3.1’de gösterildiği gibi batarya kapasitesi ile ya da denklem 3.2’de gösterildiği gibi iç direnç değeri ile hesaplanabilmektedir.  $Q_c$  güncel kapasite değerini,  $Q_n$  pilin ömrünün başındaki kapasite değerini,  $R_{EoL}$  pilin ömrünün sonundaki iç direnç değerini,  $R_{BoL}$  pilin ömrünün başındaki iç direnç değerini,  $R$  güncel iç direnç değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.11 : SoH tahmin Yöntemleri

Batarya iç direnç ya da kapasite değerinin hesaplanabilmesi için Şekil 3.11’de gösterildiği gibi literatürde birçok yöntem önerilmiştir.

#### 3.1.13.1 Deneysel Yöntemler

Deneysel batarya sağlık durumu tahmin yöntemleri genellikle laboratuvar ortamında yapılan ve zaman alan yöntemlerdir.

İç direnç, batarya sağlık durumu ve ömür tahmini için sıklıkla kullanılan parametredir. Batarya iç direncinin deneysel olarak ölçülebilmesi için bataryaya anlık bir akım uygulanmaktadır ve direnç değeri denklem 3.3’te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{bat} = \frac{V_{OCV} - V_{bat}}{I_a} \quad 3.3$$

Denklem 3.3’te  $R_{bat}$  batarya iç direncini,  $V_{OCV}$  açık devre gerilimini,  $V_{bat}$  bataryanın akım akarken ölçülen gerilim değerini, ve  $I_a$  anlık akım değerini ifade etmektedir [80].

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) batarya sağlık durumu tahmini için en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde bataryaya bir alternatif akım dalgası uygulanarak bataryanın gerilim cevabı ölçülmektedir. Böylece batarya empedansı hesaplanarak batarya sağlık durumu doğru bir şekilde tahmin edilmektedir [82].

Enerji kapasitesi batarya sağlık durumu hakkında bilgi veren bir diğer deneysel parametredir. Bataryanın ömrünün başındaki enerji kapasitesi ile güncel kapasitesi karşılaştırılarak batarya sağlık durumu hakkında fikir sahibi olunabilir [83].

#### 3.1.13.2 Model Tabanlı Batarya Sağlık Durumu Tahmin Yöntemleri

Model tabanlı batarya sağlık durumu tahmin algoritmaları, pillerin deneysel verilerine ve gerçek zamanlı verilere göre batarya model parametrelerini güncelleyerek daha doğru bir sağlık durumu tahmini yapmayı hedeflerler [84].

Ampirik modeller batarya kapasite azalması ve iç direnç değişimi verilerini kullanarak batarya davranışını modellerler. Bu modeller basit matematiksel

denklemler ile kuruldukları için uygulaması kolaydır ancak karmaşık çevre şartlarından etkilendikleri için doğruluk oranları düşüktür [85].

Batarya eşdeğer devre modeli, direnç, kondansatör ve gerilim kaynağı gibi devre elemanlarını kullanarak batarya davranışını elektriksel olarak modeller. Kalman filtresi tabanlı algoritmalar eşdeğer devre modeli ile birlikte kullanılarak gerçek zamanlı batarya sağlık durumu tahmin algoritmaları oluşturulmaktadır. Bu algoritmaların doğruluk oranları ampirik modellerden daha yüksek olmaktadır ancak model tabanlı yöntemler daha gelişmiş kontrol kartlarına ihtiyaç duymaktadırlar [86].

Elektrokimyasal model, bataryanın kimyasal ve fiziksel davranışını modellediği için doğruluk oranı en yüksek modeldir. Kimyasal ve fiziksel davranışın yansıtılması için birçok parametrenin göz önünde bulundurulması ve hesaplanması gerekmektedir [87]. Bu karmaşık hesapların yapılması yüksek güçlü denetleyiciler ve kontrol kartları gerektirdiği için bu yöntemin gerçek zamanlı uygulanması oldukça zordur [88].

### **3.1.13.3 Veriye Dayalı Yöntemler**

Veriye dayalı batarya sağlık durumu tahmin yöntemlerinde, diğer yöntemlerden farklı olarak herhangi bir elektriksel, kimyasal ya da fiziksel batarya parametresi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde batarya verilerinin sağlık durumu ile ilgili ilişkisi araştırılarak toplanan verilerden bataryanın sağlık durumu tahmin edilmektedir.

Geleneksel veriye dayalı tahmin yöntemleri Ampirik formüller, Gaussian Süreci Regresyonu ve Destek Vektör Makinesi gibi yöntemleri içermektedir.

Ampirik formüllerle oluşturulan veriye dayalı tahmin yönteminde bataryanın yaşlanma davranışı gerilim gibi bilgilerle eşleştirilerek bir eğri elde edilmeye çalışılır. Genellikle eğri uydurma teknikleri ve matematiksel denklemler kullanılarak bu işlem yapılır [85].

Destek vektör makinesi, bir makine öğrenmesi yöntemidir ve bu yöntemle doğrusal olmayan sistemler modellenmektedir. Lityum iyon bataryaların da doğrusal olmayan karmaşık bir yapısı olduğu için bu yöntem batarya sağlık durumu tahmininde başarılı sonuçlar vermektedir.

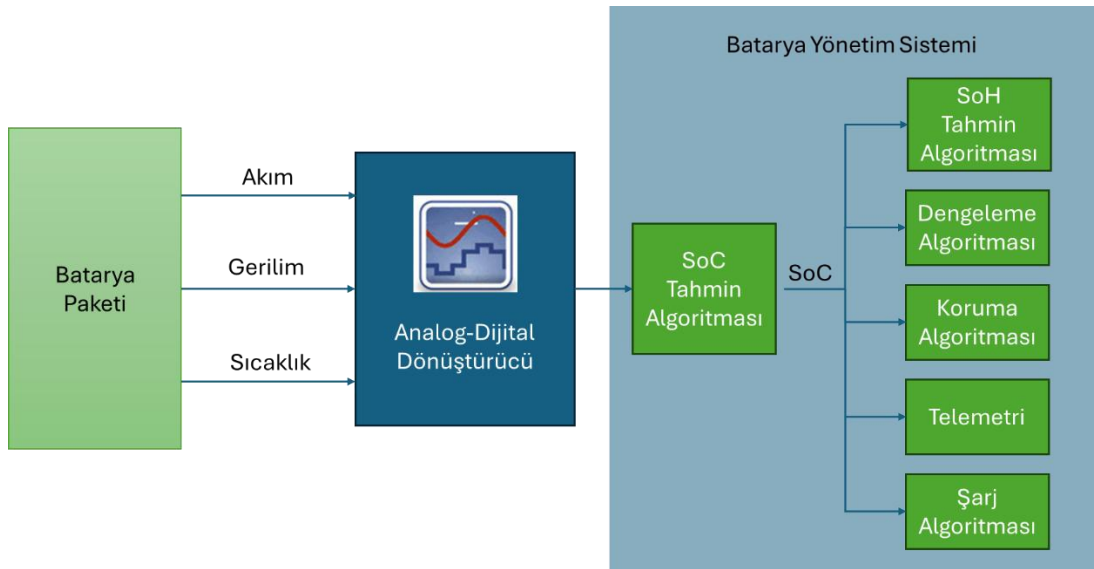
Artımsal kapasite eğrisi, batarya sağlık durumu hakkında bilgi veren ve destek vektör makinesi yönteminde kullanılan bir eğridir. Bu eğri ampirik mod ayrıştırma

işleminde geçirilerek gürültüden arındırılır ve eğri üzerinde dört nokta belirlenir. Bunlar, eğrinin tepe noktasına karşılık gelen gerilim değeri, tepe değeri, tepe değerin %80'ine ve %50'sine karşılık gelen gerilim değerleridir. Bu verilerle birlikte sıcaklık, akım değeri gibi verilerin yaşlanma üzerindeki etkisi analiz edilerek bataryanın sağlık durumu tahmin edilmektedir.

Gaussian işlem regresyonu, destek vektör makinesi yöntemine benzer şekilde doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi için kullanılmaktadır. Batarya sağlık durumu tahmini için doğruluk oranını artırmak amacı ile genellikle en küçük kareler yöntemi ile birlikte kullanılmaktadır.

### 3.1.14 Batarya Şarj Durumu Tahmini

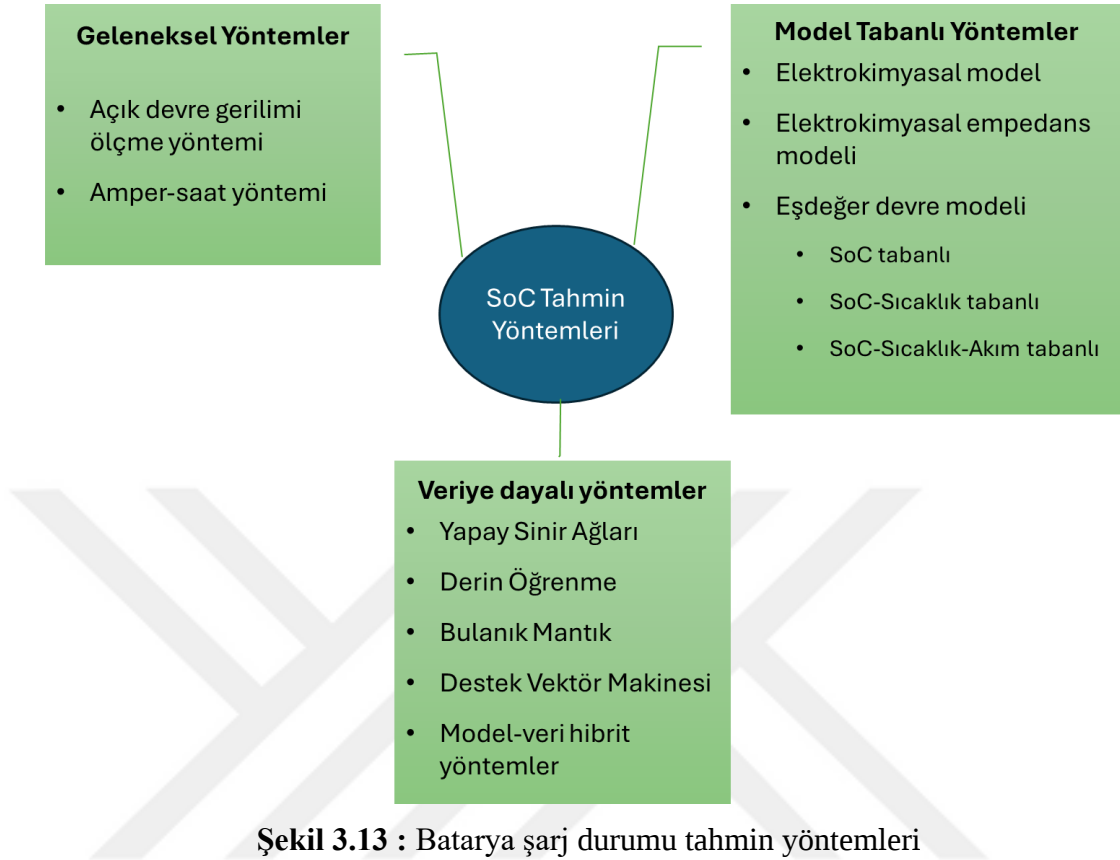
Batarya şarj durumu, bataryada kalan enerji miktarı oranını tanımlamaktadır. Şarj durumu verisi(state-of-charge(SoC)), sürücü bilgilendirme ekranında, aracın güç kontrol merkezinde ve batarya yönetim sisteminin diğer birimlerinde ihtiyaç duyulan önemli bir veridir. Dolayısıyla şarj doluluk oranı verisi doğru bir şekilde tahmin edilmezse sadece batarya yönetim sistemini değil aracın diğer kontrol birimlerini de olumsuz etkiler [89]. Şekil 3.12'de şarj durumu verisinin batarya yönetim sisteminde kullanıldığı yerler gösterilmektedir.



**Şekil 3.12 : BYS’de SoC’nin kullanıldığı fonksiyonlar**

Bataryanın şarj doluluk oranı tahmini üzerine çok sayıda akademik çalışma yapılmıştır [34,74,88,90-96]. Yapılan çalışmalardan bazıları endüstriyel olarak hali hazırda uygulanırken bazıları ise geliştirilmeye devam etmektedir [97]. Günümüze

kadar, üzerinde çalışılan temel şarj doluluk oranı tahmin yöntemleri Şekil 3.13’de sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.13 : Batarya şarj durumu tahmin yöntemleri

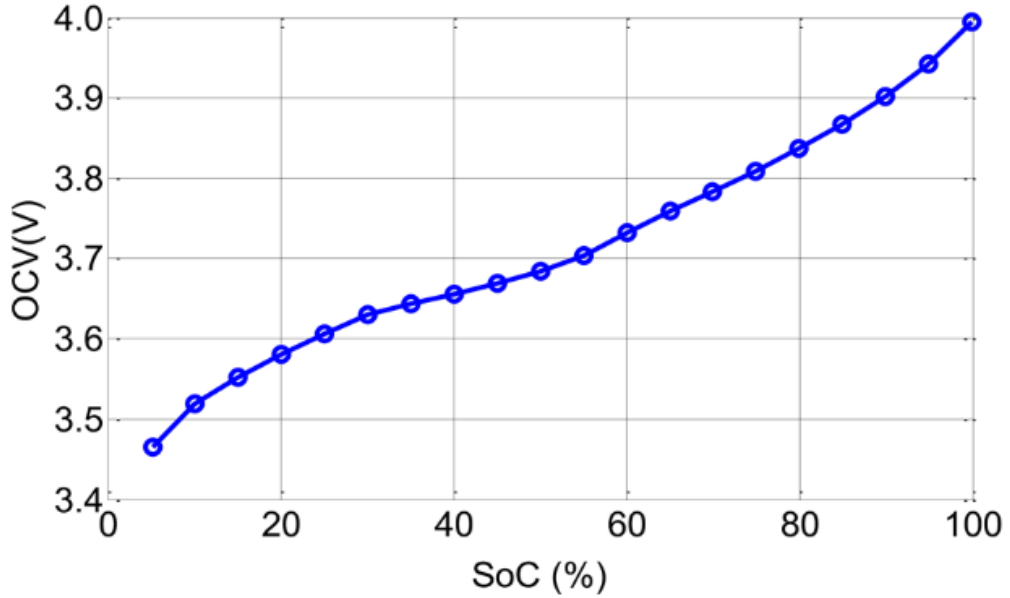
#### 3.1.14.1 Tablodan okuma yöntemi

Şarj durumu, bataryanın karakteristik parametreleri ile doğrudan ilgilidir. Örneğin açık devre gerilimi ölçme yöntemine göre gerilim değerinin yüksek olması, şarj durumunun da yüksek değerde olduğunu göstermektedir. Bu yöntem en basit şarj durumu tahmin etme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde Şekil 3.14’te gösterildiği gibi batarya gerilimi ölçülür ve Şekil 3.15’de gösterilen SoC-OCV ilişkisine göre SoC tahmin edilir.



Şekil 3.14 : Açık devre gerilimi ölçme

Bu yöntemin dezavantajı şarj durumu tahmini için yapılması gereken ölçüm batarya terminallerinin açık devre olmasını gerektirdiğinden elektrikli araç gibi sürekli yük altında çalışan uygulamalarda tercih edilmemektedir [97]. Şekil 8’de OCV-SoC arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Şekil 8: OCV-SoC arasındaki ilişki

### 3.1.14.2 Amper-saat integral (coulomb counting) yöntemi

Bu yöntemle, bataryanın maksimum kapasitesi biliniyorsa akım sayımı yapılarak kalan enerji miktarı tahmin edilebilir. Bu tahminin yapılabilmesi için başlangıçta bataryada mevcut bulunan enerji miktarı bilinmelidir. Bu yöntem şarj doluluk oranı tahmini için tatmin edici sonuçlar vermektedir. Ancak doğru sonuç alınabilmesi için, başlangıç şarj doluluk oranı değerinin bilinmesi, ölçülen akımın gürültülerden arındırılması ve ölçüm hatalarının azaltılması gerekmektedir. Denklem 3.4’te amper saat yöntemi ile SoC hesaplama denklemi verilmiştir.

$$SoC_k = SoC_{k-1} + \frac{\int i dt}{C} \quad 3.4$$

Burada  $SoC_k$  güncel şarj durumunu,  $SoC_{k-1}$  bir önceki şarj durumunu,  $i$  akım değerini,  $C$  ise batarya kapasitesini temsil etmektedir.

Batarya zamanla yaşlanmaktadır ve sıcaklık gibi çevre şartlarından dolayı batarya kapasitesi değişmektedir. Bu sebeple batarya kapasitesi sürekli güncellenmelidir.

Bahsi geçen dezavantajlarından dolayı bu yöntemin tek başına kullanılması büyük hatalara yol açmaktadır. Yöntemin doğruluğunu artırmak için diğer yöntemler ile birlikte hibrit çalıştırılmaktadır [31].

#### **3.1.14.3 Terminal gerilimi yöntemi**

Batarya terminal gerilimi ile şarj durumu arasında bir orantı vardır. Bu orantıya göre batarya şarj durumu tahmin edilebilmektedir ancak deşarj akımındaki dalgalanmalar ve batarya iç direnci nedeniyle gerilim düşümü yaşandığından çoğu zaman hatalı tahmin sonuçları üretilmektedir [89].

#### **3.1.14.4 Model tabanlı tahmin yöntemi**

Batarya teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, batarya modelleme tekniklerinde de gelişmeler yaşanmıştır. Model tabanlı tahmin yöntemi, literatürde en çok kullanılan yöntemlerden biridir [28,71,75,87-91,93,97-104]. Model tabanlı tahmin yöntemleri, kompleks matematiksel denklemler barındırmakta ve elektrokimyasal batarya parametreleri içermektedir. Bu parametrelerin tespit edilebilmesi için zahmetli deneyler yapılması gerekmekte ve uzun süreye ihtiyaç duyulmaktadır [105]. Her ne kadar bu durum dezavantaj gibi görünse de bu yöntemin doğruluk oranının yüksek olmasından dolayı model tabanlı tahmin yöntemleri endüstride yaygın olarak uygulanmaktadır.

Model tabanlı SoC tahmin yönteminde batarya modeli gerçek bir batarya modeli olarak düşünülmektedir, sensörlerden ölçülen veriler de ihmal edilebilecek bir hataya sahip olduğu varsayılmaktadır. Böylece belirli bir SoC değerinde batarya modelinin ürettiği gerilim değeri ile gerçekte ölçülen değer aynı olmaktadır. Zamanla ölçülen değer ile gerçek ölçüm arasında uyumsuzluk olduğunda düzeltme yapılmaktadır. Sistem kapalı döngü olarak çalıştığı için başlangıç SoC değerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

#### **Elektrokimyasal model**

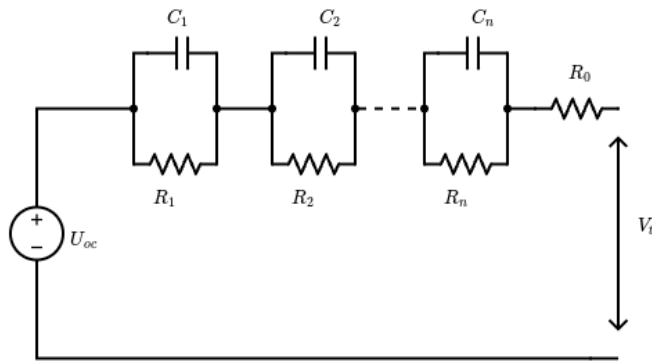
Elektrokimyasal modeller pilin fiziksel ve kimyasal özelliklerini tanımladıkları ve yansıttıkları için beyaz kutu modeli olarak kabul edilirler. Elektrokimyasal modelde pilin kimyasal dinamiği ve termodinamiği pilin iç kimyasına dayanan kısmi bir diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır.

Elektrokimyasal modeller üç ana sınıfa ayrılmaktadır; sözde 2 boyutlu modeller(P2D), basitleştirilmiş sözde iki boyutlu modeller (SP2D) ve tek parçacık modelidir (SP). P2D modeli doğru bir model olsa da modelin kısmi diferansiyel denkleminin bir çözümü yoktur. Bu denklemi çözmek için sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır ancak bu yöntem karmaşıktır ve zaman almaktadır. Dolayısıyla bu yöntem gerçek uygulamalarda kullanılamamaktadır [106]. P2D modeli katı faz difüzyonunun ve elektrot performansının etkisini analiz etmek amacı ile geliştirile SP modelinin temelini oluşturmaktadır. SP modeli sabit akım çalışmaları için uygundur ve karmaşıklığı azaltmak için bazı faktörler yok sayılarak modelin doğruluk oranı düşürülmektedir [107]. Değişen deşarj oranı koşullarında gerçek zamanlı bir SoC tahmini yapmak için P2D modelinin basitleştirilmesiyle SP2D yöntemi önerilmiştir [108]. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla yaklaşık elektrolit konsantrasyonunu veren öngörücü-düzeltilici yaklaşımı kullanılmaktadır [95].

Elektrokimyasal modeller kullanılarak farklı sıcaklık koşullarında SoC tahmini yapmak için belirli sıcaklık değerlerinin arama tablolarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak pilin yüzey sıcaklığı SoC'yi belirlemek için yeterli değildir. Pilin iç direnci ve diğer iç faktörler pilin iç sıcaklığını etkilemektedir. Bu yüzden Ahmedian ve arkadaşları SoC ile pilin yaşlanması arasındaki ilişkiyi araştırarak yaşlanmanın SoC ile oransal bir ilişkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır [109,110].

### Eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modeli (ECM) daha az kimya bilgisi gerektirmesi ve kabul edilebilir bir doğruluk oranı sunması nedeniyle elektrikli araç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ECM temel devre elemanları olan direnç, kondansatör, bobin, gerilim kaynağı gibi elemanlardan oluşmaktadır [111].



Şekil 3.16 : Eşdeğer devre modeli

Şekil 3.16'da 3RC paralel kola sahip (3. dereceden) bir eşdeğer devre modeli gösterilmiştir.

Eşdeğer devre modeline dayanan yöntemler batarya yönetim sistemlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [89]. Batarya parametrelerinin çevrimiçi tahmin edilebilmesiyle açık devre gerilimi değerinin de çevrimiçi elde edilmesi mümkün olmuştur. Böylece şarj doluluk oranı değerinin gerçek zamanlı tahmini mümkün kılınmıştır [112]. Sistemi genel olarak tanımlayabilmek için tekrarlanan en küçük kareler yöntemi (RLS) ve Kalman filtresi algoritmaları kullanılmaktadır. RLS yöntemi, terminal gerilimi tahmini sırasında hataları minimize ederek batarya parametrelerini optimum şekilde elde etmektedir [97]. Kalman filtresi ile, durum denklemlerinden elde edilen gerçek değer ile beklenen değer arasında oluşan ortalama karesel hatalarını (RMS) azaltarak doğru batarya parametrelerini gerçek zamanlı olarak elde etmektedir.

Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) batarya modelleme ve şarj doluluk oranı tahmininde en çok tercih edilen yöntemdir [89]. Sistem modelinden elde edilen bilgiler ve belirsizliklerle ilgili varsayımlara dayanarak minimum ortalama karesel hata ile optimal durum tahmini yapılmasına olanak sağlar Kalman (1960). 2004 yılında G. L. Plett, Eşdeğer devre modelinin parametrelerini tanımlamak ve bataryanın doluluk oranını tahmin etmek için EKF'yi uygulamıştır [113].

Bataryada sistem durumları hızlı bir dalgalanma gösterirken, batarya parametreleri yavaş değişmektedir. Bu durum göz önüne alındığı zaman batarya parametrelerinin belirlenmesi ve durum tahmini için aynı zaman ölçeğini kullanmak uygun değildir. Çünkü doğru tahmin yapan ve güvenilir bir sistem için aynı zaman ölçeğini kullanmak zordur ve kontrol sisteminin hesaplama maliyetini arttırır. Bu nedenle, batarya parametrelerini tahmin etmek için makro ölçeğini kullanan ve sistem durumunu tahmin etmek için mikro ölçeği kullanan çok ölçekli EKF geliştirilmiştir. Çok ölçekli EKF'nin doğrulama sonuçlarına göre batarya kapasitelerinin ve şarj doluluk oranının maksimum tahmin hatalarının %2'den az olduğu görülmüştür [114]

### **Elektrokimyasal empedans modeli**

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), bataryanın dinamik davranışının analizi için benzersiz bir araç sunmaktadır. Eşdeğer devre modelini oluşturmak için yaygın olarak kullanılan basamak-cevap yöntemleri ile karşılaştırıldığında, harmonik küçük sinyal uyarımı, herhangi bir çalışma noktasında sistem yanıtının doğrudan

ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Eşdeğer devre modeli ile karşılaştırıldığında elektrokimyasal empedans modeli daha fazla parametre sunmaktadır. Bu yöntemin kullanıldığı ilgili çalışmaya göre şarj doluluk oranı tahmini hata oranı %1'in altında rapor edilmiştir [115]. Ancak bu yöntemin uygulama maliyeti yüksek, model parametrelerinin belirlenmesi zordur. Ayrıca bataryanın elektrokimyasal empedans spektroskopisinin çıkarılması için yüksek maliyetli ve büyük hacimli cihazların kullanılmasını gerektirdiğinden bu yöntemin elektrikli araçlara uygulanması zordur [115].

#### **3.1.14.5 Veri tabanlı tahmin yöntemleri**

Bataryaların şarj doluluk oranını tahmin etmek için kullanılan popüler yöntemlerden biri de veri tabanlı tahmin yöntemidir. Model tabanlı yöntem gibi karmaşık kimyasal ve matematiksel modellere ihtiyaç duymaz. Deneysel veriler yardımıyla gerekli algoritma oluşturulur. Bataryanın karakteristik yapısıyla ilgili uzmanlık derecesinde bilgi birikimine gerek yoktur. Fakat, veri işleme ve algoritma tasarlama hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Verilerin doğru ölçülmesi en önemli unsurdur.

Yapay Sinir Ağları, temel olarak insan beyninden ilham alan bir bilgisayar sistemidir. Bu yöntem, birçok farklı makine öğrenme algoritmasının ana iskeleti görevini görür. Bataryalar gibi oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir sistem için, kendi kendine adapte olabilen ve öğrenebilen bir yapıya sahiptir. Bir sinir ağı temel olarak üç katmanlı yapıdan oluşur. Giriş katmanı anlık akım, gerilim ve sıcaklık değerlerinin vektörünü alırken çıkış katmanı anlık SOC değerini vermektedir. Gizli katman ise yapay nöronların bir dizi girdi aldığı ve bir aktivasyon fonksiyonu aracılığı ile bir çıktı ürettiği, giriş katmanı ile çıkış katmanı arasındaki bölümdür. Literatürde uygulanan en yaygın örnekleri Geri Yayılımlı Sinir Ağları, Radyal Temelli Fonksiyon Sinir Ağları, Tekrarlanan Sinir Ağları, Elman tipi Sinir Ağları, Dalgacık Sinir Ağlarıdır [116].

Derin öğrenme yöntemi ile ilgili görüntü işleme, konuşma işleme, robotik, biyoinformatik gibi pek çok yazılım disiplinde önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Derin terimi, yapay sinir ağındaki hesaplama katmanlarının sayısı ile ilgilidir. Derin öğrenme, makinelerin her katmandaki gösterimi bir önceki katmandaki gösterimden hesaplamak için kullanılan dahili parametrelerin nasıl değiştiğini göstermek için geri yayılma algoritmasını kullanarak karmaşık veri kümelerindeki karmaşık yapıyı

keşfeder [117]. Batarya ile ilgili çalışmalarda derin öğrenme yöntemlerinin kullanımı hala çok sınırlıdır. İlerleyen yıllarda bu yöntemin batarya uygulamalarının artacağı öngörülmektedir [116].

