

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Lİ-İYON BATARYA MODELİNİN EN UYGUNLAŞTIRILMASI VE BATARYA  
BOZUNUMUNUN İNCELENMESİNE KATKILAR**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan İNCESU**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**EYLÜL 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Lİ-İYON BATARYA MODELİNİN EN UYGUNLAŞTIRILMASI VE BATARYA  
BOZUNUMUNUN İNCELENMESİNE KATKILAR**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan İNCESU  
(504161024)**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet KOCABAŞ**

**EYLÜL 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504161014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hakan İNCESU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Lİ-İYON BATARYA MODELİNİN EN UYGUNLAŞTIRILMASI VE BATARYA BOZUNUMUNUN İNCELENMESİNE KATKILAR” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet KOCABAŞ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üy. Murat YILMAZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 10 Eylül 2019  
**Savunma Tarihi** : 23 Eylül 2019





*Aileme ve dostlarıma,*





## ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitimimdeki desteklerinden ötürü ve yol göstericiliği için danışman hocam Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet Kocabaş'a, içten teşekkürlerimi sunarım.

Azimli çalışmaları, paylaşımları ve yardımları için tüm çalışma arkadaşlarıma ve dostlarıma, destekleri için İTÜ Elektrikli Araç Takımı'na ve takım kaptanı Can Kurt'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Değerli aileme; annem ve babam Güller ve Mehmet İncesu, abim ve ablalarım Canan Çiftçi, Halil İbrahim İncesu ve Çağla İncesu'ya bana olan güvenlerini eksik etmedikleri için, sabırları için ve her türlü destekleri için sonsuz teşekkür ederim.

Eylül 2019

Hakan İncesu  
(Elektrik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                 | vii       |
| İÇİNDEKİLER.....                                           | ix        |
| KISALTMALAR.....                                           | xi        |
| SEMBOLLER.....                                             | xiii      |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                       | xv        |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                        | xvii      |
| ÖZET .....                                                 | xix       |
| SUMMARY.....                                               | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                      | <b>29</b> |
| 1.1 Tezin Amacı.....                                       | 30        |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                            | 31        |
| <b>2. GENEL BATARYA ÖZELLİKLERİ.....</b>                   | <b>35</b> |
| 2.1 Batarya Teknolojisi .....                              | 35        |
| 2.2 Çalışma Prensibi .....                                 | 36        |
| 2.3 Temel Batarya Parametreleri .....                      | 37        |
| 2.4 Elektrikli Araçlarda Batarya Gereksinimleri .....      | 37        |
| 2.5 Güvenlik .....                                         | 38        |
| <b>3. BATARYA MODELLEMESİ VE BENZETİM YÖNTEMLERİ .....</b> | <b>39</b> |
| 3.1 Ampirik Yöntemler .....                                | 40        |
| 3.2 Elektrokimyasal Model .....                            | 41        |
| 3.3 Veriye Dayalı Modeller .....                           | 42        |
| 3.4 Eşdeğer Devre Modeli.....                              | 42        |
| 3.4.1 Yöntem.....                                          | 46        |
| 3.4.2 Batarya hücre paketinin modellenmesi.....            | 47        |
| 3.5 Hücre Yaşlanması .....                                 | 48        |
| 3.5.1 Yaşlanma mekanizması .....                           | 48        |
| 3.5.2 Batarya sağlık durumu (SoH).....                     | 49        |
| 3.5.3 Çevrim bozunumu .....                                | 50        |
| 3.6 Paket Bozunumu .....                                   | 52        |
| 3.6.1 Paket dengeleme.....                                 | 52        |
| 3.6.2 Paket sağlık durumu .....                            | 52        |
| 3.6.2.1 Paralel seri bağlantı.....                         | 53        |
| 3.6.2.2 Seri paralel bağlantı .....                        | 54        |
| <b>4. EŞDEĞER DEVRE TOPOLOJİLERİ .....</b>                 | <b>57</b> |
| 4.1 Rint Modeli .....                                      | 57        |
| 4.2 RC Modeli .....                                        | 58        |
| 4.3 Thevenin Modeli .....                                  | 58        |
| 4.4 PNGV Modeli .....                                      | 59        |
| 4.5 Çift kutuplamalı (DP) Eşdeğer Devre Modeli .....       | 60        |
| <b>5. EŞDEĞER DEVRE MODELİ OPTİMİZASYONU .....</b>         | <b>63</b> |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1 Örnek Batarya Verilerinin Elde Edilmesi .....                  | 63        |
| 5.1.1 Batarya test düzeneği .....                                  | 63        |
| 5.1.2 Deney aşamaları ve sonuçları .....                           | 65        |
| 5.2 Elde Edilen Verilerle Modellerin En Uygunlaştırılması.....     | 66        |
| 5.2.1 Rint modeli en uygunlaştırılması .....                       | 69        |
| 5.2.2 Thevenin modeli en uygunlaştırılması .....                   | 71        |
| 5.2.3 PNGV modeli en uygunlaştırılması .....                       | 72        |
| 5.2.4 DP modeli en uygunlaştırılması.....                          | 74        |
| 5.3 En Uygunlaştırılmış Modellerin Başarım Karşılaştırılması ..... | 75        |
| <b>6. HÜCRE VE PAKET BOZUNUMUNUN ANALİZİ.....</b>                  | <b>77</b> |
| 6.1 Hücre Bozunumunun Analizi .....                                | 77        |
| 6.1.1 Ortalama şarj durumu .....                                   | 77        |
| 6.1.2 Hücre sıcaklığı .....                                        | 78        |
| 6.1.3 Hücre deşarj oranı .....                                     | 78        |
| 6.1.4 Hücre takvim bozunumu .....                                  | 79        |
| 6.2 Paket Bozunumu Analizi.....                                    | 80        |
| 6.3 Sonuçların Yorumlanması .....                                  | 83        |
| <b>7. EN UYGUNLAŞTIRILMIŞ BATARYA MODELİNİN ÖRNEK</b>              |           |
| <b>UYGULAMASI.....</b>                                             | <b>85</b> |
| 7.1 Kullanılacak Yükün Modellenmesi .....                          | 85        |
| 7.2 FTP-75 Sürüş Çevrimi .....                                     | 87        |
| 7.3 Benzetimler .....                                              | 88        |
| 7.4 Değişken Sıcaklık .....                                        | 90        |
| 7.5 Sonuçların Yorumlanması.....                                   | 91        |
| <b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                   | <b>93</b> |