Bulanık Mantık, lityum-iyon pil gibi oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir sistemin bilinmeyen parametrelerini tanımlamak amacı ile kullanılan bir başka yöntemdir [118]. Bulanık mantık tekniği yüksek depolama ve hesaplama süresi gerektirmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, lityum-iyon pilin zamana göre değişen parametrelerini tanımlamak için özyinelemeli en küçük kareler yöntemi, bulanık adaptif unutma faktörü ile birlikte kullanılmıştır [2].

Destek Vektör Makinesi (SVM), doğrusal olmayan sistemlerde regresyon ve sınıflandırma sorunlarını çözmek için güçlü bir yöntemdir [119]. Destek Vektör Makinesi, istatistiksel makine öğrenmesi teorisinden türeyen yeni yöntemlerden biridir. Yapısal riski azaltma ilkesi üzerine kurulan SVM, iyi bir genelleme yeteneğine ve küçük örnek boyutlarına sahiptir. Bunlara ek olarak, aşırı donma problemlerine karşı dirençlidir. Bu özellikleri sayesinde yapay sinir ağlarına göre avantajlıdır. Bu yöntem, doğrusal olmayan bir modeli doğrusal bir modele dönüştürmek için farklı çekirdek işlevleri ve regresyon algoritmalarını kullanır. Buna karşılık, kuadratik programlama nedeniyle bu sistemin karmaşıklığı çok yüksektir. SVM ile şarj doluluk oranını tahmin etmede gerilim, akım ve sıcaklık gibi veriler önem arz etmektedir [120].

#### 4. MATERYAL VE METOD

Bu tez kapsamında Şekil 4.1’de gösterilen Panasonic UR18650AA model Lityum iyon NMC ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) kimyasına sahip pil kullanılmıştır.



Şekil 4.1 : Panasonic UR18650AA pil görseli

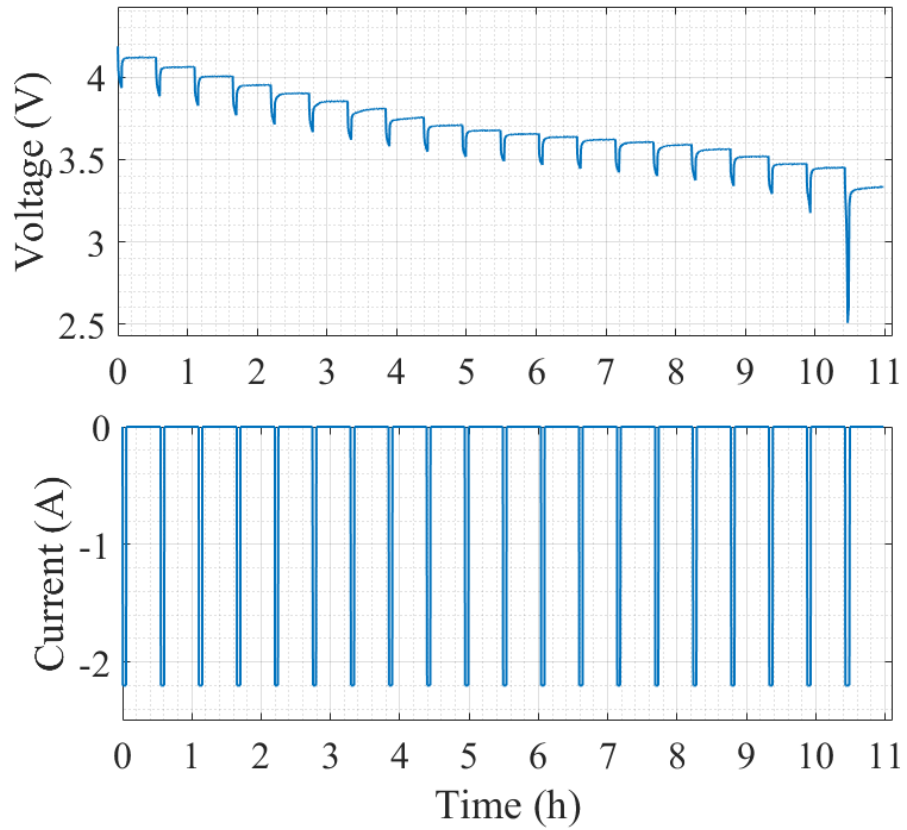
Pilin özellikleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Panasonic UR18650AA pil özellikleri

| Özellik                  | Değer                | Birim |
|--------------------------|----------------------|-------|
| En Yüksek Gerilim değeri | 4.2                  | (V)   |
| Nominal gerilim          | 3.6                  | (V)   |
| Kesme gerilimi           | 2.5                  | (V)   |
| Nominal kapasite(min)    | 2150                 | (mAh) |
| Nominal kapasite(typ)    | 2250                 | (mAh) |
| Deşarj oranı             | 2C                   | -     |
| Çap                      | 18.5                 | (mm)  |
| Yükseklik                | 65.1                 | (mm)  |
| Kimyasal Kısaltması      | NMC                  | -     |
| Katod                    | $\text{LiNiMnCoO}_2$ | -     |
| Anod                     | Karbon               | -     |

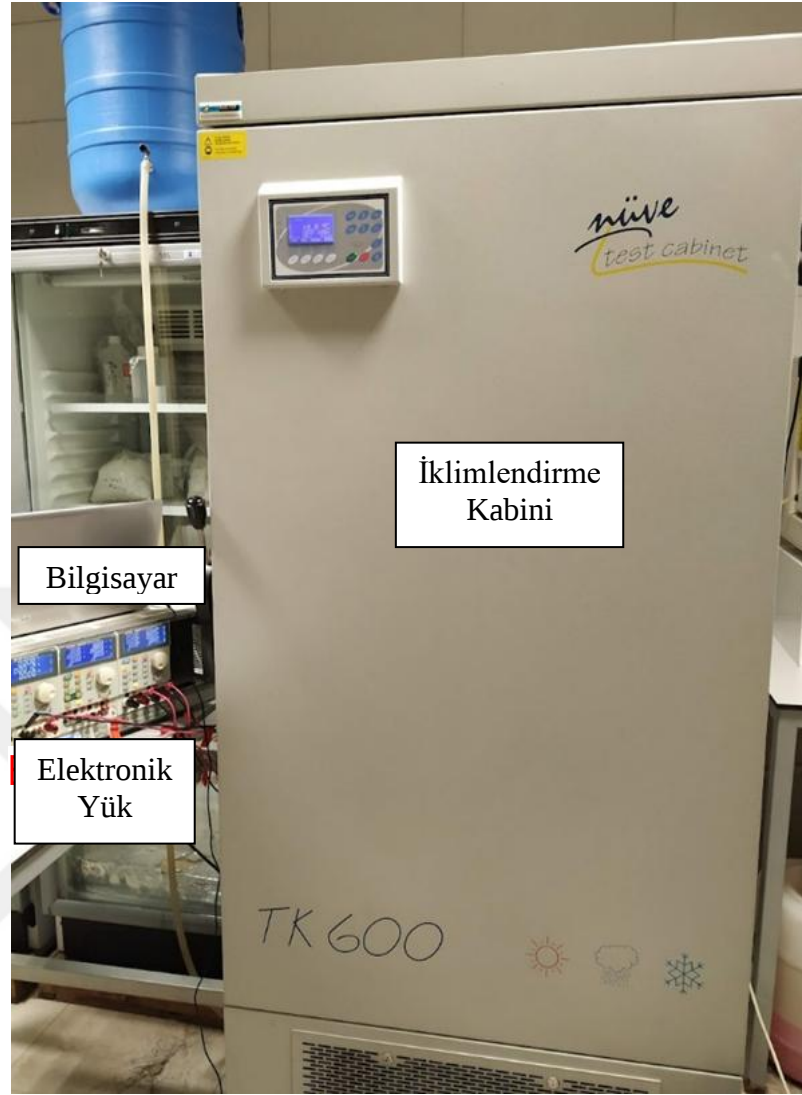
Tez kapsamında gerekli testlerin ve deneylerin yapılabilmesi için özellikleri verilen Panasonic UR18650AA pil modelinden kapasiteleri yaklaşık 2200 mAh olan 3 adet numune kullanılmıştır.

Sıcaklık ve akım etkisine bağlı olarak pillerin SoC tahmininin yapılabilmesi için pillerin farklı sıcaklık ve akım koşulları altında test edilmesi gerekmektedir. Test yöntemi olarak darbe deşarj testi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre piller belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir deşarj akımı ile bir süre deşarj edilmektedir. Deşarj işleminden sonra pil yeterince dinlendirilmektedir. Bu işlemler pil tamamen deşarj edilene kadar tekrarlanmaktadır. Şekilde darbe deşarj testine örnek olarak 30 °C, 2.2 A akım değerine göre yapılan test sonucu görseli Şekil 4.2’de verilmiştir.

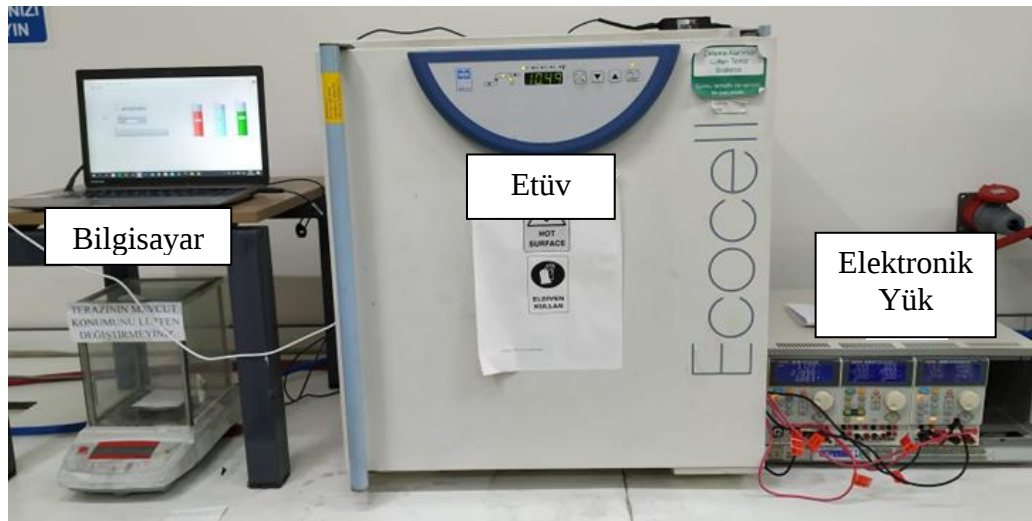


**Şekil 4.2 :** Darbe deşarj testinde uygulanan akım ve gerilim grafiği

Darbe deşarj testinin yapılma amacı batarya eşdeğer devre modeli parametrelerinin tahmin edilmesidir. Farklı sıcaklık ve akım koşullarında yapılan testlerin sonuçlarına göre eşdeğer devre model parametreleri tahmin edilmekte, böylece bu sıcaklık ve akım değerlerine göre SoC tahmini yapılabilmektedir. Bu amaçla 2.2A, 3.3A, 4.4A akım değerlerinin her biri için piller -10°C, 0°C, 10°C, 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklık koşulları altında test edilmiştir ve test sonuçları Ek C’de sunulmuştur. Pillerin belirtilen sabit sıcaklık koşullarında test edilebilmesi için Nuve-TK600 model iklimik test kabini (-10°C, 0°C ve 10°C için) ve Etuv (20°C, 30°C ve 40°C için) kullanılmıştır.

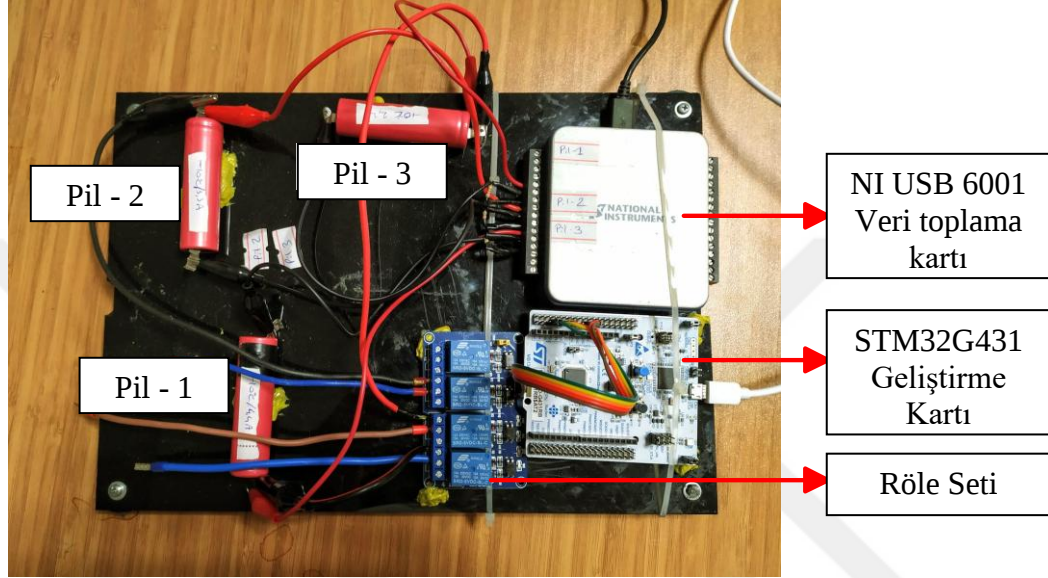


Şekil 4.3 : Klimatik test kabini



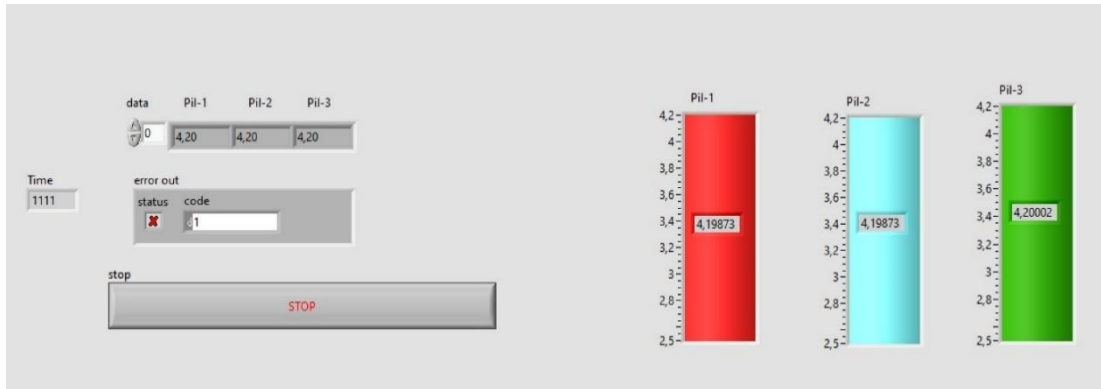
Şekil 4.4 : Etüv ile yapılan test görseli

Pillerin belirtilen sabit akım değerlerinde deşarj edilebilmesi için de PRODIGIT 3314F model elektronik yük kullanılmıştır. Test sırasında ölçülen verilerin toplanması ve bilgisayar ortamında kaydedilmesi için NI USB-6001 mode veri toplama cihazı kullanılmıştır. Testlerin hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesi ve sistemin otomatikleştirilmesi için STM32G431 model mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır.



Şekil 4.5 : Testlerde kullanılan veri toplama kartı ve geliştirme kartı

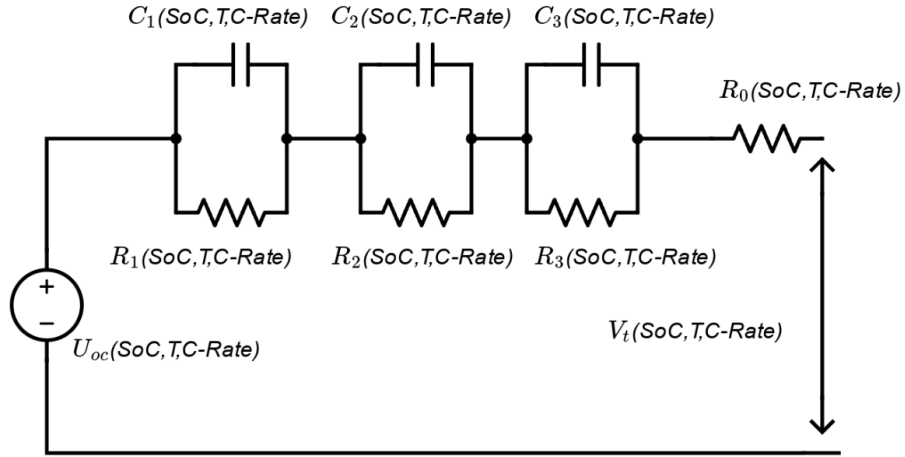
Pillerin gerilimi akım ve deşarj durumunun takibi için Labview programında arayüz oluşturulmuş ayrıca pillerde kalan enerji hesabı yaptırılarak Şekil 4.6'daki gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 4.6 : Labview arayüzü

#### 4.1 Eşdeğer Devre Modelinin Oluşturulması

Tez kapsamında sıcaklık ve akıma bağlı SoC tahmini yapabilmek için Şekil 4.7’de gösterilen 3.dereceden (3RC) bir eşdeğer devre modeli kullanılmıştır.



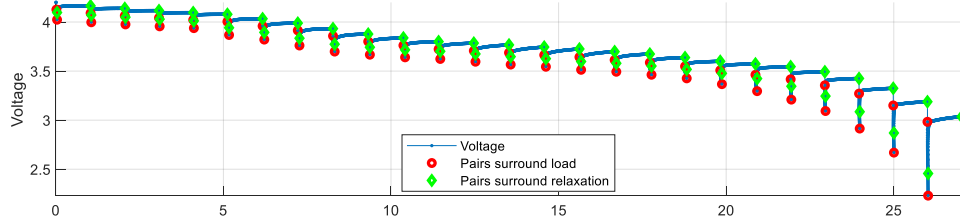
Şekil 4.7 : Akım, sıcaklık, SoC’ye bağlı Eşdeğer devre modeli

Devre parametrelerinin farklı sıcaklık ve akım değerlerindeki değerlerinin tespit edilmesi için piller belirli sıcaklık ve akım değerlerinde darbe deşarj testi ile test edilmiştir. Pillere her uygulanan darbe deşarj akımı sürecinde pil %5 SoC oranında deşarj edilmektedir ve daha sonra 30 dk dinlendirilmektedir. Sonuç olarak belirlenen her akım ve sıcaklık değeri için pilin gerilim cevabı ölçülerek veriler veri toplama cihazı ile kaydedilmektedir.

Pil parametrelerinin tahmin edilebilmesi için darbe deşarj akımı verilerinden ve bu deşarj akımı sonucunda oluşan bataryanın gerilim cevabı verilerinden yararlanılmaktadır. Şöyle ki; pil uçları açık devreyken, yani herhangi bir deşarj uygulanmazken pil kutuplarından açık devre gerilim denilen gerilim değeri okunur ve bu değer stabildir. Pile herhangi bir deşarj uygulandığı anda pilin iç direnci üzerinde bir gerilim düşümü oluşur ve bu nedenle pil kutuplarında okunan değer anlık olarak düşer. Pilin gerilim cevabına bakılarak ve uygulanan sabit akım değeri göz önünde bulundurularak eşdeğer devre modelindeki R0 parametresi ohm kanunu ile hesaplanabilmektedir. Pilin gerilim cevabına Şekil 4.9’a bakıldığında anlık gerilim düşüşünden sonra doğrusal olmayan bir davranış görülmektedir. Bu davranış eşdeğer devrede RC parametreleri kullanılarak modellenmektedir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için en küçük kareler yöntemi ve eğri uydurma yöntemleri kullanılmaktadır. Pilin davranışına en yakın eğri elde edilene kadar parametreler

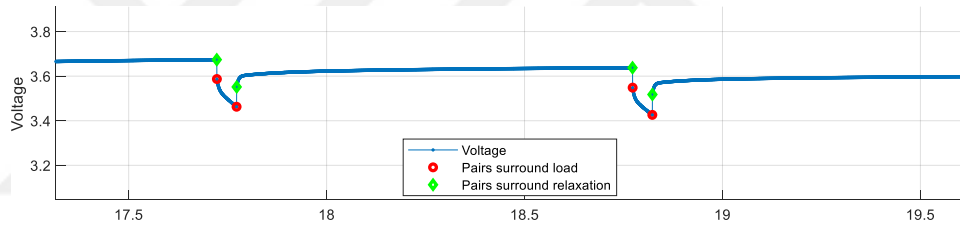
değiştirilmektedir ve nihai sonuca ulaşıldığında devre parametreleri kaydedilmektedir. Bu parametreleri elde edilebilmesi için MATLAB Simulink ortamında parametre tahmin algoritması kullanılmış ve pil modeli oluşturulmuştur.

Algoritma öncelikle eğri üzerinde gerilim düşümü ve eksponansiyel değişimlerin olduğu noktaları Şekil 4.8'deki gibi belirlemektedir.



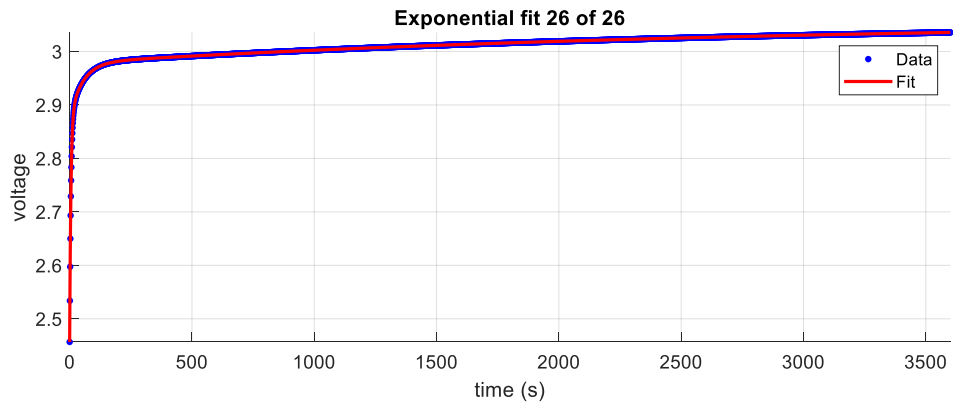
**Şekil 4.8 :** Gerilim düşümü ve eksponansiyel değişim noktalarının belirlenmesi

Ani gerilim düşümünün olduğu bölge, eşdeğer devredeki R0 direncini bulmamızı sağlarken, eksponansiyel bölge ise RC değerlerini bulmamızı sağlamaktadır. Şekil 4.9'da, Şekil 4.8'deki eğrinin yakınlaştırılmış hali verilmiştir.



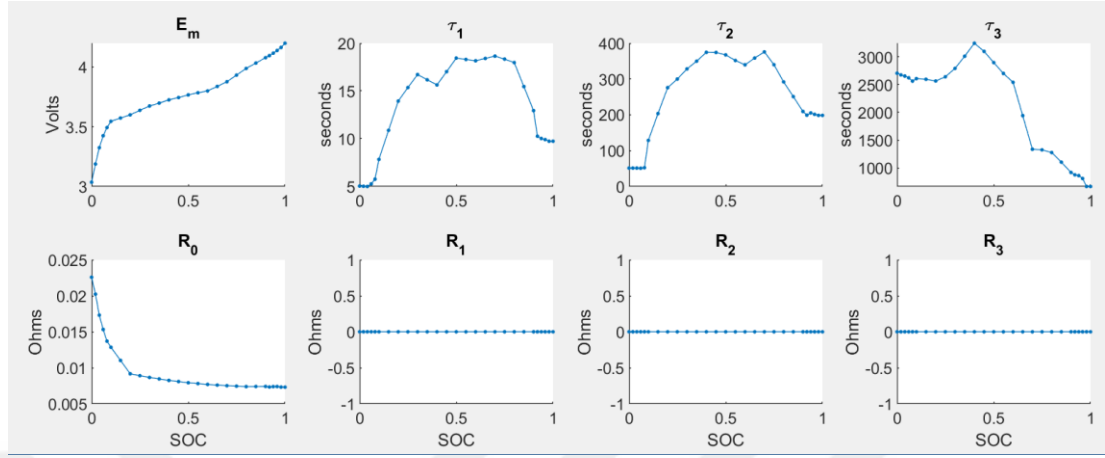
**Şekil 4.9 :** Değişim noktalarının yakınlaştırılmış hali

Her bir SoC değeri için pilin deşarj durumundan dinlenme durumuna geçiş anındaki eğri üzerine eğri uydurma (curve fitting) işlemi uygulanarak datalar oluşturulmakta ve  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  değerleri tahmin edilmektedir. Şekil 4.10'da dinlenme durumunda oluşan eğri ve uydurma işlemi gösterilmiştir.



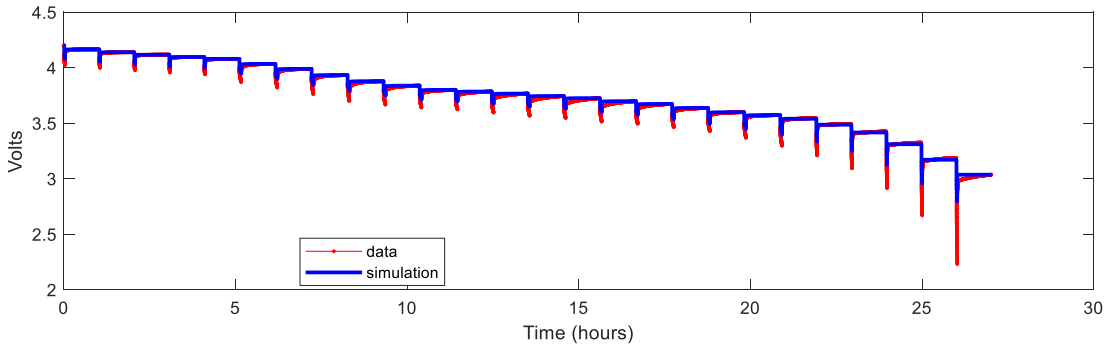
**Şekil 4.10 :** Eğri uydurma aşaması

İlk aşamada SOC değerlerine göre  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  değerleri elde edilmiş ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



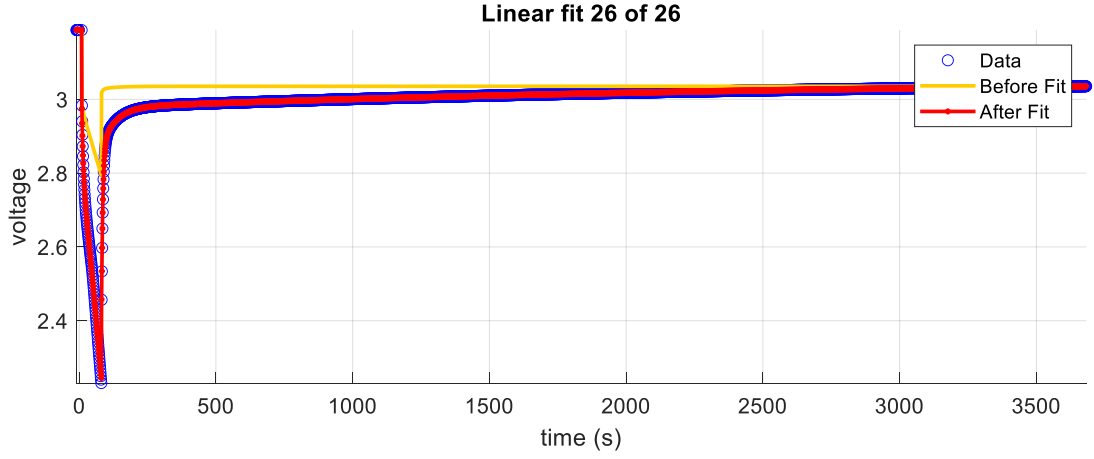
Şekil 4.11 :  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  değerlerinin tahmin edilmesi

Bu aşamada henüz parametreler tam olarak tahmin edilmediği için Şekil 4.12’de görüldüğü üzere deneysel sonuçlar, simülasyon sonuçları ile tam olarak örtüşmemektedir. Çünkü bu aşamada  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  değerleri elde edilmiş ancak  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  değerleri belirlenmemiştir. Henüz optimizasyon işlemi de yapılmadığı için  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  değerleri yaklaşık olarak bulunmuştur.

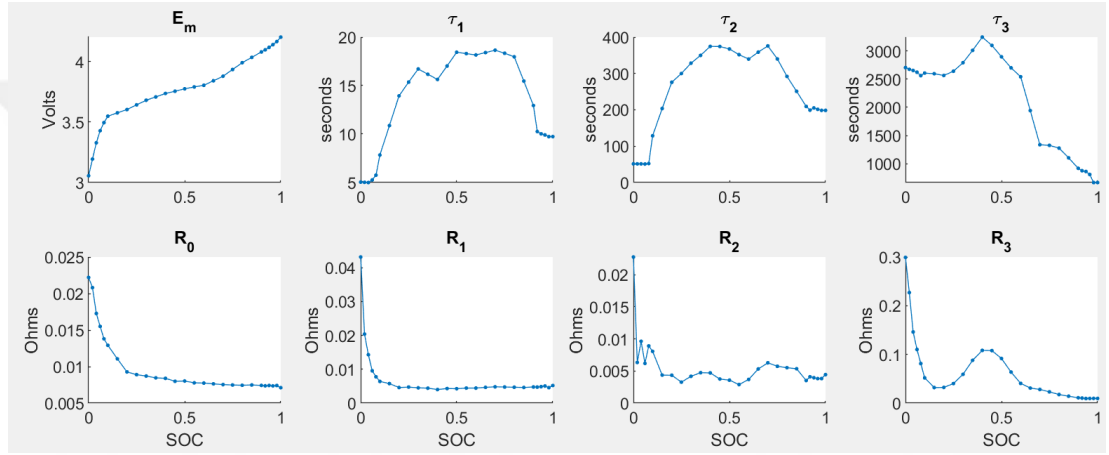


Şekil 4.12 : Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları karşılaştırması

İkinci aşamada Şekil 4.13’te gösterildiği gibi lineer fitting işlemi hem deşarj durumunda hem de dinlenme durumunda eğri üzerine uygulanarak  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  değerleri de elde edilmiştir. Elde edilen parametreler Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

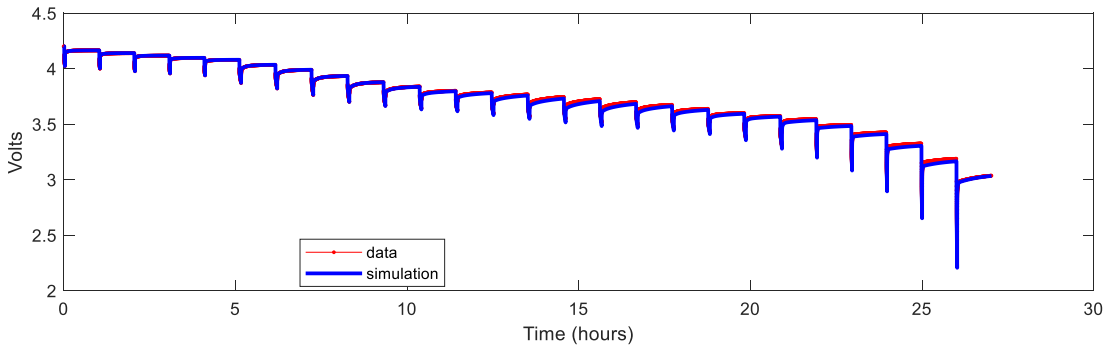


Şekil 4.13 : Doğrusal uydurma işlemi



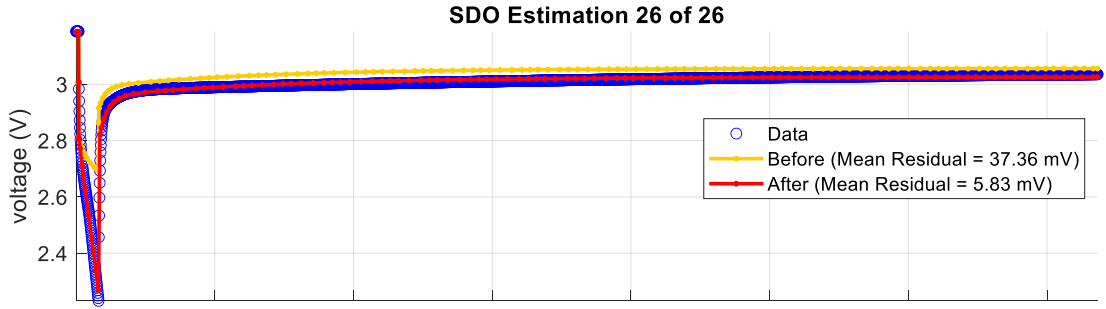
Şekil 4.14 : Doğrusal uydurma sonrası parametreler

İkinci aşamadan sonra elde edilen parametreler sayesinde Şekil 4.15'te görüldüğü üzere simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara daha da yaklaştırmıştır.



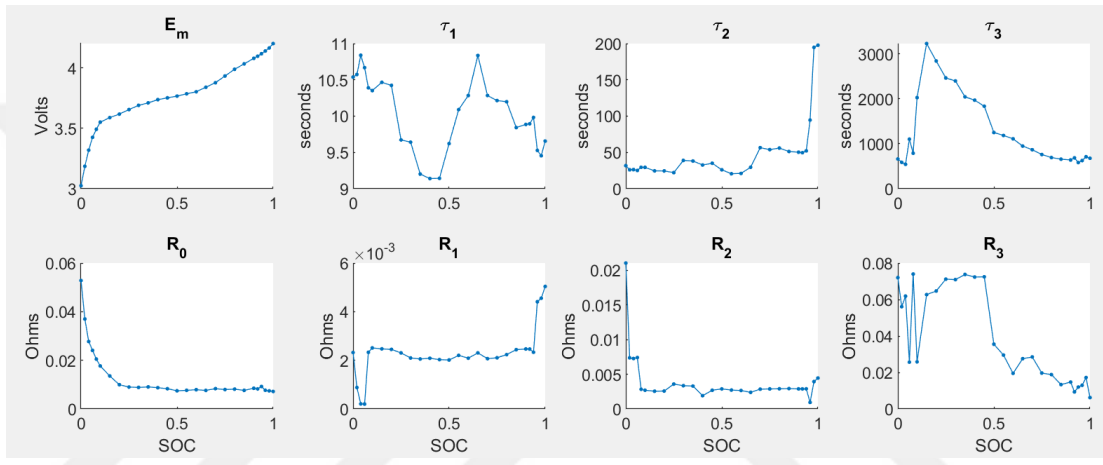
Şekil 4.15 : Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları karşılaştırması

Üçüncü aşamada Şekil 4.16'da gösterildiği gibi Simulink Design Optimization (SDO) aracı kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle optimizasyon işlemi uygulanmıştır.



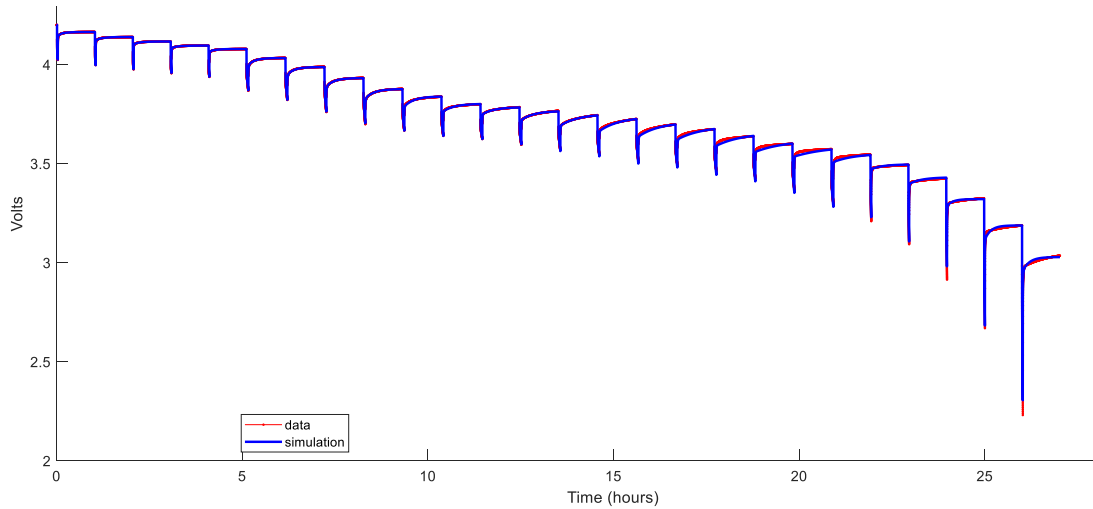
Şekil 4.16 : SDO işlemi

Optimizasyon işleminden sonra eşdeğer devre parametreleri daha doğru bir şekilde elde edilerek Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



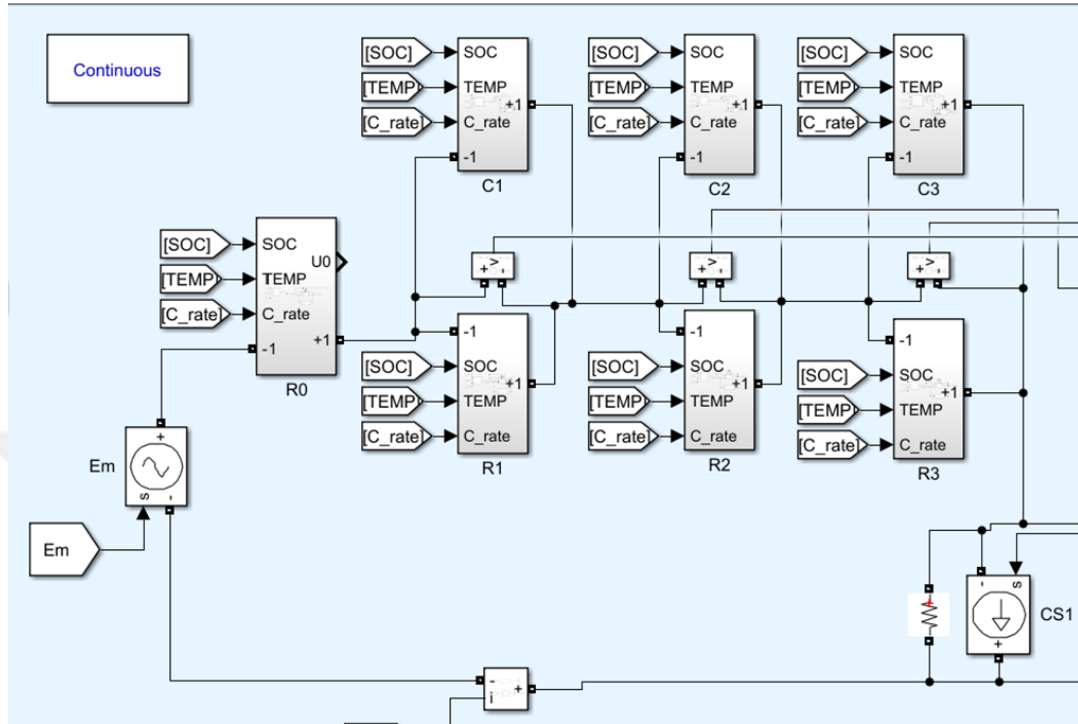
Şekil 4.17 : SDO sonrası devre parametreleri

Optimizasyon işlemi sonrasında devre parametreleri doğru bir şekilde elde edildiği için simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara daha da yaklaşmıştır. Şekil 4.18’de son durumda simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılmış hali gösterilmiştir.



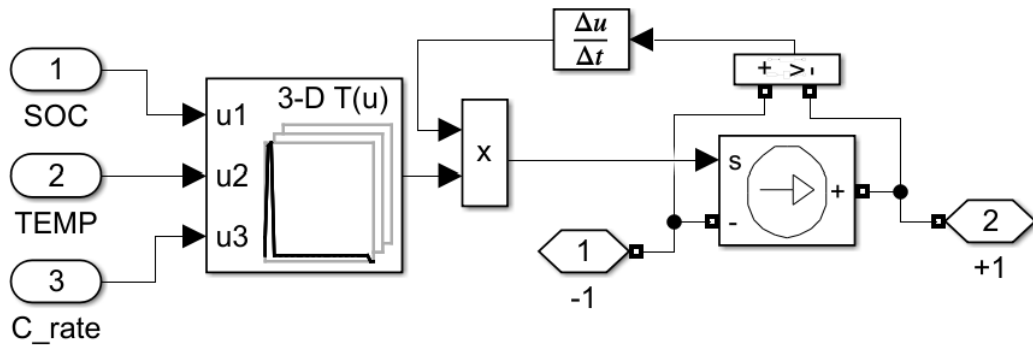
Şekil 4.18 : Nihai sonuç

Elde edilen parametrelerin kullanılması ve SOC tahminin yapılabilmesi için SOC, sıcaklık ve şarj-deşarj oranına bağlı 3RC paralel kola sahip eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin genel görüntüsü Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Simulink eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modelinde R ve C elemanları kontrollü elemanlar olarak modellenmiş, bu elemanların değerleri de SoC, sıcaklık ve şarj-deşarj oranına bağlı olarak değer atayan lookup tablo bloğu tarafından belirlenmiştir. Şekil 4.20’de kondansatörler için, Şekil 4.21’de ise dirençler için oluşturulan modeller gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : Kondansatör modeli



Çıkış istatistiğini tanımlamak için kokusuz dönüşümün durum denklemleri denklem 4.1’de verilmiştir.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \hat{x}_{k-1}^{(i)} = \hat{x}_{k-1}^+ + \tilde{x}^{(i)} & i = 1, 2, \dots, 2n \\ \tilde{x}^{(i)} = \sqrt{(n + \lambda)P_x} & i = 1, 2, \dots, n \\ \tilde{x}^{(n+i)} = -\sqrt{(n + \lambda)P_x} & i = 1, 2, \dots, n \\ w_0^m = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ w_0^c = \frac{\lambda}{n + \lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(n + \lambda)} & i = 1, 2, \dots, 2n \end{array} \right. \quad 4.1$$

Burada  $x$ ,  $n$ . dereceden bir rastgele gaussian değişkenini ifade etmektedir. Kovaryans ve ortalama değeri sırasıya  $P_x$  ve  $\bar{x}$  ile ifade edilmektedir. Ölçeklendirme parametresi  $\lambda = \alpha^2(n + k) - n$  olarak ifade edilmektedir.  $\alpha$ ,  $\bar{x}$  etrafındaki sigma noktalarının yayılma noktalarını ifade etmektedir.  $\hat{\alpha}$ , önceki bilgiye göre  $x$ ’in dağılımını tanımlar. Gaussian dağılımına göre  $\hat{\alpha}=2$  en uygun değer olarak kabul edilmektedir. Bu aşamadan sonra her sigma noktası  $f(X_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 2n$  fonksiyonu aracılığı ile dağıtılır[122-124].

Daha sonra sistem tahmininin kovaryansı ve ortalaması denklem 4.2 ile hesaplanmıştır[98].

$$\left\{ \begin{array}{ll} \hat{x}_{k-1}^{(i)} = \hat{x}_{k-1}^+ + \tilde{x}^{(i)} & i = 1, 2, \dots, 2n \\ \tilde{x}^{(i)} = \sqrt{(n + \lambda)P_x} & i = 1, 2, \dots, n \\ \tilde{x}^{(n+i)} = -\sqrt{(n + \lambda)P_x} & i = 1, 2, \dots, n \\ w_0^m = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ w_0^c = \frac{\lambda}{n + \lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(n + \lambda)} & i = 1, 2, \dots, 2n \end{array} \right. \quad 4.2$$

SoC tahmini durum güncellemesi için denklem 4.3 kullanılmıştır[98].

$$\begin{cases} \hat{x}_k^{(i)} = A\hat{x}_{k-1}^{(i)} + Bu_k + \omega_k \\ \hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \hat{x}_k^{(i)} \end{cases} \quad 4.3$$

Hata kovaryansı denklem 4.4 ile hesaplanmıştır.

$$P_{x,k}^- = \sum_{j=0}^{2n} w_j^c [\hat{x}_k^{(j)} - \hat{x}_k^-][\hat{x}_k^{(j)} - \hat{x}_k^-]^T \quad 4.4$$

Çıkış değeri denklem 4.5 aracılığı ile güncellenmiştir.

$$\hat{y}_k^{(i)} = C\hat{x}_{k-1}^{(i)} + Du_k + v_k, \hat{y}_k^- = \sum_{j=0}^{2n} w_j^m \hat{y}_k^{(j)} \quad 4.5$$

Ölçüm sonrası durum tahmini denklem 4.6 ile yapılmaktadır.

$$\begin{cases} P_{y,k} = \sum_{j=0}^{2n} w_j^c [\hat{y}_k^{(j)} - \hat{y}_k^-][\hat{y}_k^{(j)} - \hat{y}_k^-]^T \\ P_{xy,k} = \sum_{j=0}^{2n} w_j^c \sum_{j=0}^{2n} w_j^c [\hat{y}_k^{(j)} - \hat{y}_k^-][\hat{x}_k^{(j)} - \hat{x}_k^-]^T \\ L = P_{xy,k}^* P_{y,k}^{-1} \end{cases} \quad 4.6$$

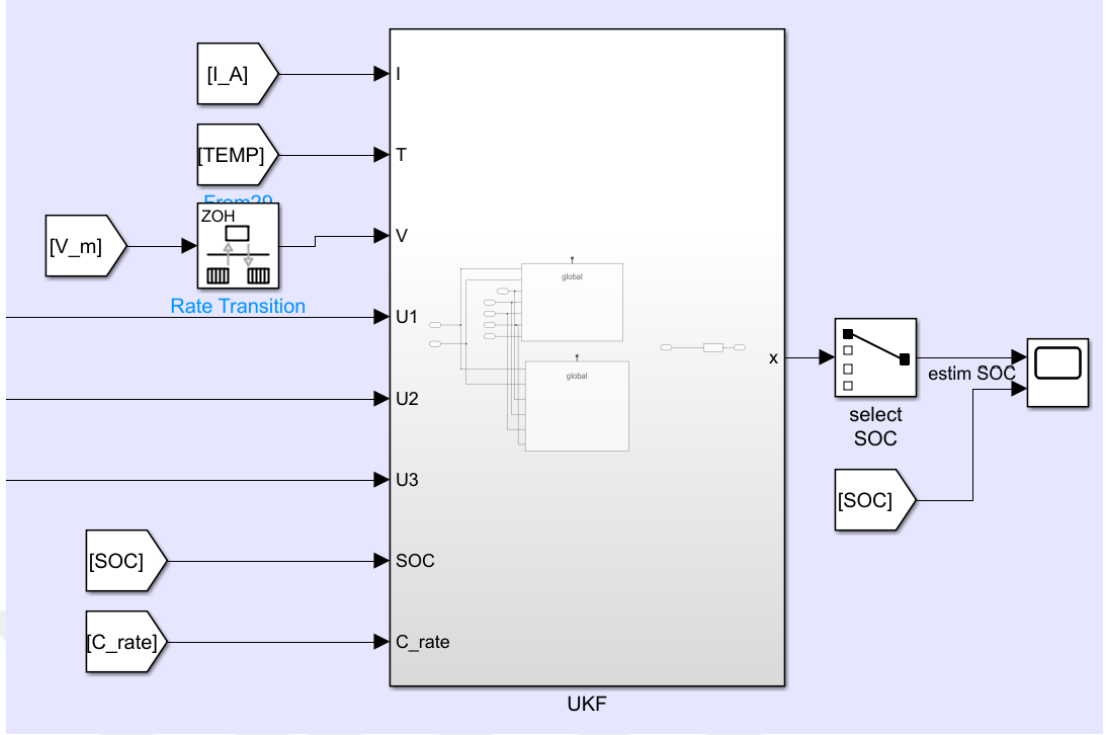
Durum tahmini ölçüm güncellemesi için denklem 4.7 kullanılmaktadır.

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L(y_k - \hat{y}_k^-) \quad 4.7$$

Hata kovaryansı ölçüm güncellemesi için denklem 4.8'den istifade edilmiştir.

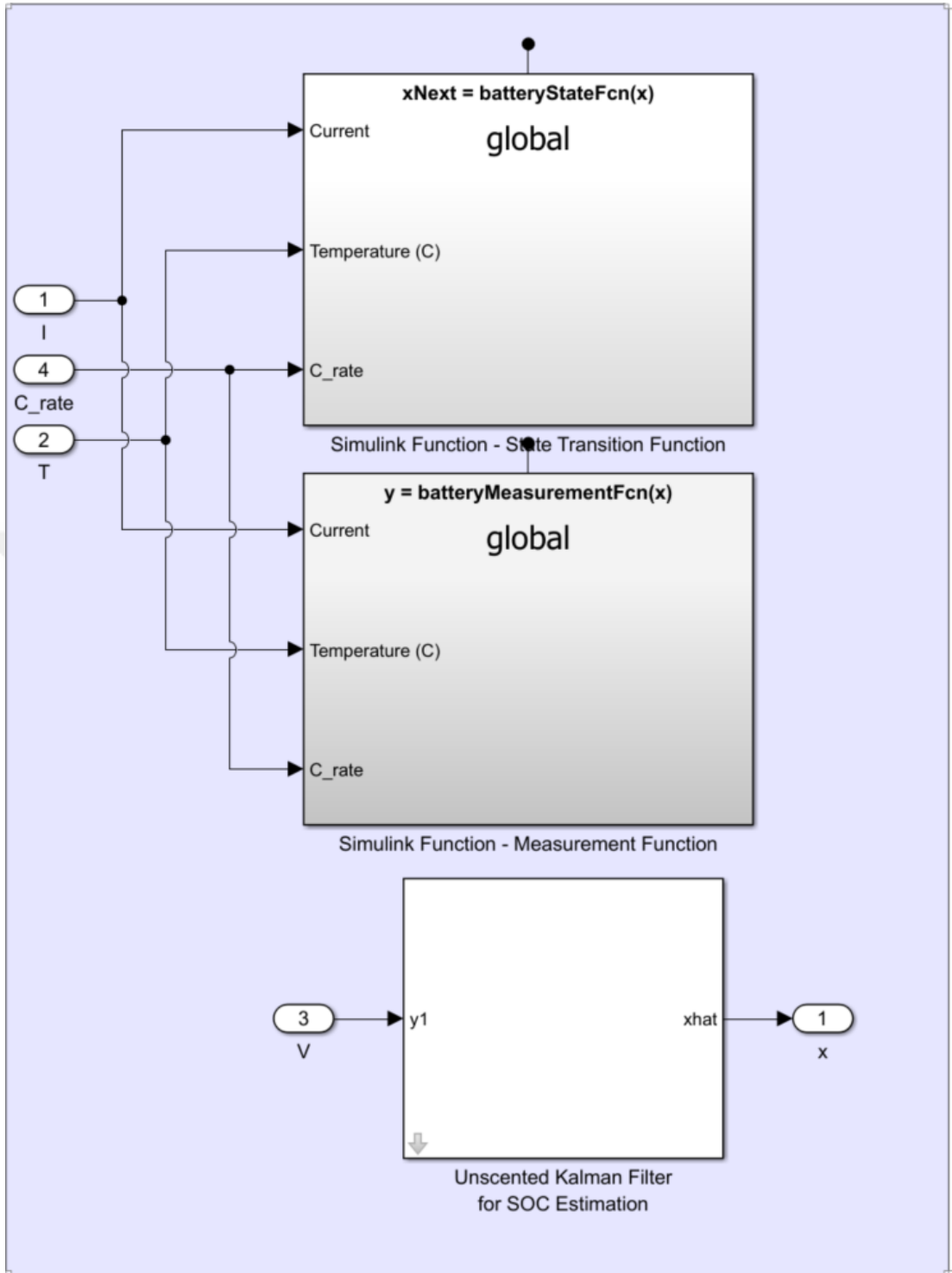
$$P_{x,k} = P_{x,k}^- - LP_{y,k} \times L^T \quad 4.8$$

UKF yöntemi ile SoC tahmin algoritmasını uygulamak için MATLAB Simulink yazılımı kullanılmıştır. Simulink'te oluşturulan modelin görseli Şekil 4.23'te, model detayları Şekil 4.24'de verilmiştir. Ayrıca algoritmanın detaylı gösterimi Ek B'de sunulmuştur.