## KISALTMALAR

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| <b>ANN</b>     | : Yapay Sinir Ağları                        |
| <b>BEV</b>     | : Bataryalı Elektrikli Araç                 |
| <b>BMS</b>     | : Batarya Yönetim Sistemi                   |
| <b>DC</b>      | : Doğru Akım                                |
| <b>DOD</b>     | : Deşarj Derinliği                          |
| <b>DP</b>      | : Çift Kutuplama                            |
| <b>ECM</b>     | : Eşdeğer Devre Modeli                      |
| <b>EKF</b>     | : Genişletilmiş Kalman Filtresi             |
| <b>ELM</b>     | : Aşırı Öğrenme Makineleri                  |
| <b>EV</b>      | : Elektrikli Araç                           |
| <b>GA</b>      | : Genetik Algoritma                         |
| <b>HEV</b>     | : Hibrit Elektrikli Araç                    |
| <b>İTÜ</b>     | : İstanbul Teknik Üniversitesi              |
| <b>Li-İyon</b> | : Lityum-İyon                               |
| <b>MATLAB</b>  | : MATrix LABoratory                         |
| <b>NMC</b>     | : Nikel-Manganaz-Kobalt Oksit               |
| <b>OCV</b>     | : Açık Devre Gerilimi                       |
| <b>P2D</b>     | : Sahte İki-Boyutlu Model                   |
| <b>PEV</b>     | : Şarj Edilebilen Elektrikli Araçlar        |
| <b>PHEV</b>    | : Şarj Edilebilen Hibrit Elektrikli Araçlar |
| <b>PNGV</b>    | : Yeni Nesil Araçlar Ortaklığı              |
| <b>PSO</b>     | : Parçacık Optimizasyonu                    |
| <b>RMS</b>     | : Karekök Ortalama                          |
| <b>RUL</b>     | : Kalan Faydalı Ömür                        |
| <b>SEI</b>     | : Katı Elektrolit Arayüzü                   |
| <b>SoC</b>     | : Şarj Durumu                               |
| <b>SoF</b>     | : İşlev Durumu                              |
| <b>SoH</b>     | : Sağlık Durumu                             |
| <b>SoL</b>     | : Ömür Durumu                               |
| <b>SPM</b>     | : Tek Parçacık Modeli                       |



## SEMBOLLER

|                 |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| $\alpha$        | : Yolun eğimi                         |
| $\xi_{cal}$     | : Takvim kayıpları                    |
| $\xi_{cyc}$     | : Çevrim kayıpları                    |
| $\xi_{tot}$     | : Toplam kapasite kaybı               |
| $\eta_{em}$     | : Elektrik motorlarının verimi        |
| $\eta_{pe}$     | : Güç elektroniği devrelerinin verimi |
| $A$             | : Amper                               |
| $A_f$           | : Aracın kesit alanı                  |
| $Ah$            | : Amper-saat                          |
| $C$             | : Kapasite                            |
| $c_r$           | : Sürtünme direnci katsayısı          |
| $C_0, C_1, C_2$ | : Eşdeğer devre kapasitansları        |
| $C_T$           | : Isı kapasitesi                      |
| $E_0$           | : Açık devre gerilimi                 |
| $F_a$           | : Aerodinamik sürtünme kuvveti        |
| $F_g$           | : Yerçekimi kuvveti                   |
| $F_r$           | : Yuvarlanma direnci                  |
| $F_t$           | : Çer kuvveti                         |
| $g$             | : Yerçekimi ivmesi                    |
| $i_k$           | : Anlık akım                          |
| $I$             | : Akım                                |
| $K_1$           | : Polarizasyon direnci                |
| $Kg$            | : Kilogram                            |
| $KWh$           | : Kilo-Watt-saat                      |
| $L$             | : Endüktans                           |
| $m$             | : Araç kütlesi                        |
| $P$             | : Aktif güç                           |
| $P_b$           | : Bataryanın anlık güç tüketimi       |
| $P_s$           | : Hücre içinde üretilen enerji        |
| $P_t$           | : Elektrikli aracın çekiş gücü        |