**Şekil 4.23 : Simulink UKF modeli**

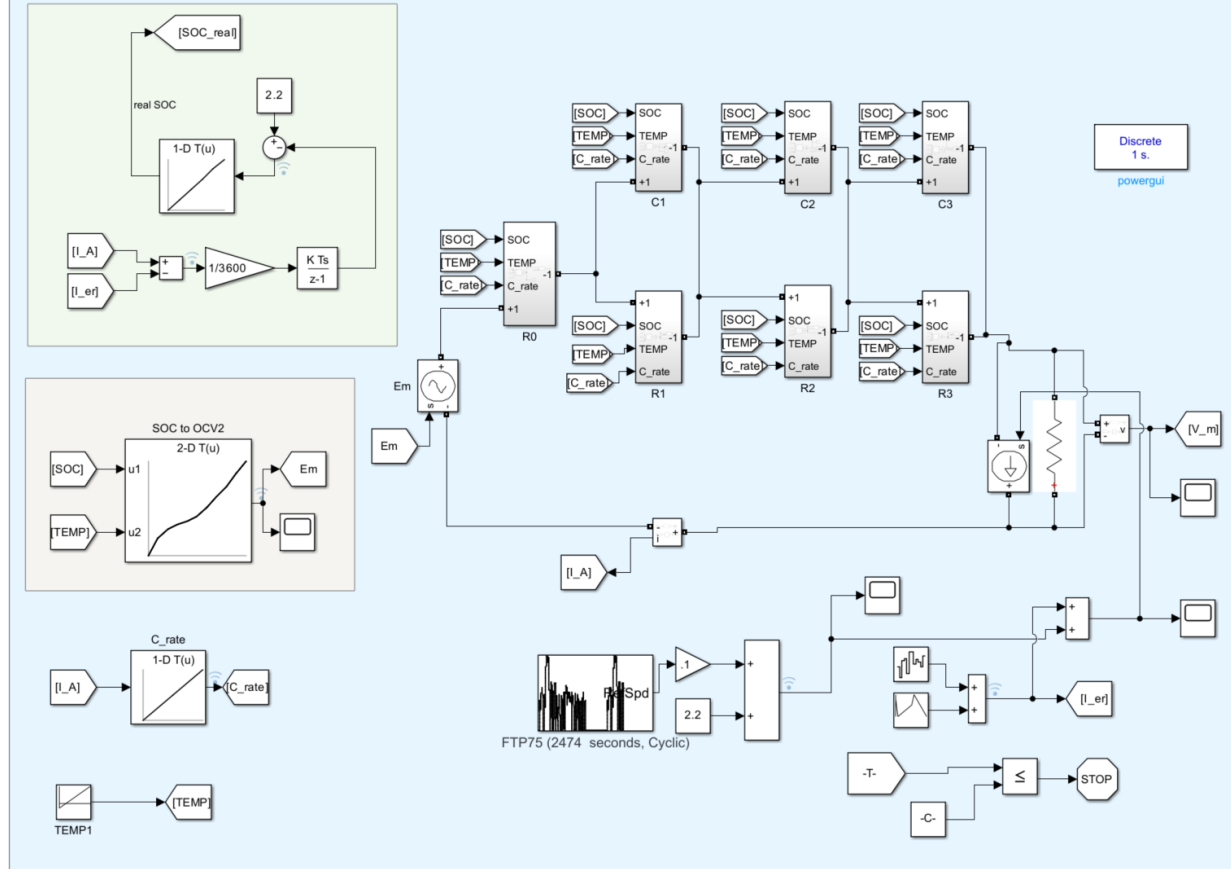
Batarya eşdeğer devre modeli ve UKF ile SoC tahmin algoritması kurulduktan sonra önerilen yöntemi gerçek devre üzerinde test etmek ve başarısını doğrulamak için STM32F401RE model mikrodeneleyici kartı kullanılmıştır. Simulink ortamında geliştirilen algoritmayı geliştirme kartına yüklemek için Simulink'in gömülü sistem kodlama aracı (Embedded Toolbox) kullanılmıştır. Böylece simülasyon ortamında yapılan testler ile geliştirme kartı üzerinde yapılan testler gerçekçi bir şekilde karşılaştırılmıştır. Doğrulama testi için kullanılan devre şeması Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



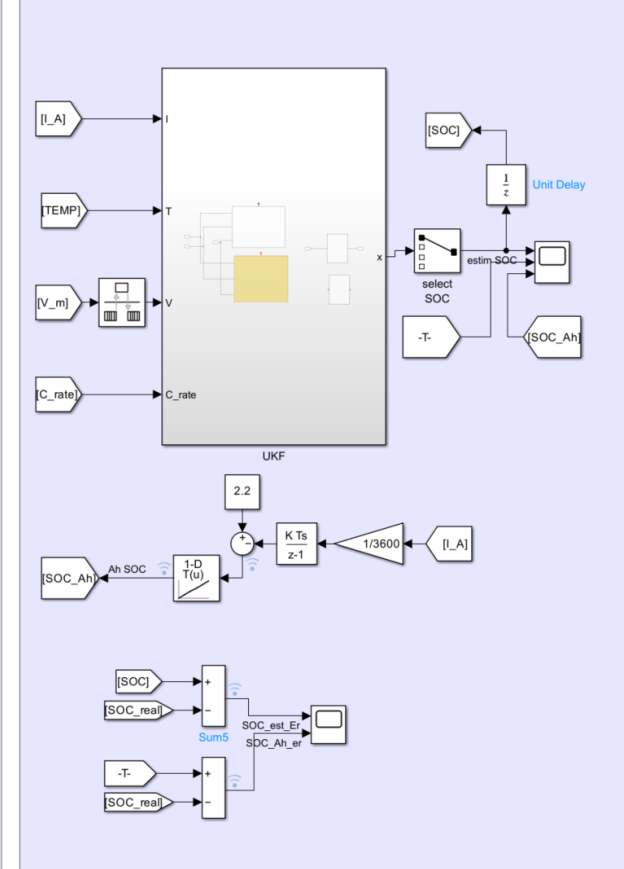
**Şekil 4.24 :** UKF algoritması modelinin detaylı gösterimi

Batarya eşdeğer devre modeli ile UKF SoC tahmin algoritmasının birbiri ile ilişkisini detaylı bir şekilde göstermek amacıyla Şekil 4.25'te entegre edilmiş model gösterilmiştir.

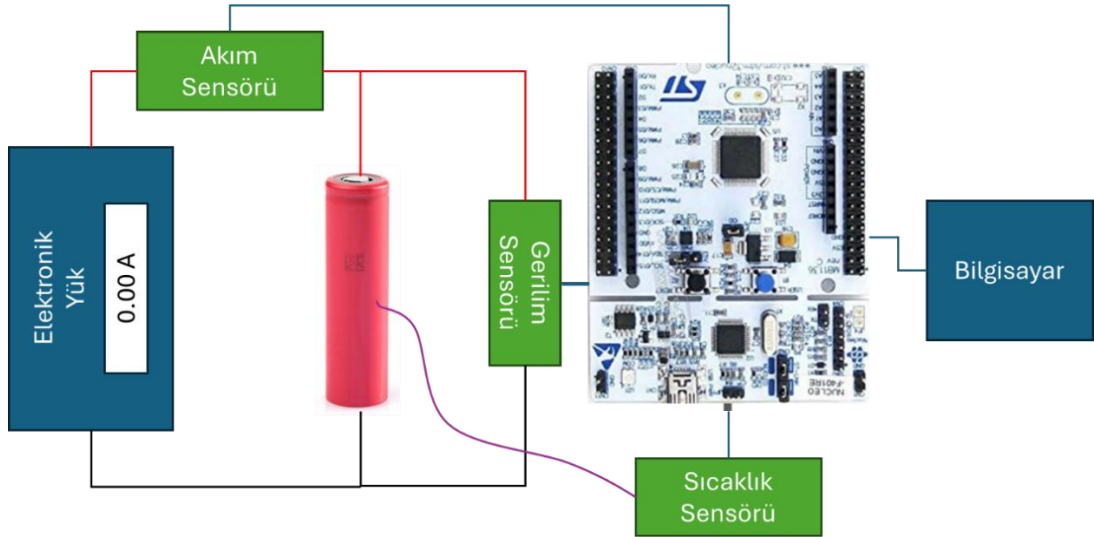
EŞDEĞER DEVRE MODELİ



SOC TAHMİN MODELİ

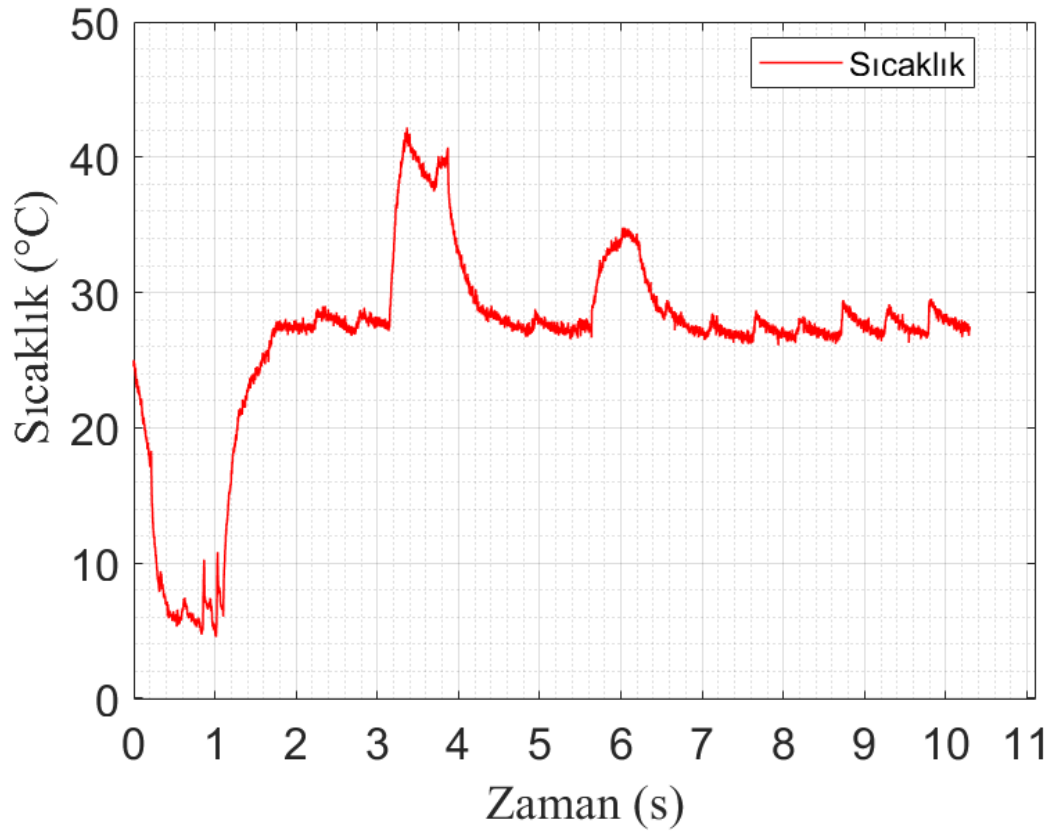


Şekil 4.25 : Batarya eşdeğer devre modeli ve UKF algoritmasının entegre edilmiş hali



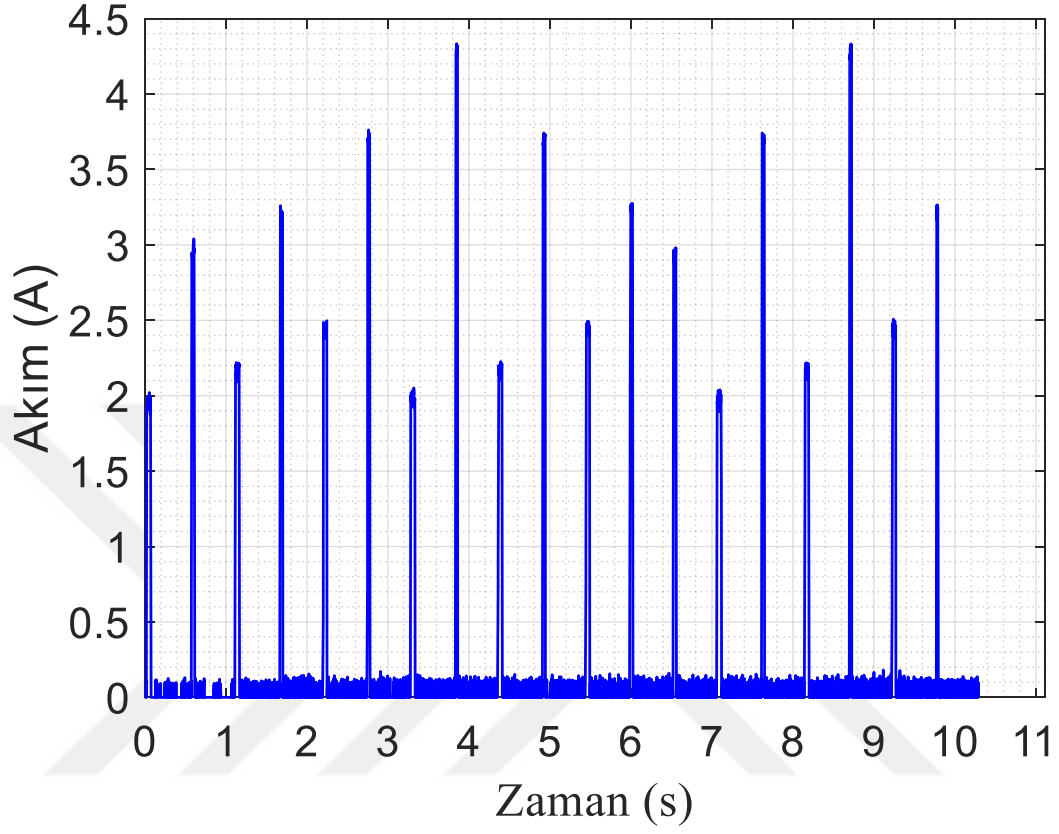
**Şekil 4.26 :** Deneysel doğrulama testi düzeneği prensip şeması

Algoritma başarı oranı doğrulama testi sırasında pilin farklı sıcaklık değerleri altındaki davranışına göre algoritmayı test etmek için Şekil 4.27’de verilen sıcaklık zaman grafiğinde gösterildiği gibi pilin sıcaklığı değiştirilmiştir.



**Şekil 4.27 :** Pil sıcaklık değişimi

Algoritma başarı oranı doğrulama testi sırasında pil farklı akım değerleri ile deşarj edilirken algoritmayı test etmek için Şekil 4.28’de verilen akım-zaman grafiğinde gösterildiği gibi pil belirli akım değerleri ile deşarj edilmiştir.



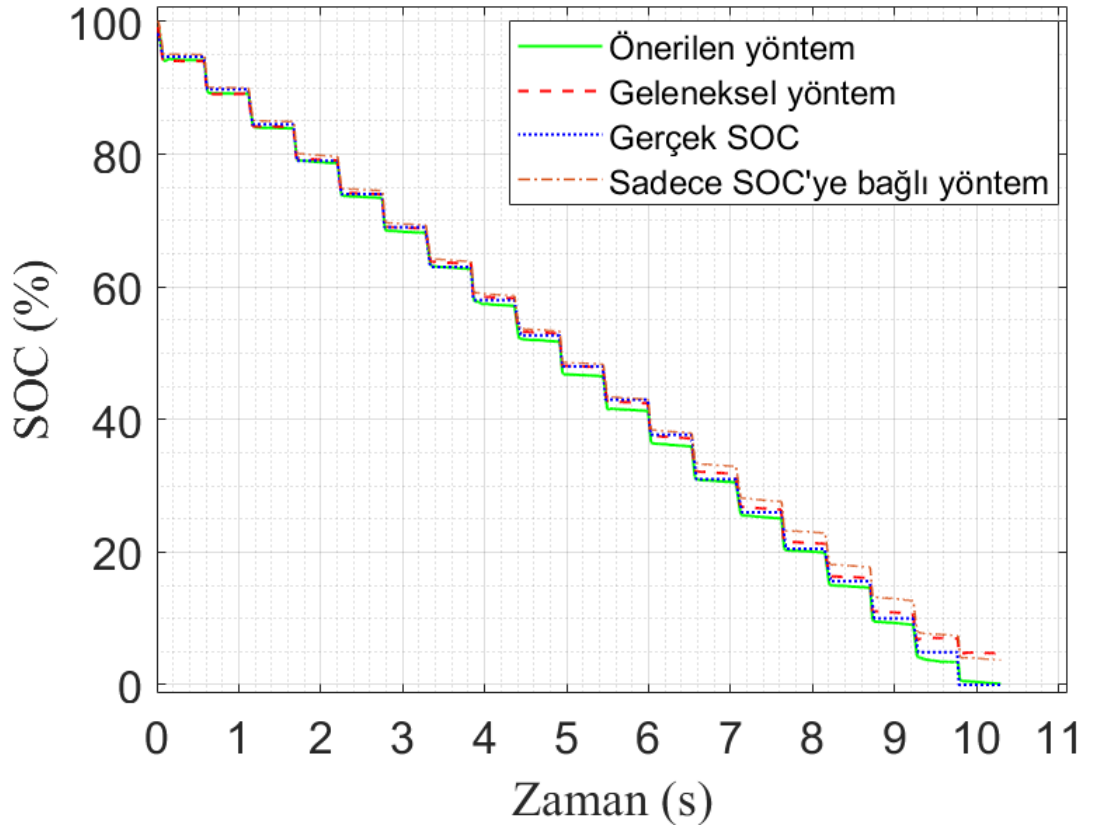
Şekil 4.28 : Deşarj akımı-zaman grafiği

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Devre parametrelerinin tahmin edilmesi için farklı sıcaklık ve akım değerleri koşullarında yapılan testlerin sonuçları toplanarak parametre tahmin algoritmasında kullanılmış ve tahmin edilen parametreler üç boyutlu grafik şeklinde sunulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman eşdeğere devre parametrelerinin hem sıcaklık hem de akım değişikliğinden oldukça etkilendiği görülmektedir.

1C, 1.5C, 2C akım oranları için eşdeğer devre parametreleri Ek A'da gösterilmiştir.

Algoritma doğrulama testleri, önerilen yöntemin başarısını ve verimliliğini kanıtlamaktadır. Bunu göstermek için sadece SoC'ye bağlı tahmin yöntemi, sıcaklık ve SoC'ye bağlı yöntem (geleneksel) ve önerilen yöntem karşılaştırılmıştır. Doğru başlangıç SoC değerine göre yapılan karşılaştırma sonuçları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



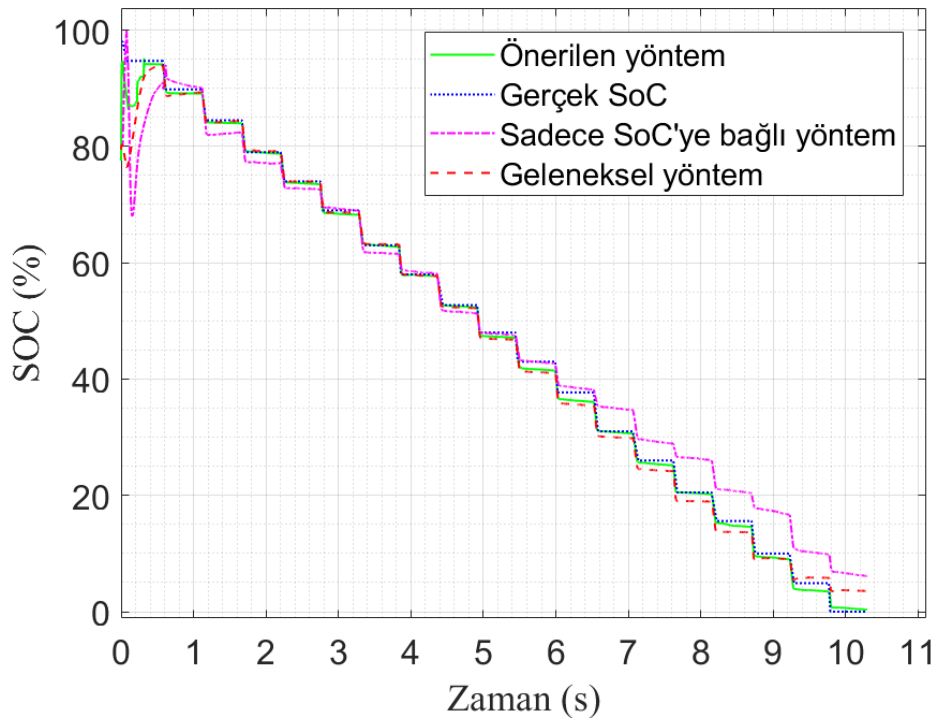
Şekil 5.1 : Doğru SoC başlangıç değeri ile yapılan test sonuçları

Karşılaştırması yapılan yöntemlerin en yüksek mutlak hata değerleri (MAE) ve etkin hata değerleri (RMSE) tabloda verilmiştir. Bütün algoritmalar aynı anda ve aynı koşullar altında geliştirme kartına yüklenerek test edilmişlerdir. Tablodaki veriler incelendiğinde önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre en düşük mutlak hata ve etkin hata değerine sahip olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemin RMSE'si %1'in altında kalırken MAE'si ise %3'ün altında kalmaktadır. Bu da önerilen yöntemin elektrikli araçlarda kullanımının uygun olacağını göstermektedir.

**Çizelge 5.1 :** SoC tahmin yöntemlerinin hata oranı karşılaştırması

| Yöntem                      | MAE (%) | RMSE (%) |
|-----------------------------|---------|----------|
| Sadece SoC 'ye bağlı yöntem | 5.61    | 0.91     |
| Geleneksel yöntem           | 3.42    | 0.64     |
| Önerilen yöntem             | 2.2     | 0.48     |

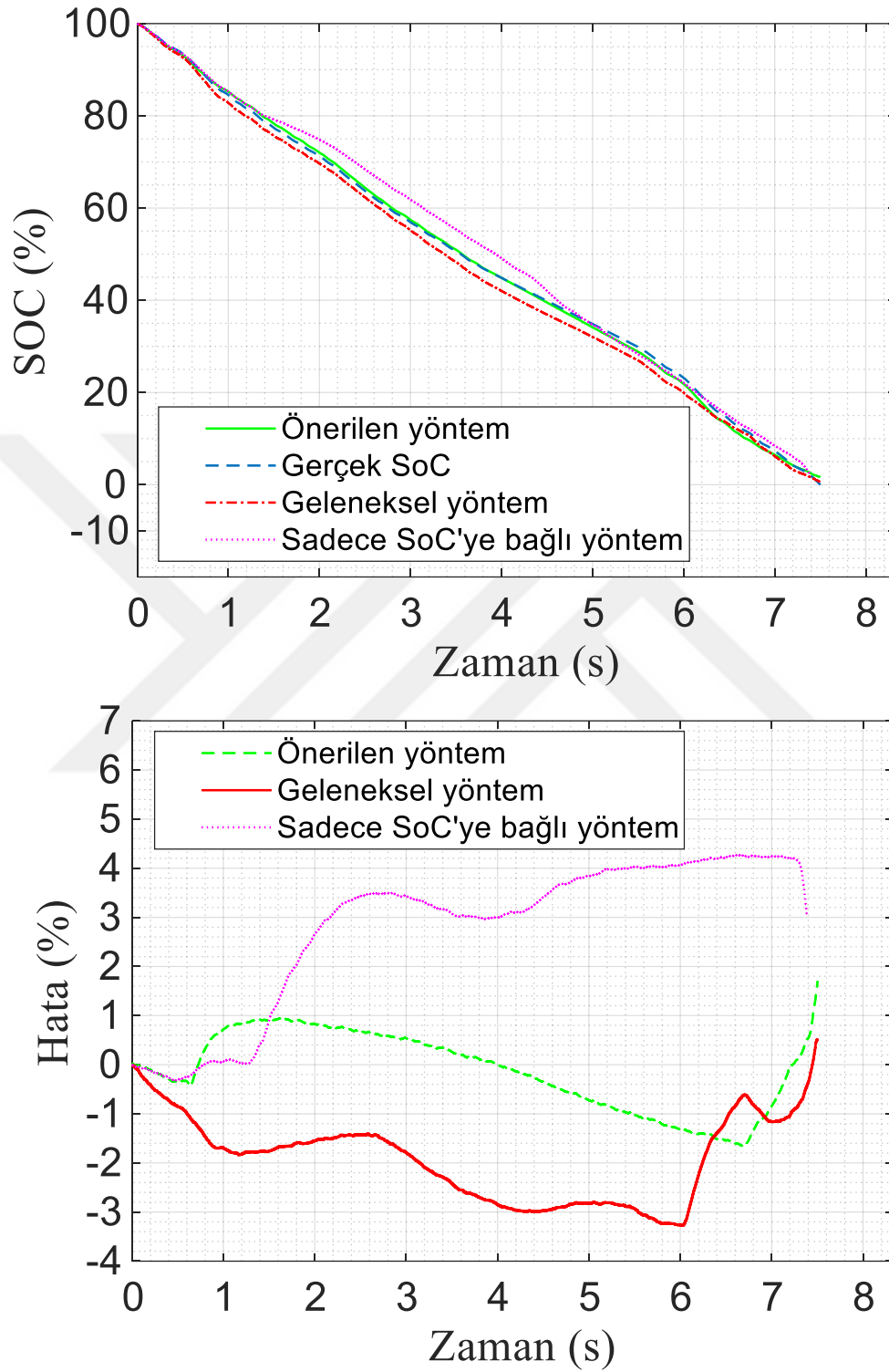
Şekil 5.2 sadece SoC ye bağlı yöntem, geleneksel yöntem ve önerilen yöntemin hatalı başlangıç SoC değeri ile test edilmesi koşulunda elde edilen sonuçları göstermektedir. Önerilen yöntem gerçek SoC değerine en hızlı şekilde düzeltme yapması ile diğer yöntemlerin önüne geçmektedir.



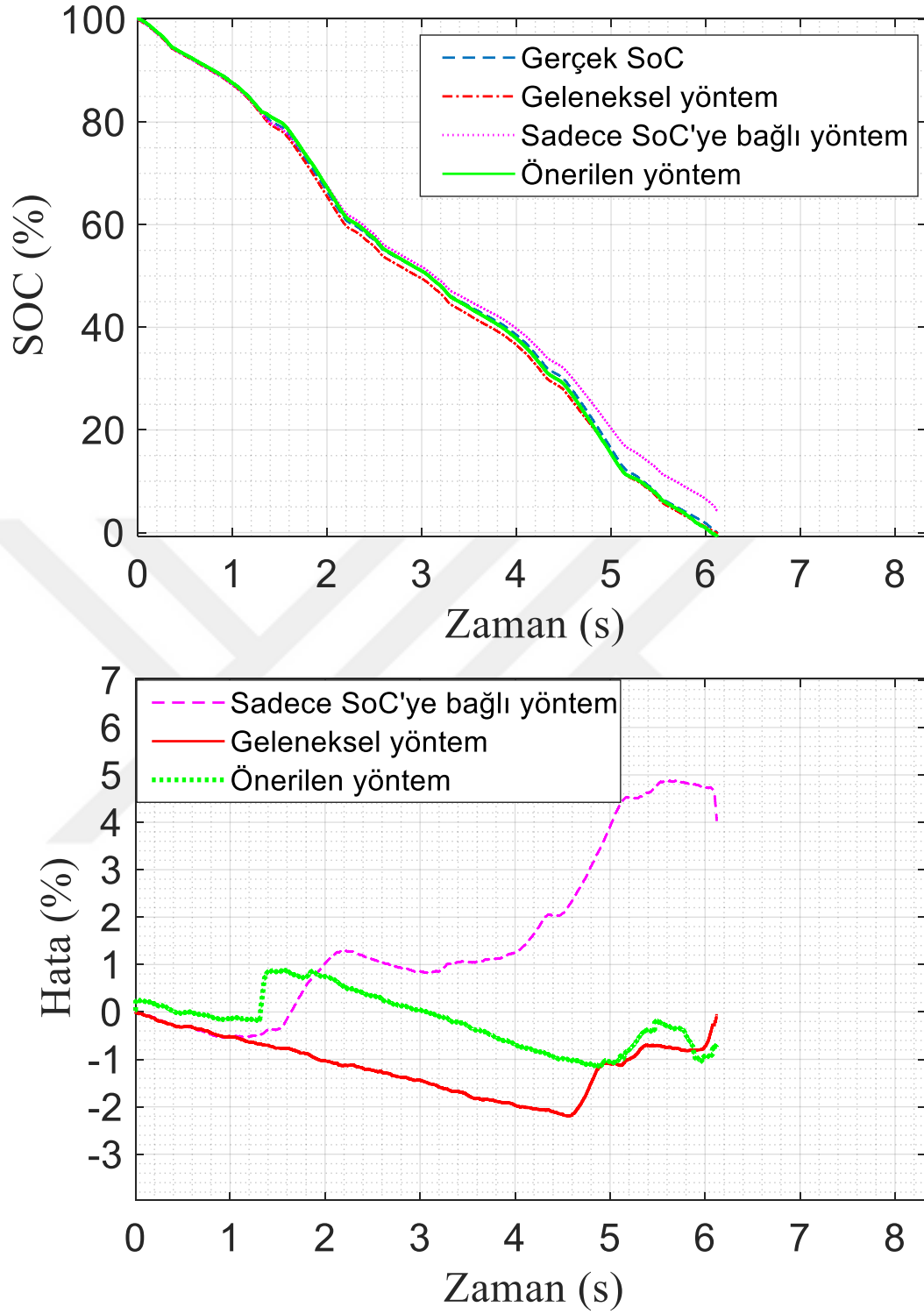
**Şekil 5.2 :** Hatalı SoC başlangıç değeri ile yapılan test sonuçları

Karşılaştırılan yöntemlerin UDDS ve HUDDS sürüş çevrimlerine göre SoC tahmin başarılarının test edilmesi amacıyla algoritmalar bu sürüş çevrimleri ile deşarj edilmiştir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 karşılaştırılan yöntemlerin sırasıyla UDDS ve

HUDDS çevrimlerine göre SoC tahmin başarısını göstermektedir. Her iki durumda da önerilen yöntem daha başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 5.3 : UDDS çevrimine göre yöntemlerin SoC tahmin başarıları



**Şekil 5.4 :** HUDDS çevrimine göre yöntemlerin SoC tahmin başarıları

UDDS sürüş çevrimi test sonuçlarına göre sadece SoC'ye bağlı yöntemde %4.2, geleneksel yöntemde %3.22 ve önerilen yöntemde %1.75 oranında en yüksek mutlak hata gözlemlenmiştir. HUDDS sürüş çevrimi test sonuçlarına göre SoC'ye bağlı

yöntemde %4,8, geleneksel yöntemde %2.19 ve önerilen yöntemde %1.14 oranında en yüksek mutlak hata hesaplanmıştır.