|                                   |                                                     |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b><math>Q_{nom}</math></b>       | : Hücrenin nominal kapasitesini                     |
| <b><math>Q_{series}</math></b>    | : Seri bağlı paketin kapasitesi                     |
| <b><math>Q_{parallel}</math></b>  | : Paralel bağlı paketin kapasitesi                  |
| <b><math>R</math></b>             | : Direnç                                            |
| <b><math>R_0, R_1, R_2</math></b> | : Eşdeğer devre dirençleri                          |
| <b><math>R_i</math></b>           | : Dahili direnç                                     |
| <b><math>R_T</math></b>           | : Hücrenin termal direnci                           |
| <b><math>T</math></b>             | : Sıcaklık                                          |
| <b><math>T_a</math></b>           | : Ortam sıcaklığı                                   |
| <b><math>T_{amb}</math></b>       | : Değişken ortam sıcaklığı                          |
| <b><math>T_{avg}</math></b>       | : Ortalama sıcaklık                                 |
| <b><math>T_{dev}</math></b>       | : Sıcaklık sapması                                  |
| <b><math>T_{pe}</math></b>        | : Güç elektroniği devrelerinin oluşturduğu sıcaklık |
| <b><math>T_{ref}</math></b>       | : Referans sıcaklık                                 |
| <b><math>v</math></b>             | : Araç hızı                                         |
| <b><math>V, U, E</math></b>       | : Gerilim                                           |
| <b><math>W</math></b>             | : Watt                                              |
| <b><math>Wh</math></b>            | : Watt-saat                                         |
| <b><math>z_k</math></b>           | : Şarj durumu                                       |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1 : Tipik ampirik modeller. ....                             | 40 |
| Çizelge 3.2 : Çevrim kayıpları modeli parametreleri. ....              | 51 |
| Çizelge 5.1 : SoC %94 olduğu anda alınmış anlık batarya verileri. .... | 66 |
| Çizelge 5.2 : SoC %94 olduğu anda alınmış anlık hücre verileri. ....   | 66 |
| Çizelge 5.3 : Rint modeli tahmin edilen parametre değerleri. ....      | 70 |
| Çizelge 5.4 : Thevenin modeli tahmin edilen parametre değerleri. ....  | 72 |
| Çizelge 5.5 : PNGV modeli tahmin edilen parametre değerleri. ....      | 73 |
| Çizelge 5.6 : DP modeli tahmin edilen parametre değerleri. ....        | 74 |
| Çizelge 5.7 : ECM'ler için hata sonuçlarının karşılaştırılması. ....   | 76 |
| Çizelge 6.1 : Takvim kayıpları modeli parametreleri. ....              | 80 |
| Çizelge 6.2 : Takvim kayıpları modeli sıcaklık katsayıları. ....       | 80 |
| Çizelge 7.1 : Elektrikli araç parametreleri. ....                      | 86 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Lityum-iyon pillerim şarj vedeşarj mekanizması [15].....           | 36 |
| Şekil 3.1 : Model tabanlı SoC tahmin şeması .....                              | 39 |
| Şekil 3.2 : Li-iyon batarya hücresinin elektrokimyasal modeli [17].....        | 41 |
| Şekil 3.3 : Genel bir eşdeğer devre modeli.....                                | 43 |
| Şekil 3.4 : Deney ve simulasyondeşarjında gerilim değışimi [24].....           | 44 |
| Şekil 3.5 : Deney ve simulasyondeşarjında gerilim değışimi [25].....           | 45 |
| Şekil 3.6 : Eşdeğer devre modellerinin başarımın karşılaştırılması [17].....   | 47 |
| Şekil 3.7 : Li-iyon batarya hücre paketi [18].....                             | 47 |
| Şekil 3.8 : Elektrot üzerinde SEI tabakası oluşumu [22].....                   | 48 |
| Şekil 3.9 : Paralel ve seri bağı batarya hücreleri.....                        | 52 |
| Şekil 3.10 : PS tipi bağlantıya sahip batarya hücreleri.....                   | 54 |
| Şekil 3.11 : SP tipi bağlantıya sahip batarya hücreleri.....                   | 54 |
| Şekil 3.12 : 16 hücreye sahip SP ve PS bağı batarya paketleri.....             | 55 |
| Şekil 4.1 : Rint modeli.....                                                   | 57 |
| Şekil 4.2 : RC modeli.....                                                     | 58 |
| Şekil 4.3 : Thevenin modeli.....                                               | 59 |
| Şekil 4.4 : PNGV modeli.....                                                   | 59 |
| Şekil 4.5 : DP modeli.....                                                     | 60 |
| Şekil 5.1 : Deney seti şeması.....                                             | 63 |
| Şekil 5.2 : 48V 20Ah batarya.....                                              | 64 |
| Şekil 5.3 : Arduino Uno ile ölçümlerin elde edilmesi.....                      | 64 |
| Şekil 5.4 : MeanWell PB-300.....                                               | 65 |
| Şekil 5.5 : Yük birimleri.....                                                 | 65 |
| Şekil 5.6 : Benzetim modeli genel görünümü.....                                | 67 |
| Şekil 5.7 : Özelleştirilmiş devre elemanları ile oluşturulmuş bir ECM.....     | 67 |
| Şekil 5.8 : Parametre tahmini aşamasının akış şeması.....                      | 68 |
| Şekil 5.9 : Optimize edilmemiş parametrelerle ECM'nin davranışı.....           | 69 |
| Şekil 5.11 : Rint eşdeğer devre Simulink modeli.....                           | 70 |
| Şekil 5.12 : Optimize edilmiş Rint eşdeğer devresinin davranışı.....           | 70 |
| Şekil 5.13 : Şarj-deşarj profilinde Rint eşdeğer devresinin davranışı.....     | 71 |
| Şekil 5.14 : Thevenin eşdeğer devre Simulink modeli.....                       | 71 |
| Şekil 5.15 : Optimize edilmiş Thevenin eşdeğer devresinin davranışı.....       | 71 |
| Şekil 5.16 : Şarj-deşarj profilinde Thevenin eşdeğer devresinin davranışı..... | 72 |
| Şekil 5.17 : PNGV eşdeğer devre Simulink modeli.....                           | 73 |
| Şekil 5.18 : Optimize edilmiş PNGV eşdeğer devre modelinin davranışı.....      | 72 |
| Şekil 5.19 : Şarj-deşarj profilinde PNGV eşdeğer devresinin davranışı.....     | 73 |
| Şekil 5.20 : DP eşdeğer devre Simulink modeli.....                             | 74 |
| Şekil 5.21 : Optimize edilmiş DP eşdeğer devre modelinin davranışı.....        | 74 |
| Şekil 5.22 : Şarj-deşarj profilinde DP eşdeğer devre modelinin davranışı.....  | 75 |
| Şekil 6.1 : Farklı ortalama şarj durumları için hücre sağlık durumları.....    | 78 |
| Şekil 6.2 : Farklı ortam sıcaklıkları için hücre sağlık durumları.....         | 78 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.3 : Farklı deşarj akımlarına göre SoH profili. ....                          | 79 |
| Şekil 6.4 : Farklı ortam sıcaklıklarına göre takvim kayıpları. ....                  | 80 |
| Şekil 6.5 : Batarya paketindeki ısı alış-verişi. ....                                | 81 |
| Şekil 6.6 : Hücre paketinde 6 hücrenin ve ayrı bir hücrenin SoH grafiği. ....        | 82 |
| Şekil 6.7 : Hücre paketinde 6 hücrenin ve ayrı bir hücrenin sıcaklık grafiği. ....   | 82 |
| Şekil 6.8 : PS ve SP devreleri için SoH değişimi. ....                               | 82 |
| Şekil 7.1 : Elektrikli araca etkiyen kuvvetler. ....                                 | 85 |
| Şekil 7.2 : FTP-75 test sürüşü için hız grafiği. ....                                | 87 |
| Şekil 7.3 : FTP-75 test sürüşü için güç tüketimi grafiği. ....                       | 88 |
| Şekil 7.4 : FTP-75 test sürüşüne tabi tutulan hücre için 30 günlük SoH değişimi. ... | 88 |
| Şekil 7.5 : FTP-75 test sürüşüne tabi tutulan hücre için günlük SoC. ....            | 89 |
| Şekil 7.6 : Tek bir sürüş çevrimi için SoC grafiği. ....                             | 89 |
| Şekil 7.7 : Batarya paketi ve batarya hücresi için SoH değişimi. ....                | 89 |
| Şekil 7.8 : Batarya paketinin iki farklı ortam sıcaklığındaki SoH değişimi. ....     | 90 |
| Şekil 7.9 : Değişken sıcaklıkta SoH değişimi. ....                                   | 91 |
| Şekil 7.10 : Tek bir deşarj için sıcaklık grafiği. ....                              | 91 |
| Şekil 7.11 : Tekrarlanan deşarj sekansı için SoC değişimi. ....                      | 91 |

## **Lİ-İYON BATARYA MODELİNİN EN UYGUNLAŞTIRILMASI VE BATARYA BOZUNUMUNUN İNCELENMESİNE KATKILAR**

### **ÖZET**

Batarya uygulamalarında işletme güvenliğini sağlamak, örneğin elektrikli araçlarda menzil kaygısını azaltmak için, kalan kapasitenin (sürüş mesafesinin) tahminini doğru olarak yapmak büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, batarya yönetim sistemleri bataryanın ne kadar şarj ve deşarj edilmesi gerektiğini ve ne zaman değiştirilmesi gerektiğini de tahmin etmelidir. Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak batarya şarj durumunu yeterli doğrulukta hesaplayacak eşdeğer devre modeli karşılaştırma yoluyla belirlenmiş, ardından bu eşdeğer devre üzerinden batarya yaşlanmasına ve kapasite kayıplarına etki eden faktörler araştırılmıştır.

Batarya şarj durumunun hesaplanması, bataryanın tam kapasitesinden yararlanmak için yüksek doğruluğa sahip olmalıdır. Tüm bunlar için BMS sistemleri, iç ve dış etkenlere göre değişen batarya hücre değişkenlerini hesaplayarak şarj durumunun tahmininde düzeltme görevi görecektir ek algortimallara ihtiyaç duyar. Bu tez çalışmasında batarya modellerini ve parametre tahminini değerlendirmek için, daha önce literatürde yayınlanmış olan teknikleri kullanarak, genel bir bakış açısının elde edilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, bir lityum-iyon batarya için matematiksel modeller inşa edilmiş ve daha sonra bu modeller deneysel olarak doğrulamak için kullanılmıştır. Modellerin yapısı, prensip olarak tüm lityum batarya tipleri için kullanılabilir.