Gerilim ölçümü doğruluğu UKF tabanlı SoC tahmin yöntemlerinde kilit rol oynamaktadır. Gerilim sensöründen kaynaklanan küçük bir ölçüm hatası SoC tahmininde büyük bir etki yaratabilmektedir. Şekilde karakteristik bir SoC-OCV eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri incelendiğinde %20 \* %50 SoC aralığında eğri eğiminin çok az olduğu görülürken, %0'a yakın bölgede ise eğrinin dikleştiği görülmektedir. Eğrinin dik olduğu yani belirli bir SoC diliminde gerilim farkının yüksek olduğu bölgelerde SoC tahmin doğruluğu daha fazla olurken gerilim değişiminin düşük olduğu bölgelerde tahmin hatası yüksek olmaktadır. Şekil 5.2 ve 5.4'te görüldüğü üzere deşarj döngüsünün sonunda gerilim varyansı yüksek olduğu için önerilen yöntem bu bölgede SoC tahminini düzeltmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında akım ve sıcaklığa bağlı SoC tahmini yapmak için UKF algoritması ile çalışan bir SoC tahmin yöntemi önerilmiştir. Çalışmada üçüncü dereceden bir eşdeğer devre modeli tasarlanmış ve parametre tahmini için üç değişkenli (Akım, SoC, Sıcaklık) arama tabloları kullanılmıştır. Çalışmanın başarısını gözlemlemek için hem benzetim çalışması yapılmış hem de önerilen yöntem bir gerçek bir devre üzerinde uygulanmıştır. Elektrikli araçların maruz kaldığı farklı senaryolar altında önerilen yöntemin başarısını gözlemlemek amacıyla önerilen algoritma UDDS ve HUDDS sürüş çevrimleri ile test edilmiştir.

Hem benzetim çalışmasının sonuçları hem de deneysel doğrulama testlerinin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda MAE ve RMSE hata oranları önerilen yöntemin geleneksel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Önerilen yöntemi elektrikli araçlar için kritik bir konu olan SoC tahmini gerekliliklerini sağlayarak elektrikli araçlarda uygulanabilir bir yöntem olarak literatüre geçmiştir. Önerilen yöntem hem hatalı başlangıç SoC değeri hem de doğru başlangıç SoC değeri koşullarında test edilerek gerçek uygulamalarda karşılaşılabilecek senaryolar test edilerek önerilen yöntemin başarısı gözlemlenmiştir. Bu şartlar altında önerilen yöntem, geleneksel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar sergilemiştir, özellikle hatalı başlangıç SoC durumunda tahmin düzeltmesini diğer yöntemlerden daha hızlı yaparak gerçek SoC değerine erken yaklaşması önerilen yöntemi öne çıkarmıştır.

Önerilen yöntem gerçek devre üzerinde deneysel olarak test edilirken farklı sıcaklık ve akım koşullarına maruz bırakılarak yöntemin farklı çevresel ve elektriksel koşullardaki davranışı gözlemlenmiştir. Sıcaklık ve akım değişimlerine rağmen önerilen algoritma geleneksel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Önerilen çalışmanın geliştirilmesi ve daha geniş uygulamalarda kullanılabilmesi için Histerezis faktörü göz önünde bulundurularak daha gelişmiş bir tahmin algoritması geliştirilebilir. SoC tahminini önemli ölçüde etkileyen yaşlanma faktörü hesaba

katılırsa algoritma daha gelişmiş bir hal alır ancak aynı zamanda karmaşıklık artar. Uygulanabilir bir yöntem elde edebilmek için karmaşıklık ve doğruluk oranı dengesi iyi hesaplanmalıdır. Ayrıca önerilen yöntemin doğruluk oranının artırılması için gelecek çalışmalarda veriye dayalı yöntemler ile birlikte hibrit yöntemler kullanılabilir ve literatürdeki diğer veriye dayalı yöntemlerle karşılaştırma yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Zhang, Z., Jiang, L., Zhang, L., & Huang, C. (2021). State-of-charge estimation of lithium-ion battery pack by using an adaptive extended Kalman filter for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 37, 102457..
- [2] Li, Y., Wang, C., & Gong, J. (2016). A combination Kalman filter approach for State of Charge estimation of lithium-ion battery considering model uncertainty. *Energy*, 109, 933–946.
- [3] Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652.
- [4] Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., & Kay, M. (2018). Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 109–125.
- [5] Xu, Z., Wang, J., Fan, Q., Lund, P. D., & Hong, J. (2020). Improving the state of charge estimation of reused lithium-ion batteries by abating hysteresis using machine learning technique. *Journal of Energy Storage*, 32, 101678.
- [6] Sun, D., Yu, X., Wang, C., Zhang, C., Huang, R., Zhou, Q., Amietszajew, T., & Bhagat, R. (2021). State of charge estimation for lithium-ion battery based on an Intelligent Adaptive Extended Kalman Filter with improved noise estimator. *Energy*, 214, 119025.
- [7] Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015.
- [8] Hu, X., Feng, F., Liu, K., Zhang, L., Xie, J., & Liu, B. (2019). State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109334.
- [9] Yang, N., Zhang, X., & Li, G. (2015). State of charge estimation for pulse discharge of a LiFePO<sub>4</sub> battery by a revised Ah counting. *Electrochimica Acta*, 151, 63–71.
- [10] Zheng, Y., Ouyang, M., Han, X., Lu, L., & Li, J. (2018). Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 377, 161–188.
- [11] Xing, Y., He, W., Pecht, M., & Tsui, K. L. (2014). State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 113, 106–115.

- [12] **Zheng, F., Xing, Y., Jiang, J., Sun, B., Kim, J., & Pecht, M.** (2016). Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 183, 513–525.
- [13] **Tong, S., Lacap, J. H., & Park, J. W.** (2016). Battery state of charge estimation using a load-classifying neural network. *Journal of Energy Storage*, 7, 236–243.
- [14] **Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Ayob, A., Saad, M. H. M., Karim, T. F., & How, D. N. T.** (2020). Data-driven state of charge estimation of lithium-ion batteries: Algorithms, implementation factors, limitations and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124110.
- [15] **Li, W., Fan, Y., Ringbeck, F., Jöst, D., Han, X., Ouyang, M., & Sauer, D. U.** (2020). Electrochemical model-based state estimation for lithium-ion batteries with adaptive unscented Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 476, 228534.
- [16] **Xuan, D.-J., Shi, Z., Chen, J., Zhang, C., & Wang, Y.-X.** (2020). Real-time estimation of state-of-charge in lithium-ion batteries using improved central difference transform method. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119787.
- [17] **Wu, M., Qin, L., Wu, G., Huang, Y., & Shi, C.** (2021). State of charge estimation of power lithium-ion battery based on a variable forgetting factor adaptive Kalman filter. *Journal of Energy Storage*, 41, 102841.
- [18] **Zhang, S., & Zhang, X.** (2022). A novel non-experiment-based reconstruction method for the relationship between open-circuit-voltage and state-of-charge/state-of-energy of lithium-ion battery. *Electrochimica Acta*, 403, 139637.
- [19] **Xu, X., Xu, Z., Wang, T., Xu, J., & Pei, L.** (2022). Open-circuit voltage curve reconstruction for degrading lithium-ion batteries utilizing discrete curve fragments from an online dataset. *Journal of Energy Storage*, 56, 106003.
- [20] **Huang, W., & Qahouq, J. A. A.** (2014). An online battery impedance measurement method using DC–DC power converter control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 5987–5995.
- [21] **How, D. N. T., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., & Ker, P. J.** (2019a). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *Ieee Access*, 7, 136116–136136.
- [22] **Manoharan, A., Begam, K. M., Aparow, V. R., & Sooriamoorthy, D.** (2022). Artificial Neural Networks, Gradient Boosting and Support Vector Machines for electric vehicle battery state estimation: A review. *Journal of Energy Storage*, 55, 105384.
- [23] **Chaoui, H., & Ibe-Ekeocha, C. C.** (2017). State of charge and state of health estimation for lithium batteries using recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(10), 8773–8783.
- [24] **Singh, P., Vinjamuri, R., Wang, X., & Reisner, D.** (2006). Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion

- batteries used in portable defibrillators. *Journal of Power Sources*, 162(2), 829–836.
- [25] **Wang, Z., Feng, G., Zhen, D., Gu, F., & Ball, A.** (2021). A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Reports*, 7, 5141–5161.
  - [26] **Chen, L., Yu, W., Cheng, G., & Wang, J.** (2023). State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on fractional-order modeling and adaptive square-root cubature Kalman filter. *Energy*, 271, 127007.
  - [27] **Li, K., Zhou, F., Chen, X., Yang, W., Shen, J., & Song, Z.** (2023). State-of-charge estimation combination algorithm for lithium-ion batteries with Frobenius-norm-based QR decomposition modified adaptive cubature Kalman filter and H-infinity filter based on electro-thermal model. *Energy*, 263, 125763.
  - [28] **Sepasi, S., Ghorbani, R., & Liaw, B. Y.** (2014). Improved extended Kalman filter for state of charge estimation of battery pack. *Journal of Power Sources*, 255, 368–376.
  - [29] **Yun, X., Zhang, X., Wang, C., & Fan, X.** (2023). Online parameters identification and state of charge estimation for lithium-ion batteries based on improved central difference particle filter. *Journal of Energy Storage*, 70, 107987.
  - [30] **Tian, Y., Li, D., Tian, J., & Xia, B.** (2017). State of charge estimation of lithium-ion batteries using an optimal adaptive gain nonlinear observer. *Electrochimica Acta*, 225, 225–234.
  - [31] **Ding, Q., Wang, Y., & Chen, Z.** (2022). Parameter identification of reduced-order electrochemical model simplified by spectral methods and state estimation based on square-root cubature Kalman filter. *Journal of Energy Storage*, 46, 103828.
  - [32] **Chen, Z., Yang, L., Zhao, X., Wang, Y., & He, Z.** (2019). Online state of charge estimation of Li-ion battery based on an improved unscented Kalman filter approach. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 532–544.
  - [33] **Campestrini, C., Heil, T., Kosch, S., & Jossen, A.** (2016). A comparative study and review of different Kalman filters by applying an enhanced validation method. *Journal of Energy Storage*, 8, 142–159.
  - [34] **He, H., Qin, H., Sun, X., & Shui, Y.** (2013). Comparison study on the battery SoC estimation with EKF and UKF algorithms. *Energies*, 6(10), 5088–5100.
  - [35] **Choi, E., & Chang, S.** (2020). A temperature-dependent state of charge estimation method including hysteresis for lithium-ion batteries in hybrid electric vehicles. *Ieee Access*, 8, 129857–129868.
  - [36] **Fonseca, J. M. L., Kulothungan, G. S., Raj, K., & Rajashekara, K.** (2020). A novel state of charge dependent equivalent circuit model parameter offline estimation for lithium-ion batteries in grid energy storage applications. *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1–8.

- [37] **Enang, W., & Bannister, C.** (2017). Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1210–1239.
- [38] **Ehsani, M., Gao, Y., & Miller, J. M.** (2007). Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 719–728.
- [39] **Yang, Y., Hu, X., Pei, H., & Peng, Z.** (2016). Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: Dynamic programming approach. *Applied Energy*, 168, 683–690.
- [40] **Josevski, M., & Abel, D.** (2014). Energy management of parallel hybrid electric vehicles based on stochastic model predictive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 2132–2137.
- [41] **Tian, X., Cai, Y., Sun, X., Zhu, Z., & Xu, Y.** (2019). An adaptive ECMS with driving style recognition for energy optimization of parallel hybrid electric buses. *Energy*, 189, 116151.
- [42] **Bayindir, K. Ç., Gözükcük, M. A., & Teke, A.** (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1305–1313.
- [43] **Pramuanjaroenkij, A., & Kakaç, S.** (2023). The fuel cell electric vehicles: The highlight review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(25), 9401–9425.
- [44] **Pramuanjaroenkij, A., Kakaç, S., & Zhou, X. Y.** (2008). Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells. *Springer*.
- [45] **Nikowitz, M.** (2016). Advanced hybrid and electric vehicles. *System Optimization and Vehicle Integration*, Springer, 2016.
- [46] **Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T.** (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058–4084.
- [47] **Garche, J., Karden, E., Moseley, P. T., & Rand, D. A. J.** (2017). Lead-acid batteries for future automobiles. *Elsevier*.
- [48] **Rand, D. A. J., & Moseley, P. T.** (2009). SECONDARY BATTERIES—LEAD—ACID SYSTEMS| Overview. *Elsevier*
- [49] **Hariprakash, B., Shukla, A. K., & Venugoplan, S.** (2009). Secondary batteries—nickel systems| nickel—metal hydride: Overview. *Elsevier*
- [50] **Wang, J., Ge, B., Li, H., Yang, M., Wang, J., Liu, D., Fernandez, C., Chen, X., & Peng, Q.** (2021). Challenges and progresses of lithium-metal batteries. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129739.
- [51] **Demir-Cakan, R., Palacin, M. R., & Croguennec, L.** (2019). Rechargeable aqueous electrolyte batteries: from univalent to multivalent cation chemistry. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(36), 20519–20539.
- [52] **Zhang, X., Yang, Y., & Zhou, Z.** (2020). Towards practical lithium-metal anodes. *Chemical Society Reviews*, 49(10), 3040–3071.

- [53] **Thackeray, M. M., Wolverton, C., & Isaacs, E. D.** (2012). Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5(7), 7854–7863.
- [54] **Robillard, C.** (2005). Lithium-metal-polymer batteries. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 1223–1227.
- [55] **Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., & Goodenough, J. B.** (1980).  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  ( $0 < x < 1$ ): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783–789.
- [56] **Winter, M., Moeller, K.-C., & Besenhard, J. O.** (2003). Carbonaceous and graphitic anodes. *Lithium Batteries: Science and Technology*, 145–194.
- [57] **Yang, X.-G., Liu, T., & Wang, C.-Y.** (2021). Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles. *Nature Energy*, 6(2), 176–185.
- [58] **Yamaki, J.** (2009). Secondary batteries—Lithium rechargeable systems—Lithium-ion| Overview. *Elsevier*
- [59] **Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M., & Sauer, D. U.** (2020). Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications—Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage*, 31, 101656.
- [60] **Si, C., Liu, W., Chau, K. T., & Jiang, C.** (2022). Perspectives on Lithium-Based Batteries and Post-Lithium Batteries for Electric Vehicles. *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 1–6.
- [61] **Yu, T., Fu, J., Cai, R., Yu, A., & Chen, Z.** (2017). Nonprecious electrocatalysts for Li-air and Zn-air batteries: Fundamentals and recent advances. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 11(3), 29–55.
- [62] **Tan, W. K., Kawamura, G., Muto, H., & Matsuda, A.** (2021). Current progress in the development of Fe-air batteries and their prospects for next-generation batteries. *Sustainable Materials for Next Generation Energy Devices*, 59–83.
- [63] **Wang, H.-F., & Xu, Q.** (2019). Materials design for rechargeable metal-air batteries. *Matter*, 1(3), 565–595
- [64] **Sun, W., Wang, F., Zhang, B., Zhang, M., Küpers, V., Ji, X., Theile, C., Bieker, P., Xu, K., & Wang, C.** (2021). A rechargeable zinc-air battery based on zinc peroxide chemistry. *Science*, 371(6524), 46–51.
- [65] **Wei, S., Xu, S., Agrawal, A., Choudhury, S., Lu, Y., Tu, Z., Ma, L., & Archer, L. A.** (2016). A stable room-temperature sodium–sulfur battery. *Nature Communications*, 7(1), 11722.
- [66] **Sudworth, J. L.** (2001). The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. *Journal of Power Sources*, 100(1–2), 149–163.
- [67] **Li, G., Lu, X., Kim, J. Y., Meinhardt, K. D., Chang, H. J., Canfield, N. L., & Sprenkle, V. L.** (2016). Advanced intermediate temperature

sodium–nickel chloride batteries with ultra-high energy density. *Nature Communications*, 7(1), 10683.

- [68] **Senthil, C., Park, J. W., Shaji, N., Sim, G. S., & Lee, C. W.** (2022). Biomass seaweed-derived nitrogen self-doped porous carbon anodes for sodium-ion batteries: Insights into the structure and electrochemical activity. *Journal of Energy Chemistry*, 64, 286–295.
- [69] **Guo, Q., Zeng, W., Liu, S.-L., Li, Y.-Q., Xu, J.-Y., Wang, J.-X., & Wang, Y.** (2021). Recent developments on anode materials for magnesium-ion batteries: a review. *Rare Metals*, 40(2), 290–308.
- [70] **Konarov, A., Voronina, N., Jo, J. H., Bakenov, Z., Sun, Y.-K., & Myung, S.-T.** (2018). Present and future perspective on electrode materials for rechargeable zinc-ion batteries. *ACS Energy Letters*, 3(10), 2620–2640.
- [71] **Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvart-Moynot, V., & Huet, F.** (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178–192.
- [72] **Narasipuram, R. P., & Mopidevi, S.** (2021). A technological overview & design considerations for developing electric vehicle charging stations. *Journal of Energy Storage*, 43, 103225.
- [73] **Hoque, M. M., Hannan, M. A., & Mohamed, A.** (2016). Voltage equalization control algorithm for monitoring and balancing of series connected lithium-ion battery. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(2).
- [74] **Rozaqi, L., Rijanto, E., & Kanarachos, S.** (2017). Comparison between RLS-GA and RLS-PSO for Li-ion battery SOC and SOH estimation: a simulation study. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 8(1), 40–49.
- [75] **Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H., & Sun, F.** (2017). Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. *Ieee Access*, 6, 1832–1843.
- [76] **Hoque, M. M., Hannan, M. A., & Mohamed, A.** (2017). Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(4), 267–277.
- [77] **Chen, H., Zhang, L., & Han, Y.** (2014). System-theoretic analysis of a class of battery equalization systems: Mathematical modeling and performance evaluation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1445–1457.
- [78] **Zhang, P., Yan, F., & Du, C.** (2015). A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 88–104.
- [79] **Tian, J., Xiong, R., & Yu, Q.** (2018). Fractional-order model-based incremental capacity analysis for degradation state recognition of

lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2), 1576–1584.

- [80] **Nyamathulla, S., & Dhanamjayulu, C.** (2024). A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations. *Journal of Energy Storage*, 86, 111179.
- [81] **Yüksek, G., & Alkaya, A.** (2023a). A novel state of health estimation approach based on polynomial model for lithium-ion batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(5), 100111.
- [82] **Lin, H., Kang, L., Xie, D., Linghu, J., & Li, J.** (2022). Online state-of-health estimation of lithium-ion battery based on incremental capacity curve and BP neural network. *Batteries*, 8(4), 29.
- [83] **Wang, Z., Zhao, X., Fu, L., Zhen, D., Gu, F., & Ball, A. D.** (2023). A review on rapid state of health estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103457.
- [84] **Demirci, O., Taskin, S., Schaltz, E., & Demirci, B. A.** (2024). Review of battery state estimation methods for electric vehicles-Part II: SOH estimation. *Journal of Energy Storage*, 96, 112703.
- [85] **Xiao, A., & Liu, W.** (2024). Review of SOH Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries. *2024 7th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE)*, 285–289.
- [86] **Yüksek, G., & Alkaya, A.** (2023b). A novel state of health estimation approach based on polynomial model for lithium-ion batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(5), 100111.
- [87] **Subramanian, V. R., Diwakar, V. D., & Tapriyal, D.** (2005). Efficient macro-micro scale coupled modeling of batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(10), A2002.
- [88] **Ahmed, R., El Sayed, M., Arasaratnam, I., Tjong, J., & Habibi, S.** (2014). Reduced-order electrochemical model parameters identification and soc estimation for healthy and aged li-ion batteries part i: Parameterization model development for healthy batteries. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 659–677.
- [89] **Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M.** (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288.
- [90] **D Andre, D., Appel, C., Soczka-Guth, T., & Sauer, D. U.** (2013). Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 224, 20–27.
- [91] **Wang, L., Wang, L., Liao, C., & Liu, J.** (2009). Sigma-point Kalman filter application on estimating battery SOC. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1592–1595.

- [92] Cui, Z., Hu, W., Zhang, G., Zhang, Z., & Chen, Z. (2022). An extended Kalman filter based SOC estimation method for Li-ion battery. *Energy Reports*, 8, 81–87. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.02.116>.
- [93] Jin, Y., Zhao, W., Li, Z., Liu, B., & Wang, K. (2021). SOC estimation of lithium-ion battery considering the influence of discharge rate. *Energy Reports*, 7, 1436–1446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.099>.
- [94] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., Wang, H., & Wang, W. (2018). State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles. *Energies*, 11(7), 1820.
- [95] Deng, H., Yang, L., & Deng, Z. W. (2018). Parameter identification and SOC estimation of lithium-ion battery based on electrochemical mechanism model. *J. Univ. Shanghai Sci. Technol*, 40, 557–565.
- [96] Huria, T., Ceraolo, M., Gazzarri, J., & Jackey, R. (2013). Simplified extended kalman filter observer for soc estimation of commercial power-oriented lfp lithium battery cells. *SAE Int.*.
- [97] Xiong, R., He, H., Sun, F., & Zhao, K. (2012). Online estimation of peak power capability of Li-ion batteries in electric vehicles by a hardware-in-loop approach. *Energies*, 5(5), 1455–1469.
- [98] He, H., Xiong, R., & Peng, J. (2016). Real-time estimation of battery state-of-charge with unscented Kalman filter and RTOS  $\mu$ COS-II platform. *Applied Energy*, 162, 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.120>.
- [99] Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J., Huria, T., & Ceraolo, M. (2013). *Battery model parameter estimation using a layered technique: an example using a lithium iron phosphate cell*. SAE Technical Paper.
- [100] Kumar, S., & Rao, S. K. (2023). State of Charge Estimation of Li-ion Battery Using Unscented Kalman Filter. *BioGecko Journal for New Zealand Herpetology*, 12(02).
- [101] Huang, C., Wang, Z., Zhao, Z., Wang, L., Lai, C. S., & Wang, D. (2018). Robustness evaluation of extended and unscented Kalman filter for battery state of charge estimation. *Ieee Access*, 6, 27617–27628.
- [102] Dong, G., Wei, J., Chen, Z., Sun, H., & Yu, X. (2017). Remaining dischargeable time prediction for lithium-ion batteries using unscented Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 364, 316–327.
- [103] Plett, G. L. (2006). Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1: Introduction and state estimation. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1356–1368.
- [104] Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. Bin, & Mekhilef, S. (2019). Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.040>.

- [105] **How, D. N. T., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., & Ker, P. J.** (2019b). State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review. *IEEE Access*, 7, 136116–136136. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942213>.
- [106] **Ge, Y. M., & Li, J.** (2018). Lithium-ion battery model parameter identification method and discharge simulation. *J. Ordnance Equip. Eng*, 39, 188–191.
- [107] **Ren, L., Zhu, G., Kang, J., Wang, J. V, Luo, B., Chen, C., & Xiang, K.** (2021). An algorithm for state of charge estimation based on a single-particle model. *Journal of Energy Storage*, 39, 102644.
- [108] **Klass, V., Behm, M., & Lindbergh, G.** (2012). Evaluating real-life performance of lithium-ion battery packs in electric vehicles. *ECS Transactions*, 41(32), 1.
- [109] **Ahmadian, A., Sedghi, M., Elkamel, A., Fowler, M., & Golkar, M. A.** (2018). Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2609–2624.
- [110] **S Bashash, S., Moura, S. J., Forman, J. C., & Fathy, H. K.** (2011). Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity. *Journal of Power Sources*, 196(1), 541–549.
- [111] **Selvaraj, V., & Vairavasundaram, I.** (2023). A comprehensive review of state of charge estimation in lithium-ion batteries used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 72, 108777.
- [112] **Harmoko, H., Prasetyo, D., Widayat, S. A., Amifia, L. K., Dewangga, B. R., Cahyadi, A. I., & Wahyunggoro, O.** (2016). Online battery parameter and open circuit voltage (OCV) estimation using recursive least square (RLS). *Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 15(01), 55–66.
- [113] **Plett, G. L.** (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background. *Journal of Power Sources*, 134(2), 252–261.
- [114] **Xiong, R., Sun, F., Chen, Z., & He, H.** (2014). A data-driven multi-scale extended Kalman filtering based parameter and state estimation approach of lithium-ion polymer battery in electric vehicles. *Applied Energy*, 113, 463–476.
- [115] **Xu, J., Mi, C. C., Cao, B., & Cao, J.** (2013). A new method to estimate the state of charge of lithium-ion batteries based on the battery impedance model. *Journal of Power Sources*, 233, 277–284.
- [116] **Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J.** (2018). State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, 6, 19362–19378.
- [117] **Kocić, J., Jovičić, N., & Drndarević, V.** (2018). Sensors and sensor fusion in autonomous vehicles. *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 420–425.

- [118] **Ali, M. U., Zafar, A., Nengroo, S. H., Hussain, S., Junaid Alvi, M., & Kim, H.-J.** (2019). Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation. *Energies*, 12(3), 446.
- [119] **Suykens, J. A. K.** (2001). Nonlinear modelling and support vector machines. *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No. 01CH 37188)*, 1, 287–294.
- [120] **Anton, J. C. A., Nieto, P. J. G., Viejo, C. B., & Vilán, J. A. V.** (2013). Support vector machines used to estimate the battery state of charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5919–5926.
- [121] **Wan, E. A., & Van Der Merwe, R.** (2000). The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)*, 153–158.
- [122] **Kottakki, K. K., Bhartiya, S., & Bhushan, M.** (2014). State estimation of nonlinear dynamical systems using nonlinear update based unscented Gaussian sum filter. *Journal of Process Control*, 24(9), 1425–1443.
- [123] **Alkaya, A.** (2014). Unscented Kalman filter performance for closed-loop nonlinear state estimation: a simulation case study. *Electrical Engineering*, 96, 299–308.
- [124] **Y Tian, Y., Xia, B., Sun, W., Xu, Z., & Zheng, W.** (2014). A modified model based state of charge estimation of power lithium-ion batteries using unscented Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 270, 619–626.
- [125] **Url-1** < [www.freeingenergy.com](http://www.freeingenergy.com) >, erişim tarihi 27.01.2025.

## **EKLER**

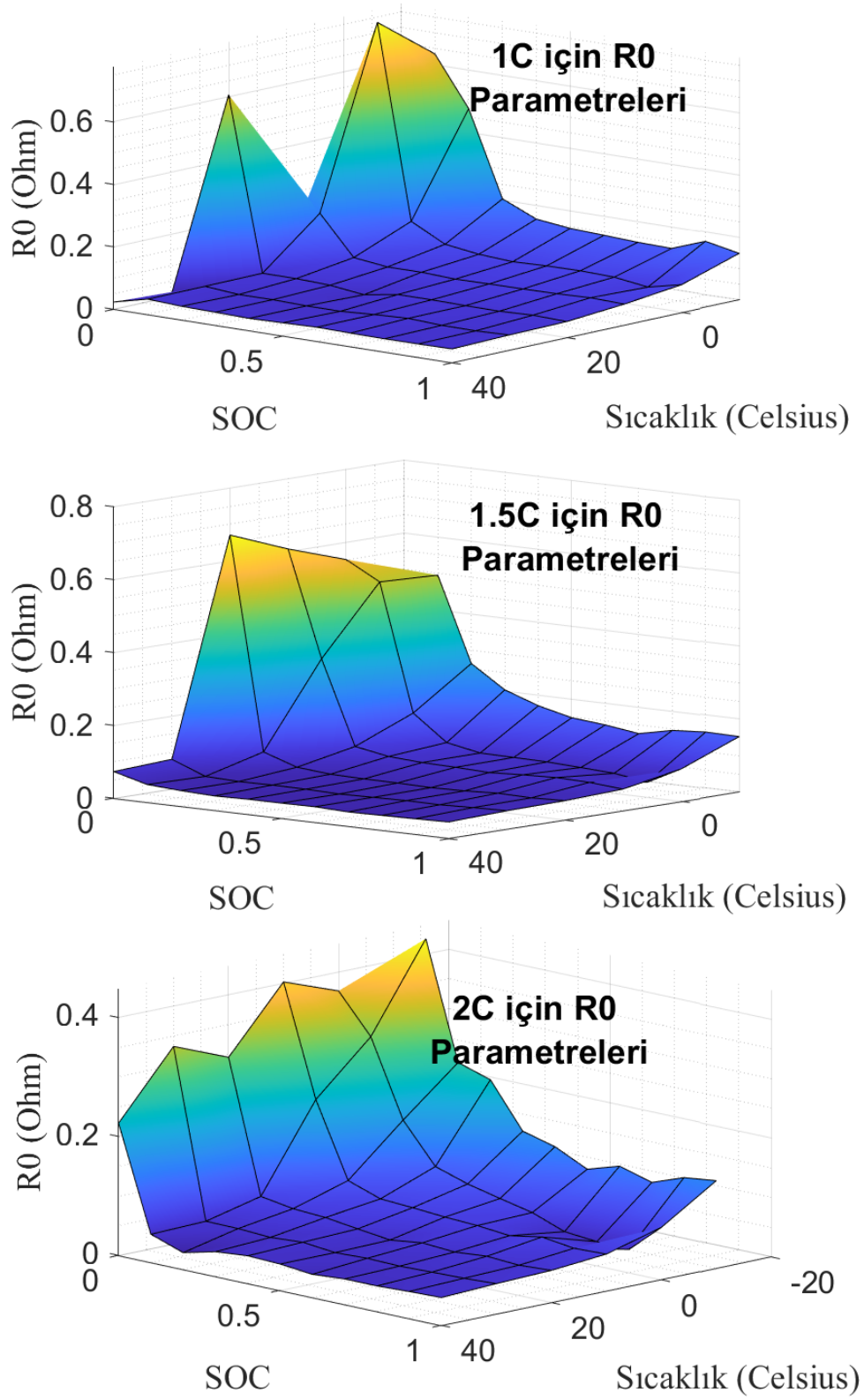
**EK A:** Batarya parametreleri

**EK B :** UKF Algoritma modeli

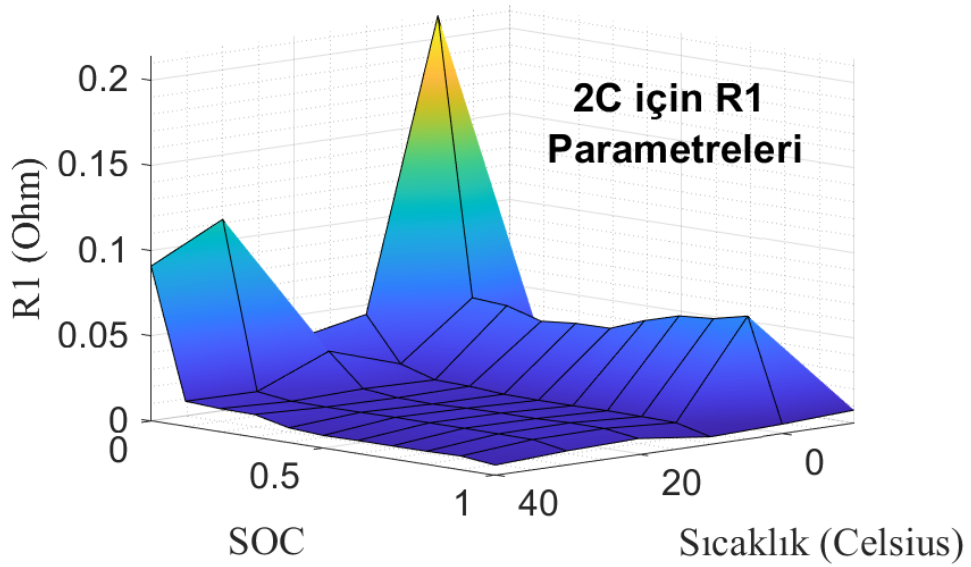
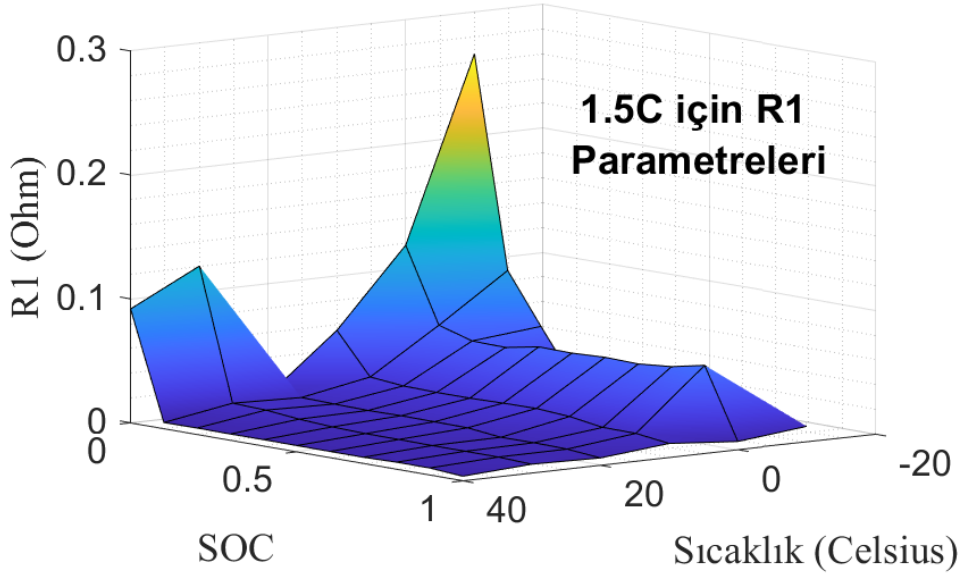
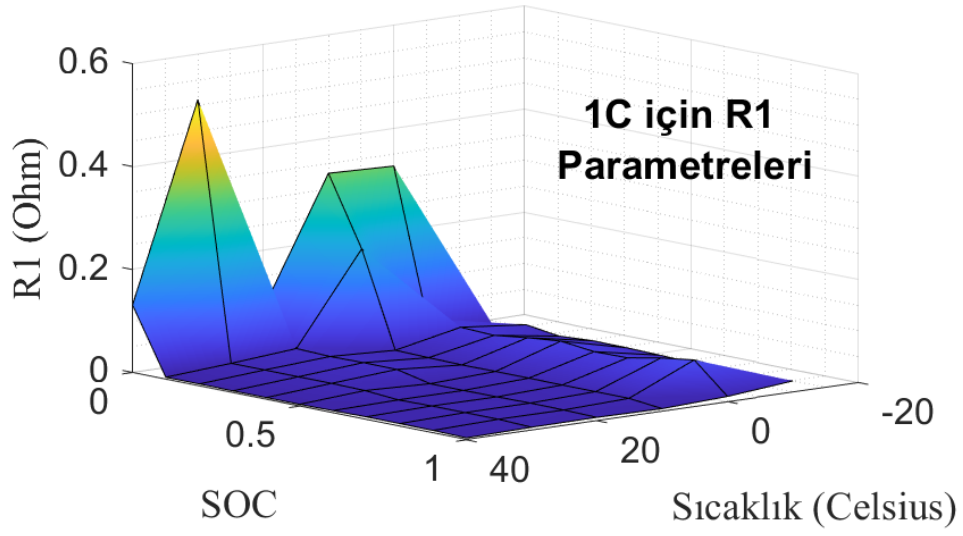
**EK C :** Farklı akım oranı ve sıcaklıklarda yapılan pil testi verileri



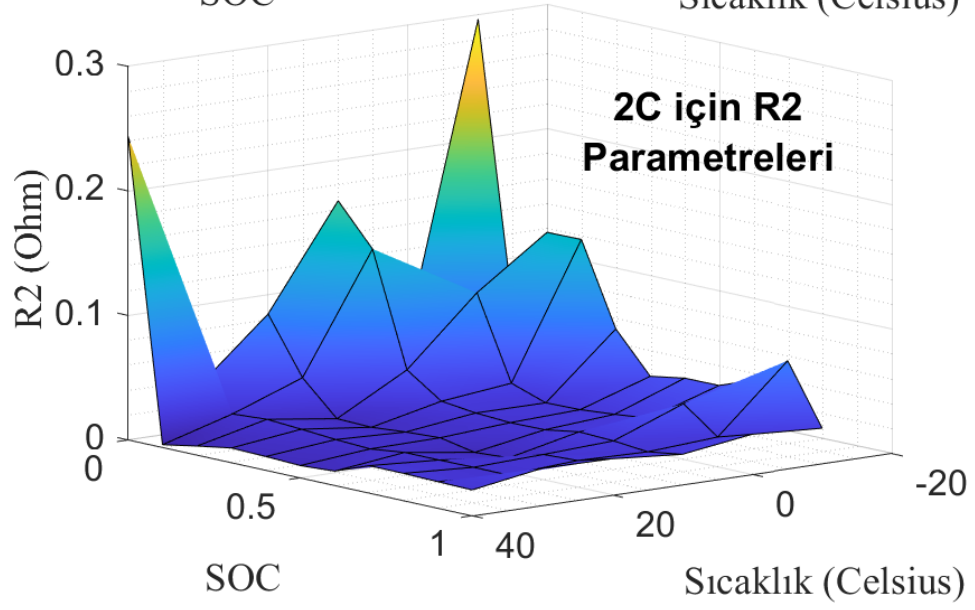
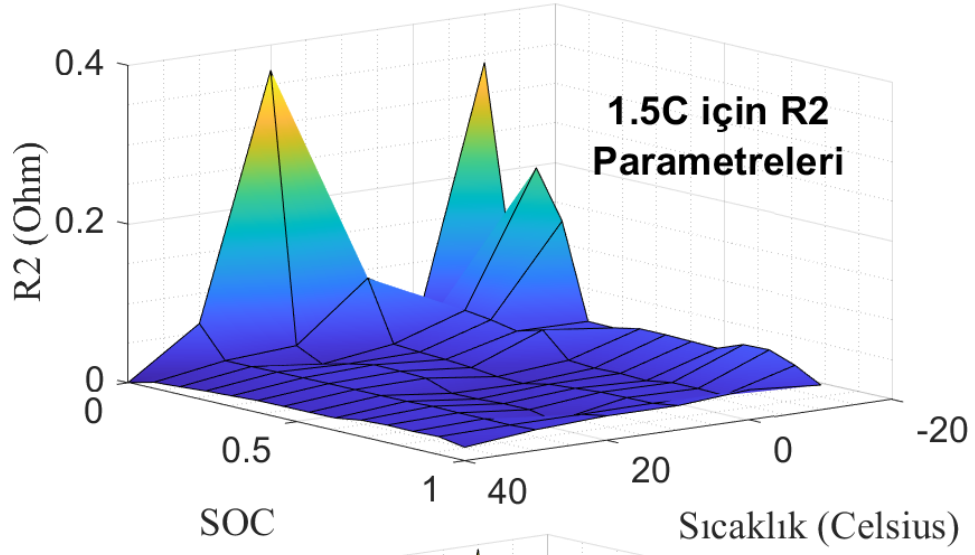
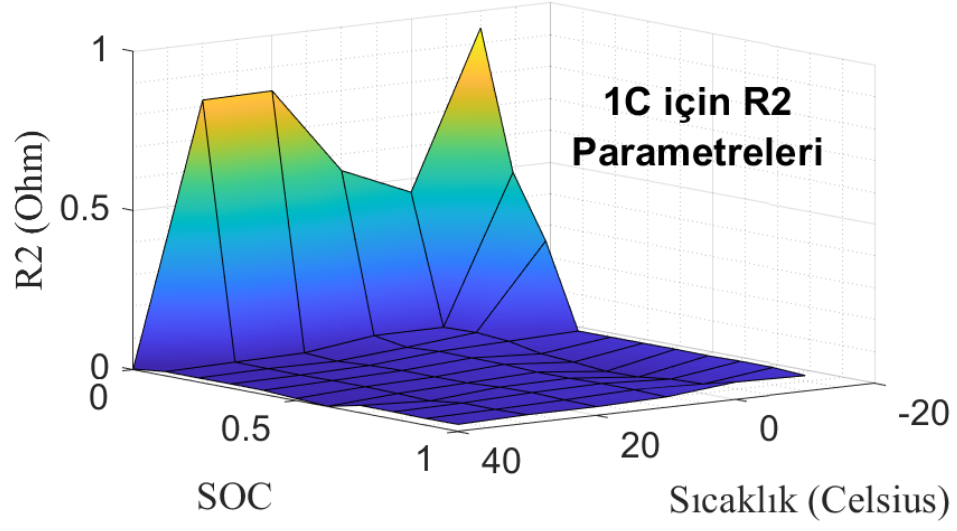
EK A



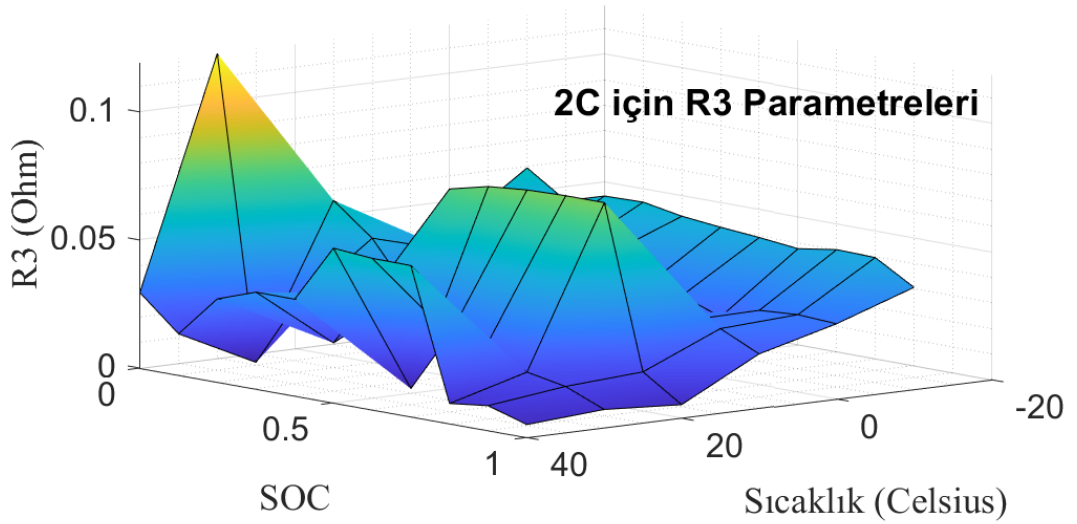
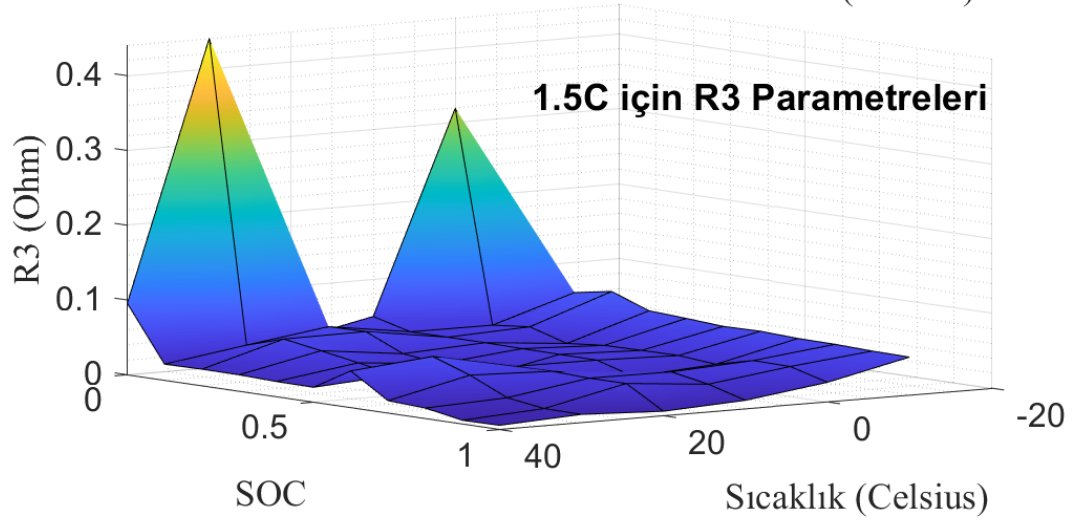
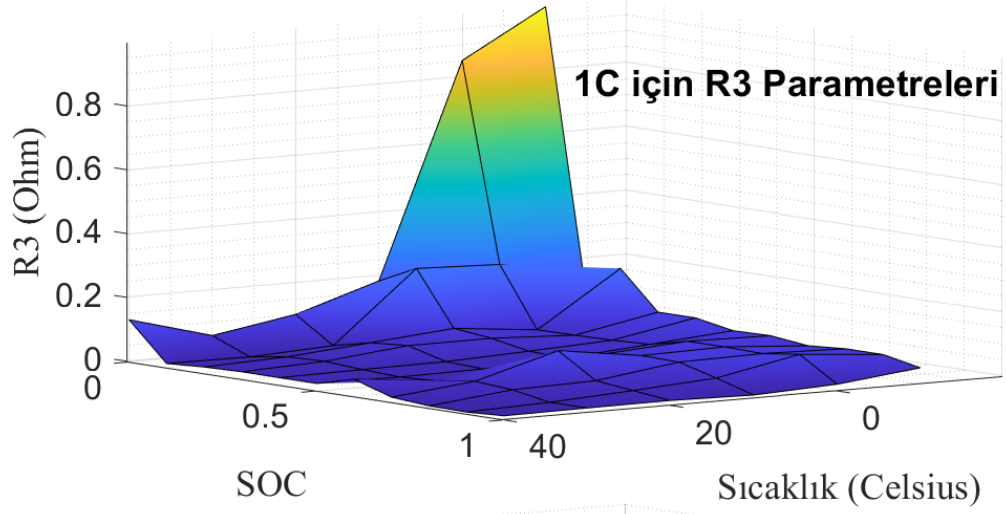
Şekil A.1 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için  $R_0$  parametreleri



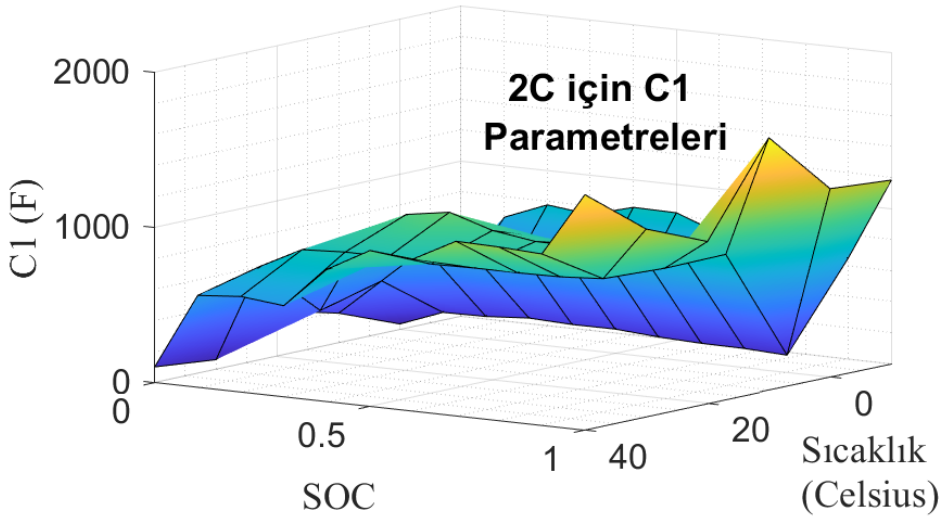
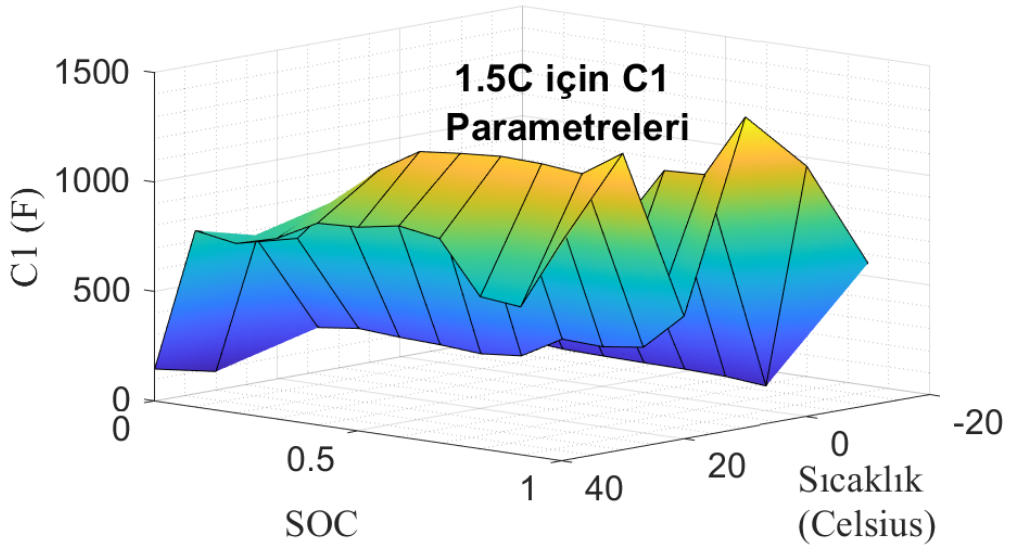
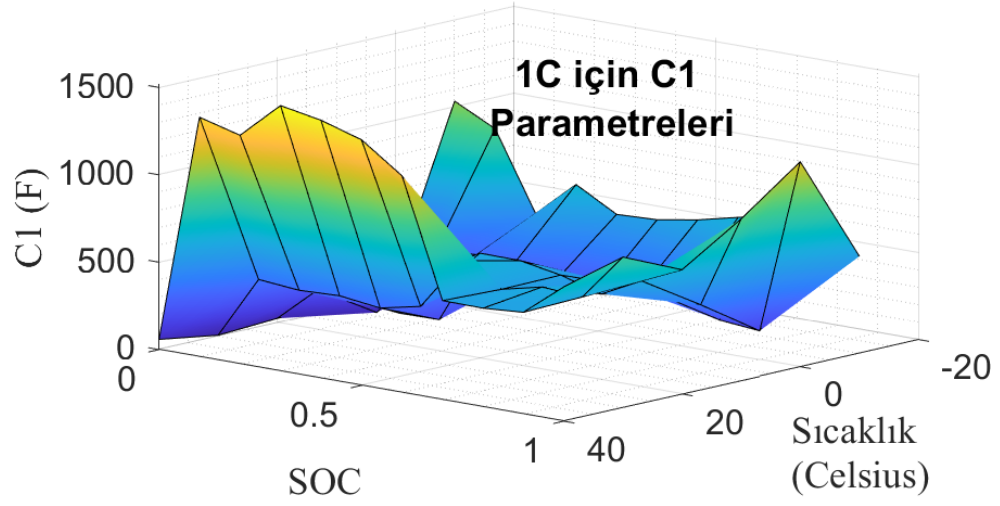
Şekil A.2 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R1 parametreleri



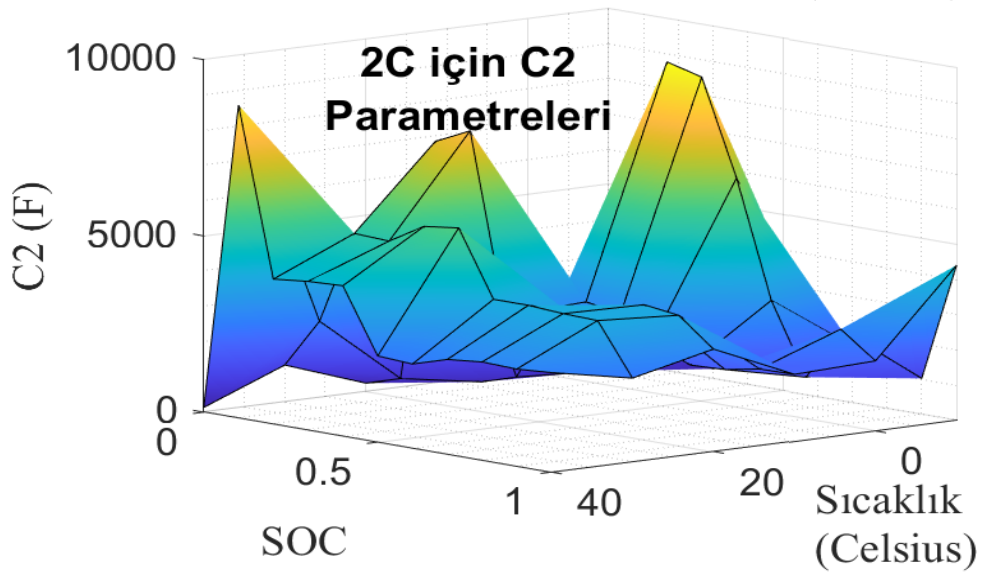
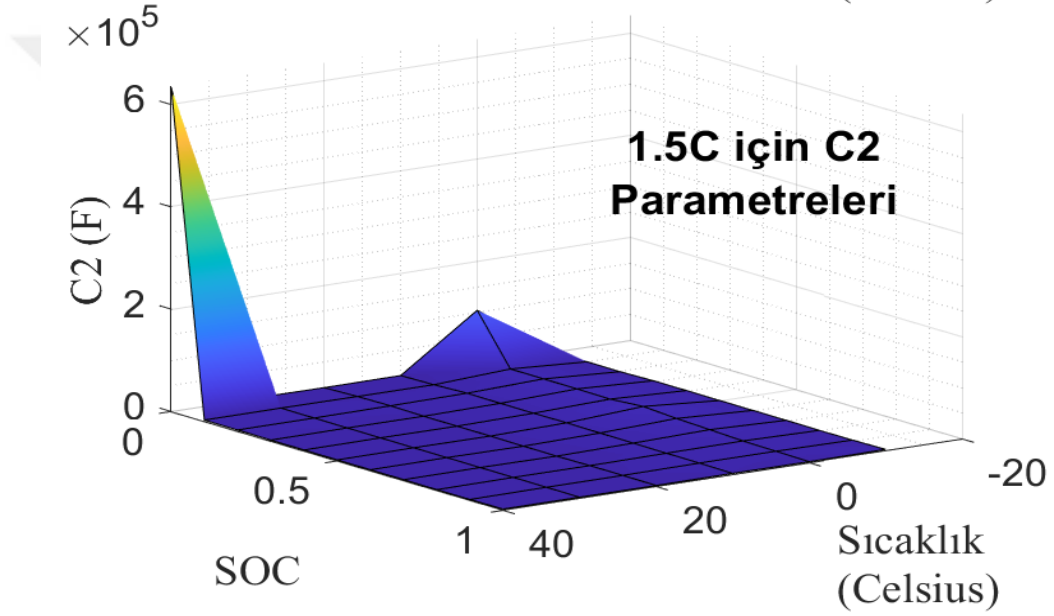
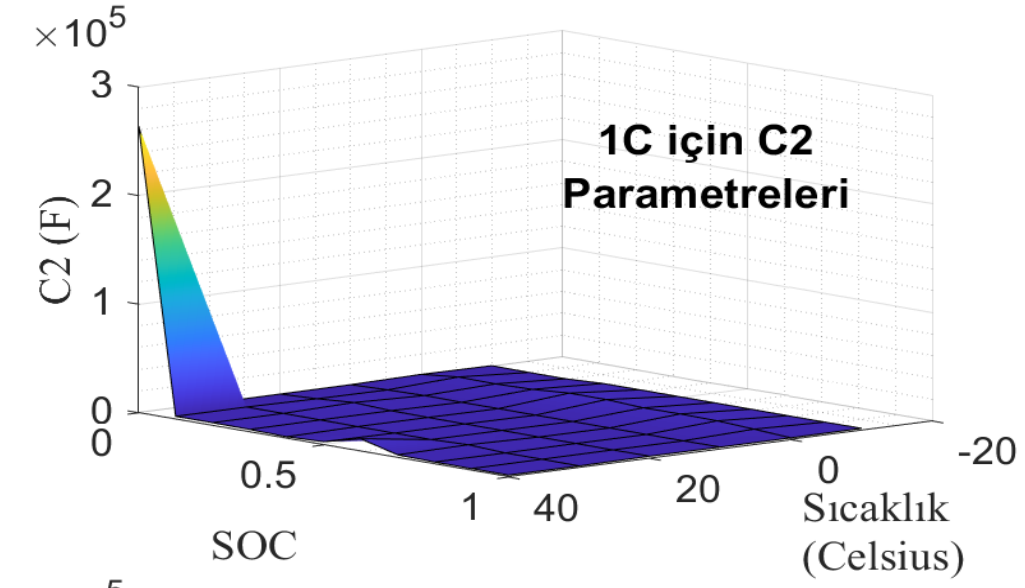
Şekil A.3 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R2 parametreleri



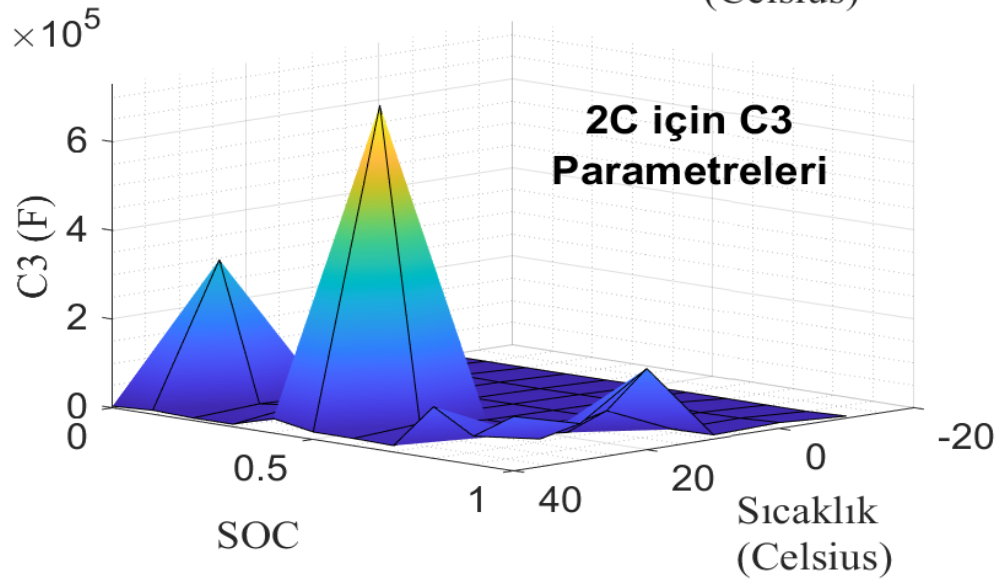
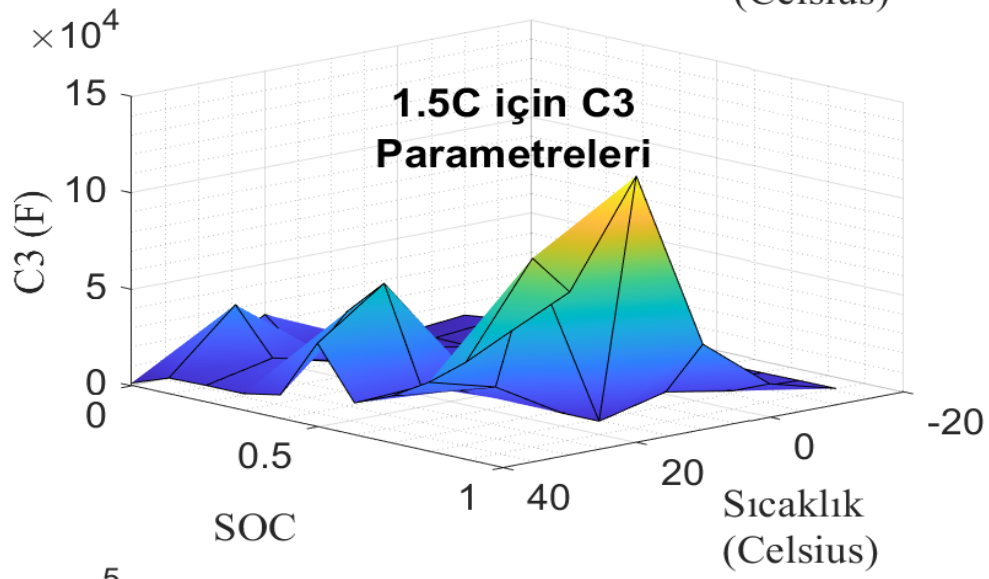
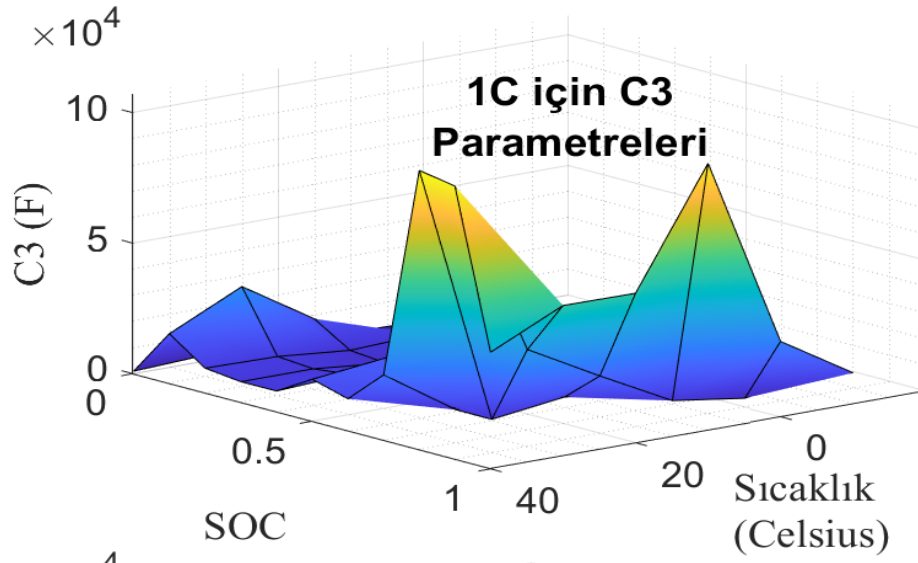
Şekil A.4 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için R3 parametreleri



Şekil A.5 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için C1 parametreleri

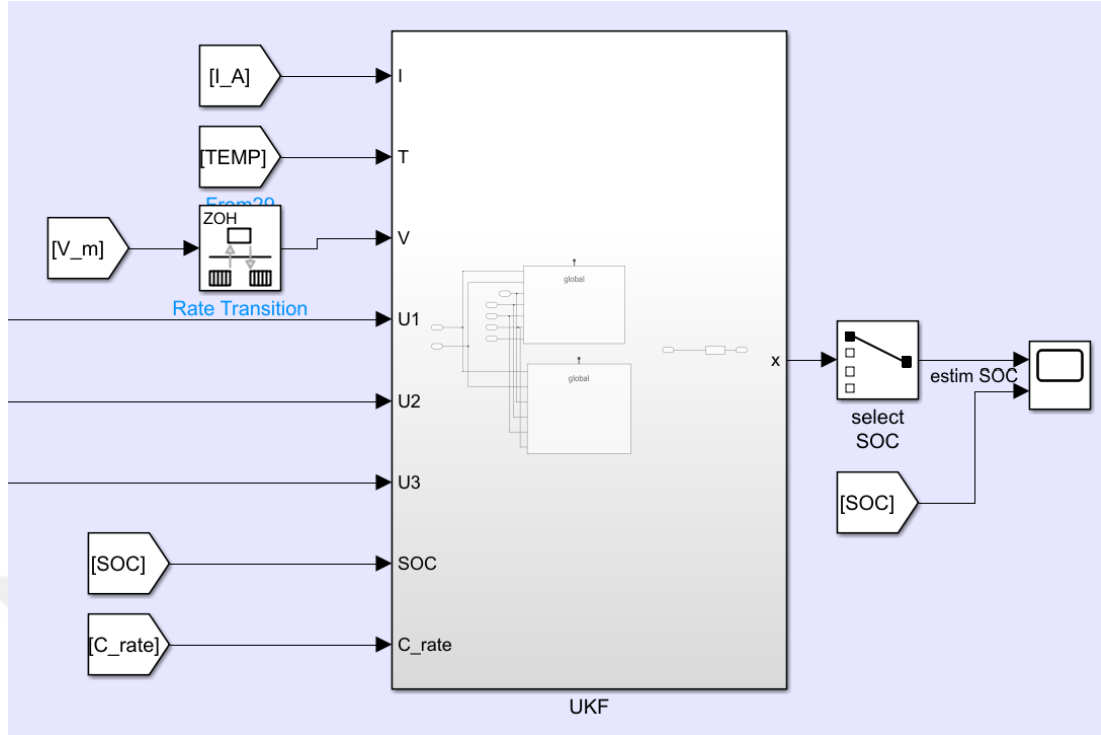


**Şekil A.6 :** 1C, 1.5C, 2C akım oranları için C2 parametreleri

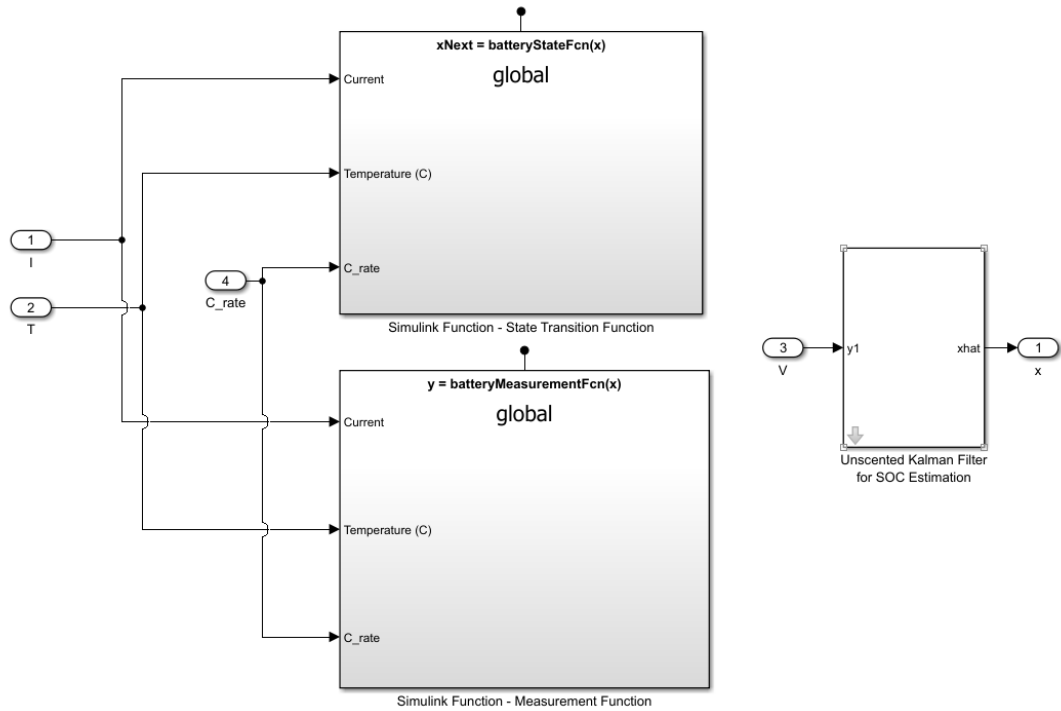


Şekil A.7 : 1C, 1.5C, 2C akım oranları için C3 parametreleri

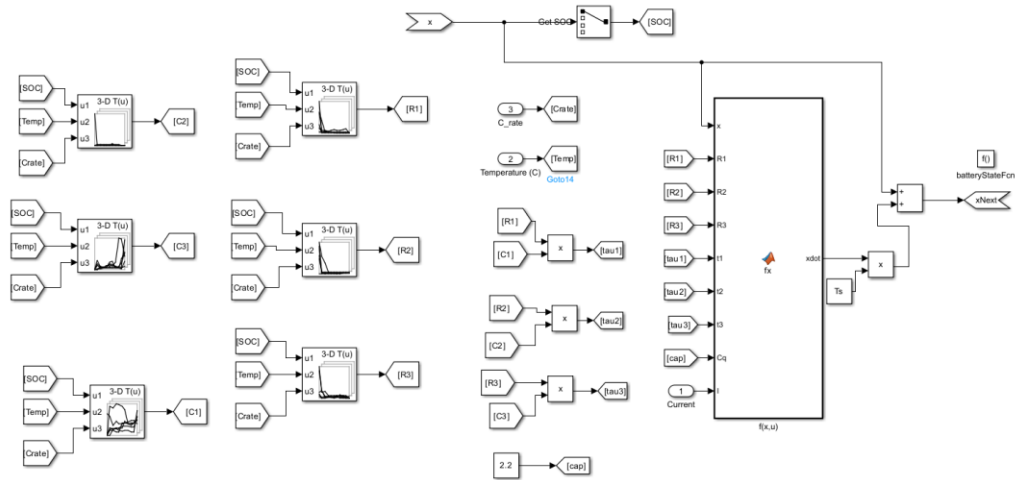
## EK B



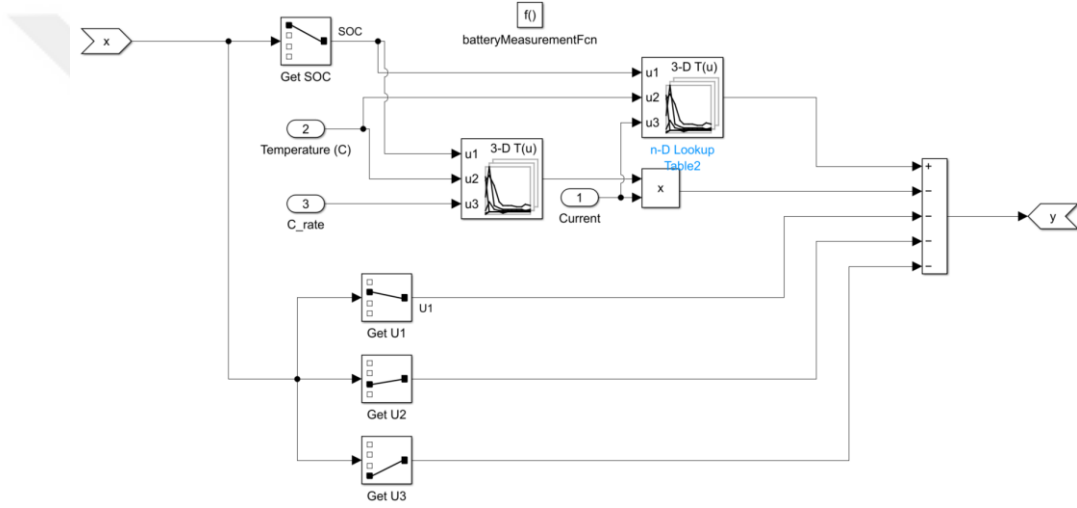
Şekil B.1 : UKF Algoritması Simulink Modeli



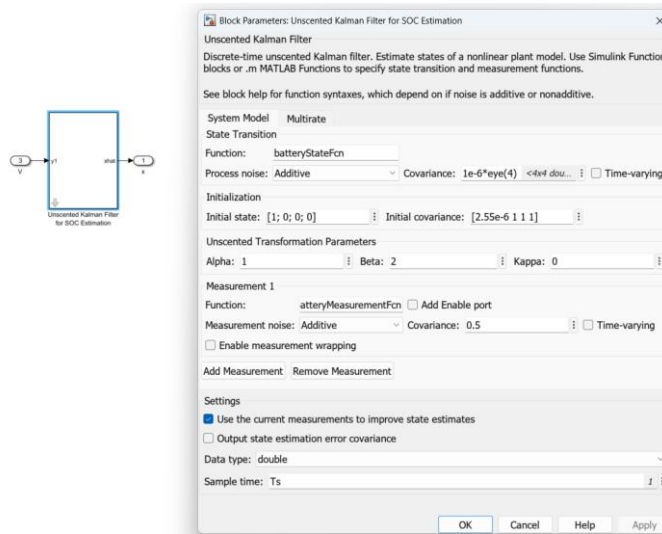
Şekil B.2 :UKF Algoritması fonksiyon blokları



Şekil B.3 : Durum geçiş fonksiyonu bloğu

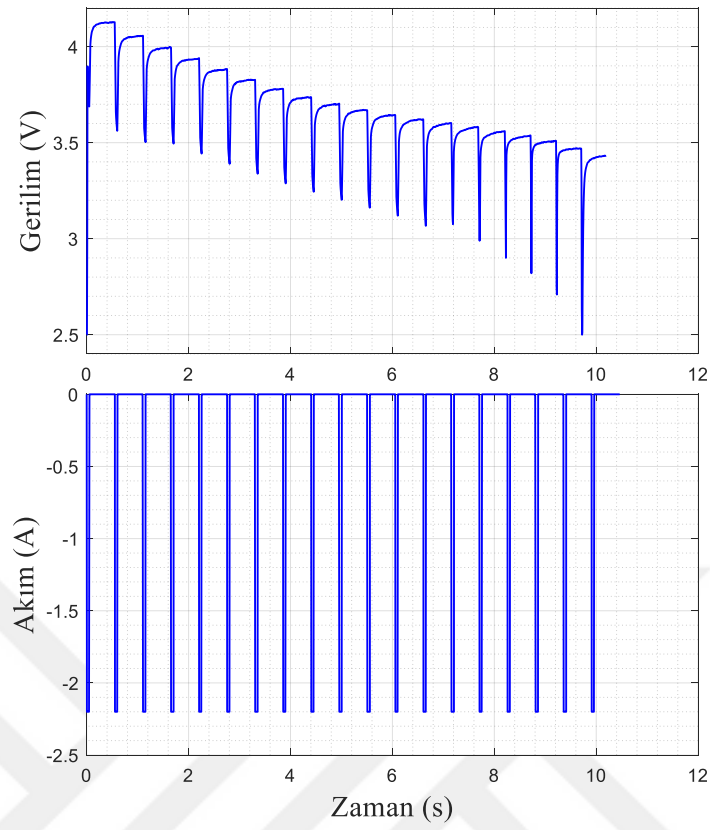


Şekil B.4 : Ölçme fonksiyonu bloğu

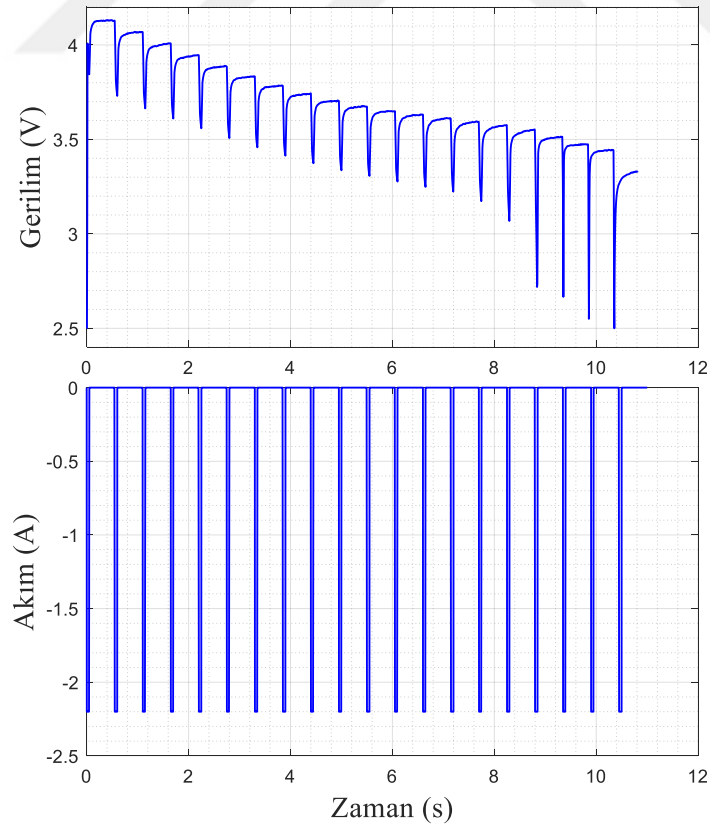


Şekil B.5 : UKF algoritması parametreleri

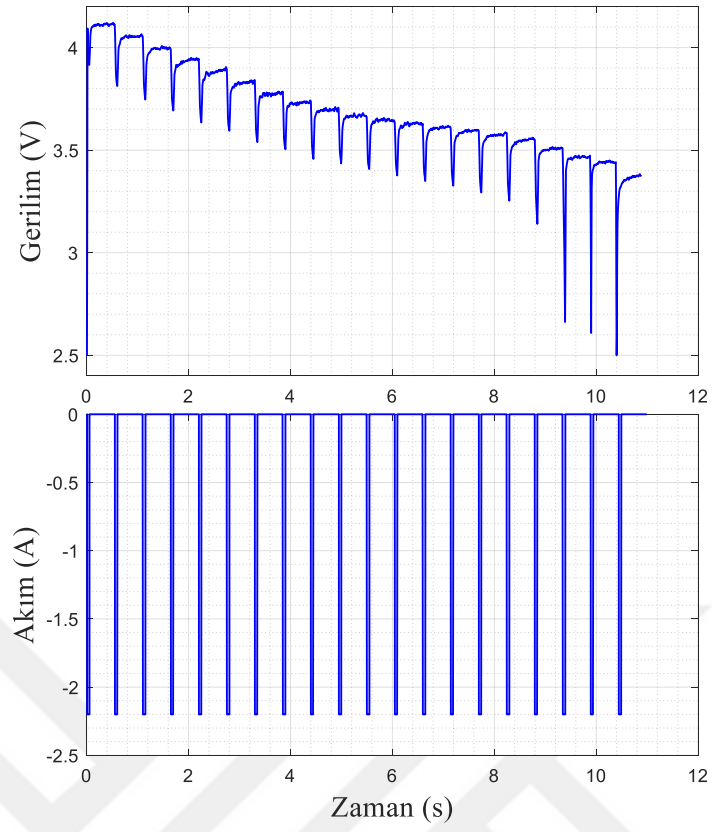
## EK C



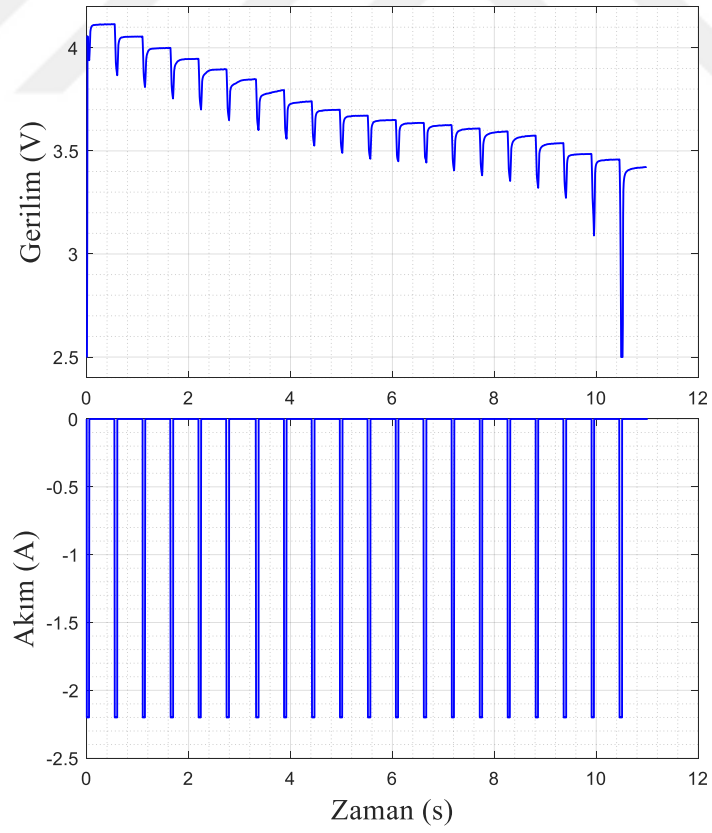
Şekil C.1 : -10 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



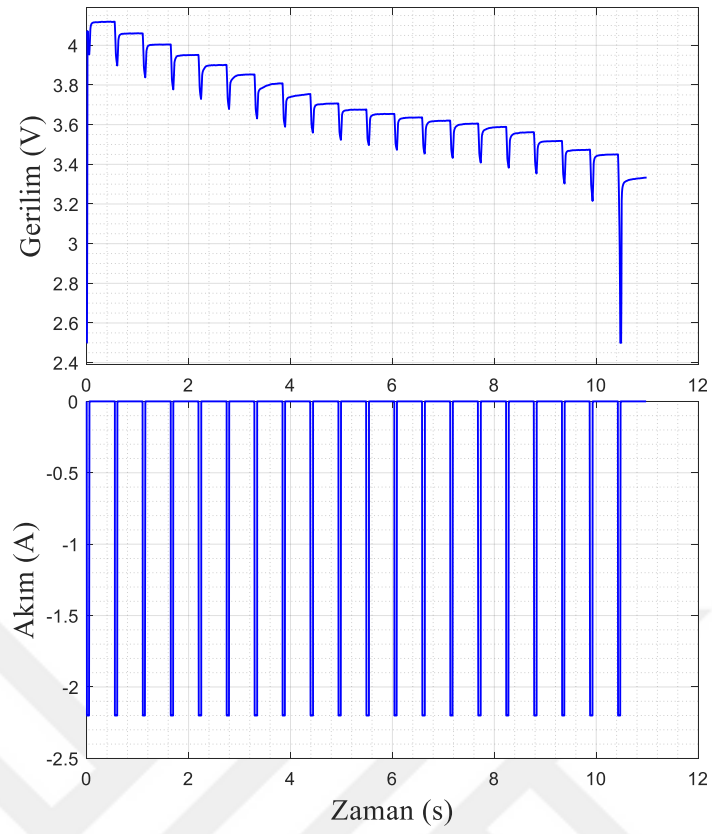
Şekil C.2 : 0 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



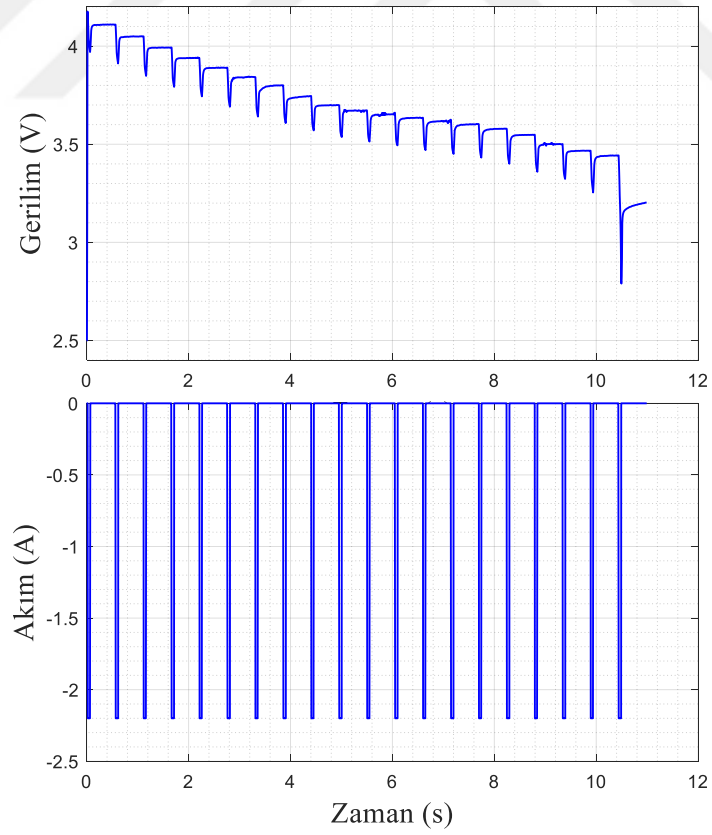
**Şekil C.3 :10 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



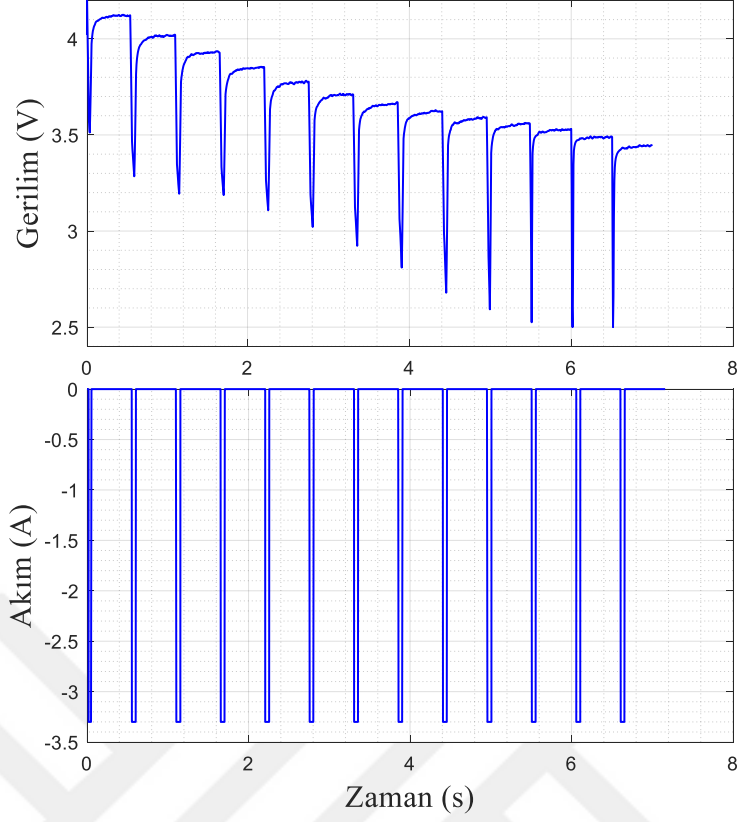
**Şekil C.4 :20 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



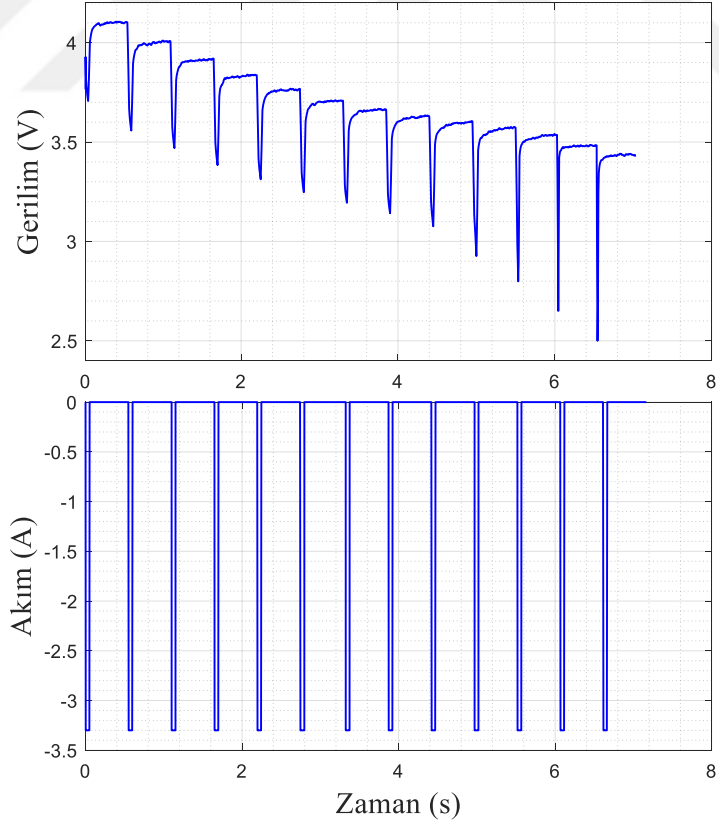
**Şekil C.5 :30 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



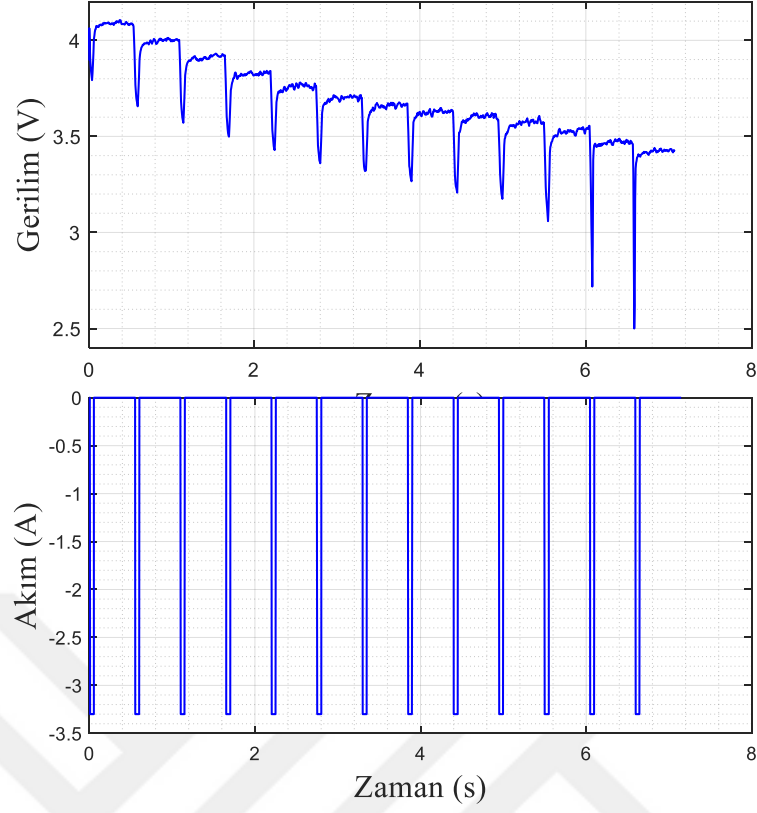
**Şekil C.6 :40 °C, 1C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



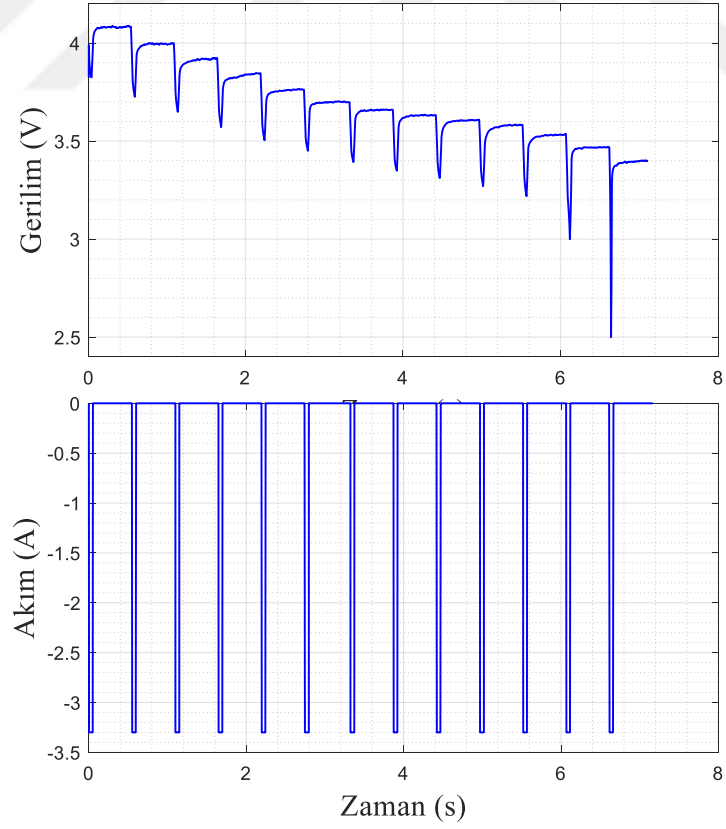
**Şekil C.7 :** -10 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



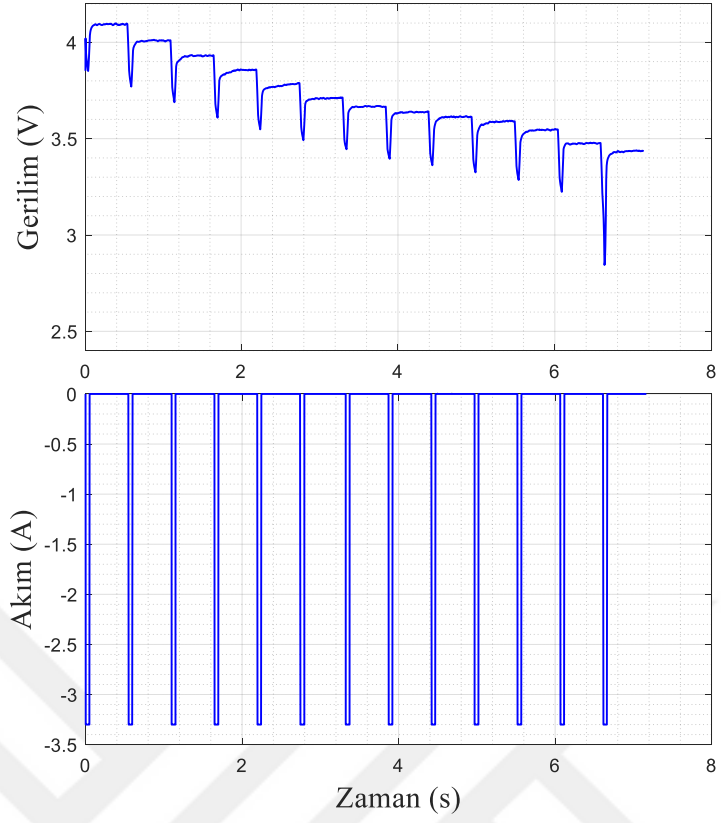
**Şekil C.8 :** 0 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



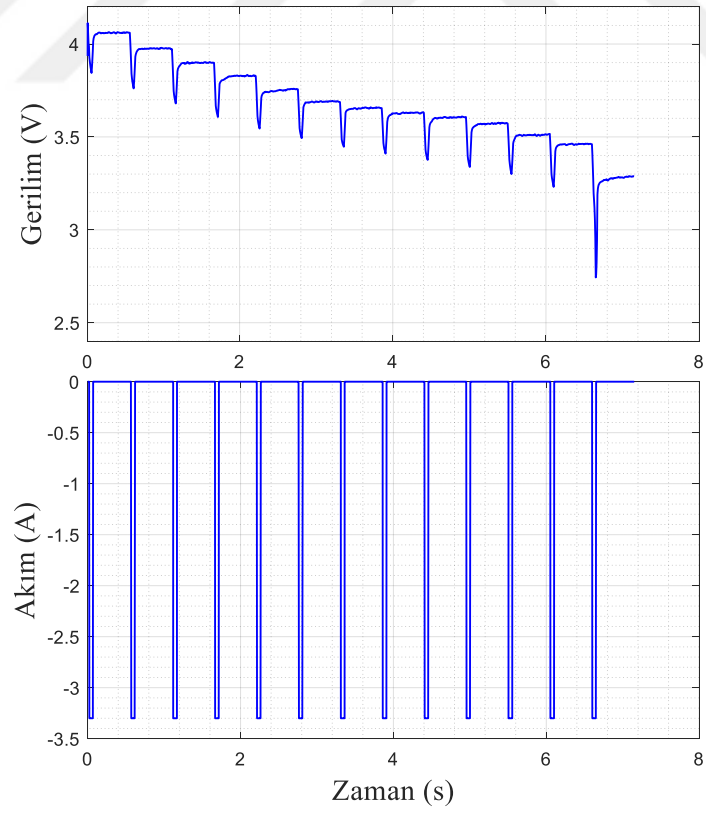
**Şekil C.9 : 10 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



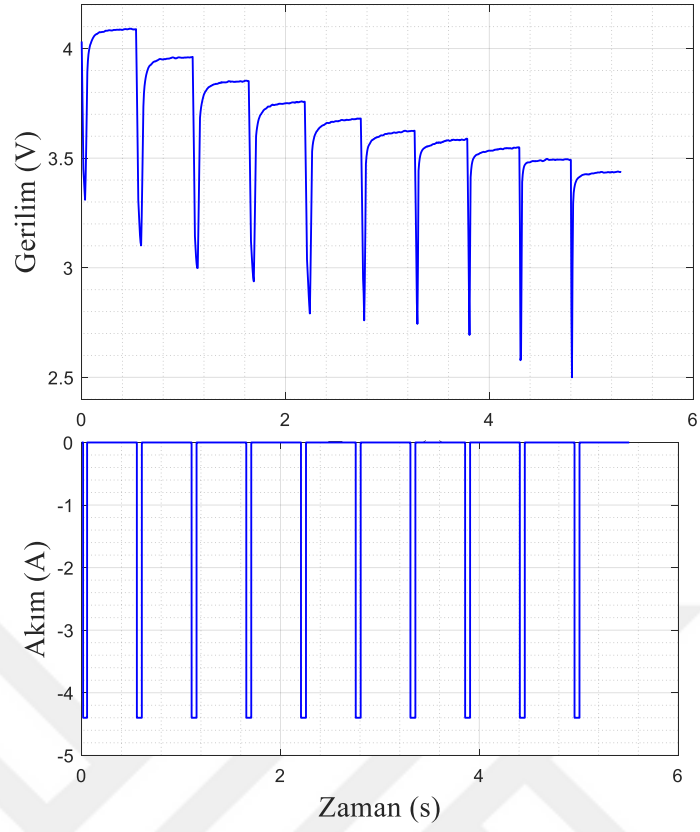
**Şekil C.10 : 20 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



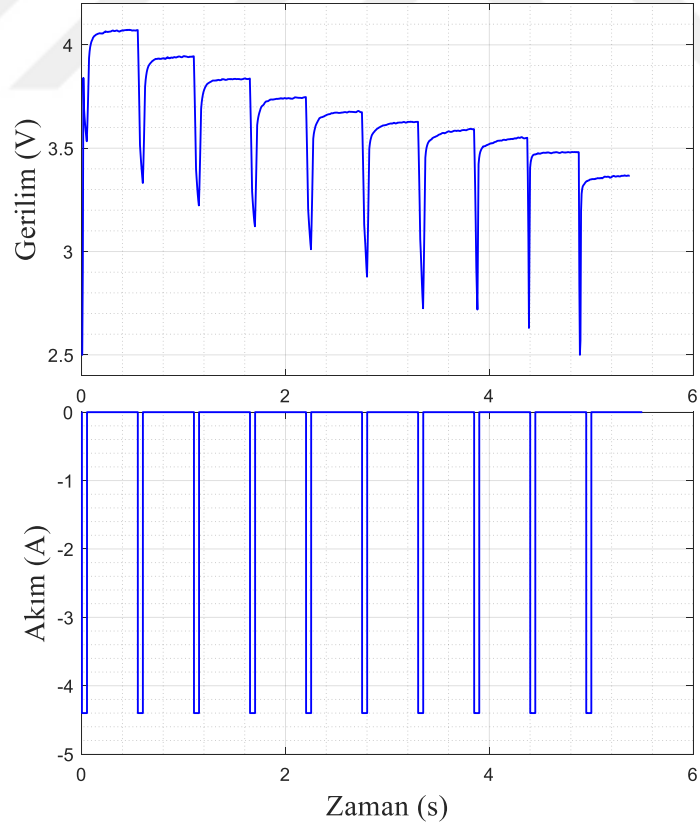
Şekil C.11 : 30 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



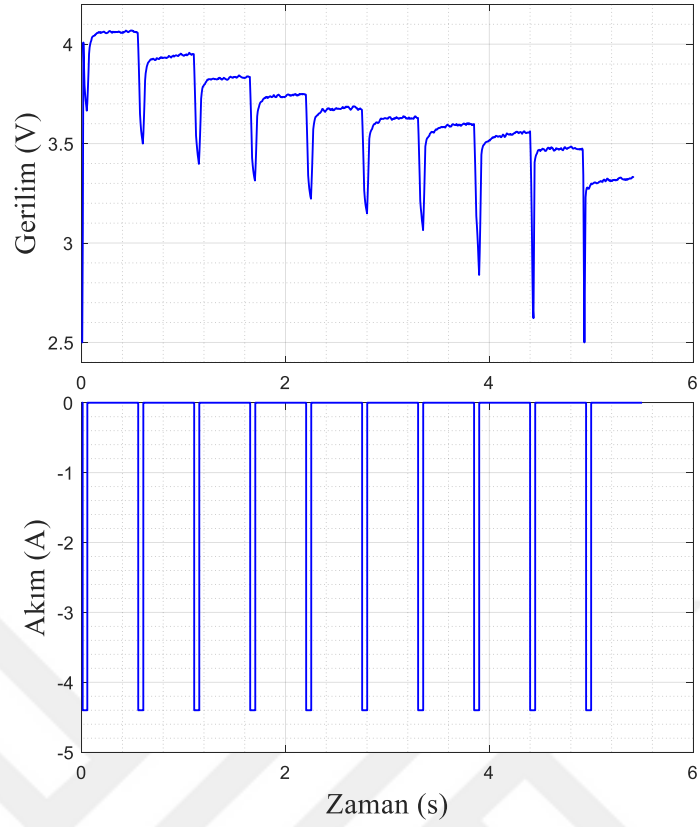
Şekil C.12 : 40 °C, 1.5C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



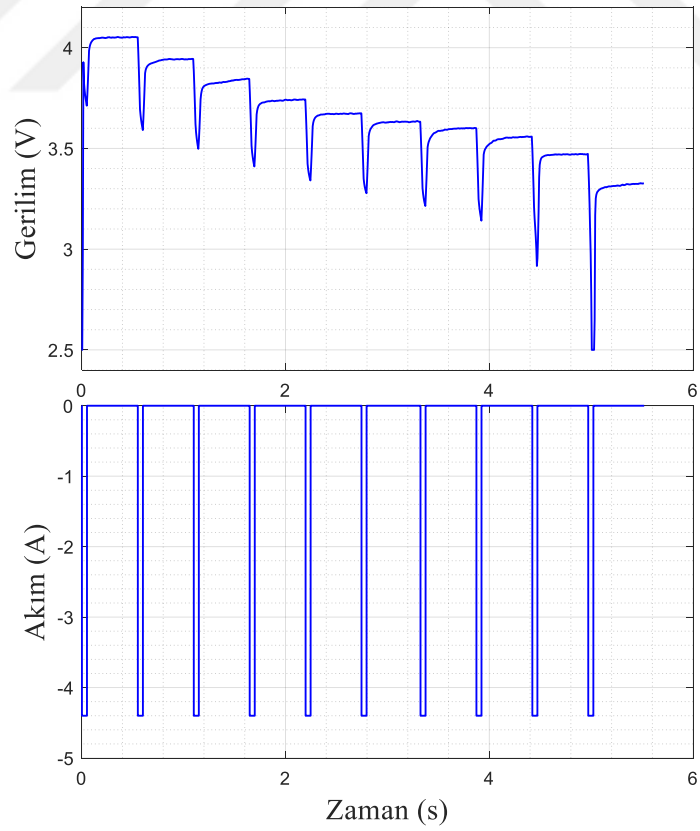
**Şekil C.13 :-10 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



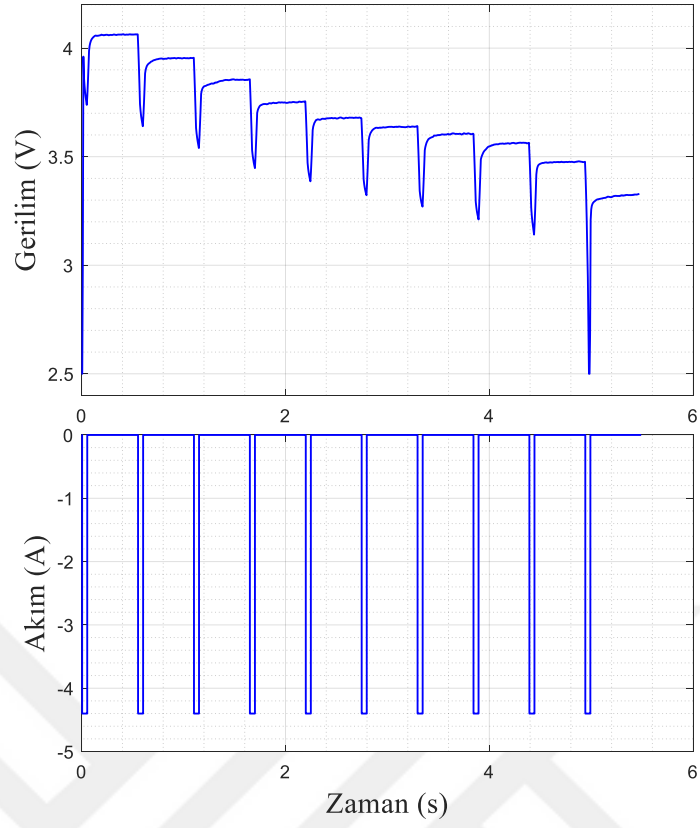
**Şekil C.14 : 0 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



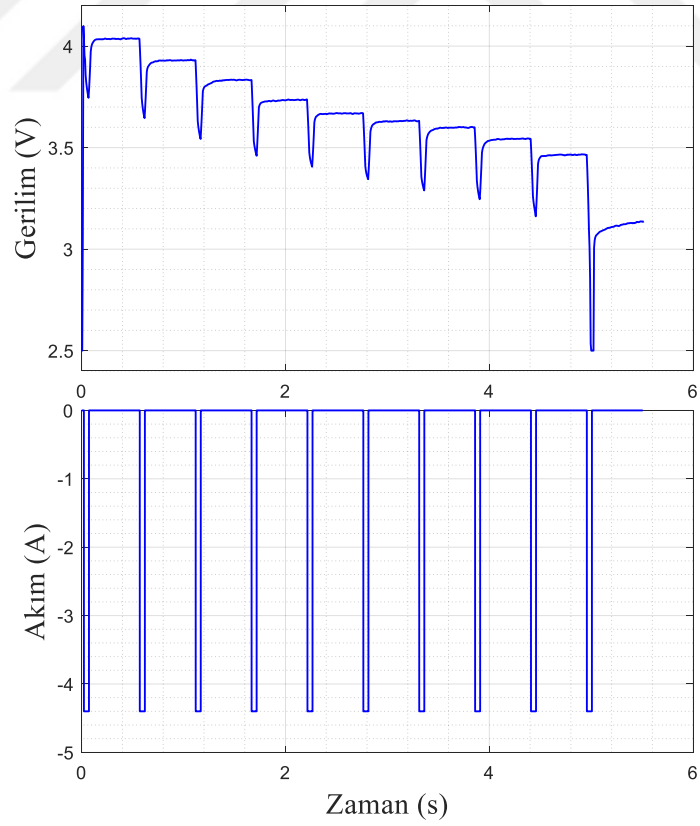
Şekil C.15 : 10 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları



Şekil C.16 :20 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları

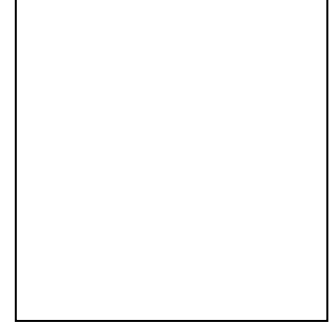


**Şekil C.17 : 30 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**



**Şekil C.18 : 40 °C, 2C Akım oranı darbe deşarj testi sonuçları**

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Eyyüp Aslan

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2018, Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Batarya Sistem Mühendisi, Aurora Flight Sciences, a Boeing Company, USA (2022- ...)
- Araştırma Görevlisi, Bursa Teknik Üniversitesi (2021-2022)
- YÖK 100-2000 Öncelikli Alanlar Doktora Bursu, Bursa Teknik Üniversitesi (2019-2021)
- Test Mühendisi, Consept Test ve Teknoloji Merkezi (2018-2019)

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Aslan, E., & Yasa, Y. (2024). C-Rate-and Temperature-Dependent State-of-Charge Estimation Method for Li-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Energies*, 17(13), 3187.

### DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Aslan, E., Yasa, Y., Meseci, Y., Keskin Arabul, F., & Arabul, A. Y. (2024). Comprehensive Multidisciplinary Electric Vehicle Modeling: Investigating the Effect of Vehicle Design on Energy Consumption and Efficiency. *Sustainability*, 16(12), 4928.

- Aslan, E., Aydın, Y., & Yaşa, Y. (2022). Consideration of graphene material in PCM with aluminum fin structure for improving the battery cooling performance. *International journal of energy research*, 46(8), 10758-10769.
- Aslan, E., & Yasa, Y. (2019, November). A Review on The Battery State of Charge Estimation Methods For Electric Vehicle Battery Management Systems. In *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 281-285). Ieee.