Eşdeğer devre modelleri, batarya uygulamalarında (örneğin elektrikli araçlar için) lityum-iyon bataryalar alanında önemli bir araştırma konusudur ve bilim adamları, basitten karmaşığa çeşitli eşdeğer devre modelleri önermişlerdir. Bir yandan, basit bir model, bataryanın dinamik özelliklerinin benzetimini yapamazken; öte yandan, karmaşık modeller ise gerçek zamanlı bir sisteme uygulamak için elverişli değildir. Şu anda, lityum-iyon bataryaların eşdeğer devre modelleri üzerinde birçok sistematik karşılaştırmalı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan dört farklı eşdeğer devre modeli olan Rint, Thevenin, PNGV ve DP modelleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İlk olarak, batarya ile deneysel ölçümler yapılmıştır; daha sonra, benzetim modeli Matlab / Simulink ortamında hazırlanmıştır. İncelenen Lityum-İyon hücre kimyası, bir gerilim kaynağına ve seri dirence sahip Rint modeli, bu modele ek olarak ayrıca RC koluna sahip olan Thevenin modeli, iki RC koluna sahip DP modeli ve Thevenin modeline ek olarak bir seri kapasitansa sahip PNGV modeli ile benzetimi yapıp her bir model için darbe deşarj deneyi verileri kullanarak en uygunlaştırma yapılmıştır. Yapılan en uygunlaştırma ile SoC'ye karşılık gelen R, C, E değerlerine ait veri tabloları oluşturulmuştur. Bu veri tabloları, bir şarj-deşarj çevriminde SoC tahmini için kullanılmıştır. Tahmin edilen değerler gerçek verilerle karşılaştırılarak, eşdeğer devre modellerinin başarımları ve hassasiyeti doğrulanmıştır.

Doğrulama aşamasında yapılan ikinci deneyde model, 20 dakikalık bir yükleme-şarj çevrimi kullanılmıştır. Her bir modelin benzetim verileri ile deneysel veriler karşılaştırılarak maksimum yüzdesel hataları saptanmıştır. Elde edilen verilere göre

modellerin yüzdesel maksimum hatası; Rint modelinde %3.817, Thevenin modelinde %1.51, PNGV modelinde %2.102 ve DP modelinde %1.379 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların eşdeğer devre modelinin pratik batarya yönetim sistemlerinde uygulanması konusunda büyük önem taşımaktadır. Tüketici elektroniği gibi sıradan uygulamalar için, birinci dereceden Rint modeli tercih edilen seçenek olabilir. Bununla birlikte, otomotiv ve havacılık gibi kritik uygulamalar için ikinci dereceden DP modeli tercih edilebilir.

Bu çalışma, daha önce literatürde sunulan eşdeğer devre hücre modelinin genel yapısı üzerinde bir karşılaştırma sunar. Darbe deşarjı deneyi verileri kullanarak SoC'ye karşılık gelen veri tabloları oluşturup, eşdeğer devre parametrelerini değerlendirildiği pratik bir yöntem gösterilmiştir. Bu prosedür, MATLAB®, Simulink®, Simscape™ ve Simulink Tasarım En Uygunlaştırma paketinin parametre tahmin araçları kullanılarak, eşdeğer devre modelleri ile elektrokimyasal sistemlerin modellenmesi için bir yöntem göstermektedir. Bu yöntem ile elde edilecek olan parametre tahmin verileri, BMS sistemlerinin SoC hesabında yardımcı algoritma olarak kullanılabilecektir.

Bu tez aynı zamanda, uygulama örneği temelinde, enerji depolama bazında bozunma mekanizmalarını içeren elektrikli taşıtların batarya modellemesi hakkında bir fikir vermektedir. Lityum iyon bataryaya sahip elektrikli araçlar popüleritesini artırdıkça, bu tipteki bataryaların kapasite kayıplarını inceleme ve modelleme ihtiyacı da artmaktadır. Bataryadaki kapasite kayıplarının iyi bir şekilde analiz edilmesi ve tahmin edilebilmesi, bu kayıpları en aza indirecek önlemlerin alınması için bir temel oluşturmuş olur.

Bu tezde, lityum iyon piller için ısı yayılımını da içeren DP batarya modeli temel olarak kullanılmıştır. Bu model, kapasitede meydana gelen kayıplar eklenerek genişletilmiştir. Bu model basit bir araç modeli ile birleştirilerek, bir bataryanın veya batarya paketinin belirli bir sürüş senaryosunda nasıl davranacağına dair bir öngörü elde etmek için kullanılmıştır. Tezdeki diğer bir odak noktası, bozunuma yol açan ana etkenlerin neler olduğunu vurgulamak için farklı bozunma faktörlerinin karşılaştırılmasına yöneliktir.

Bozunma ile ilgili elde edilebilecek ana sonuç, sıcaklığın, takvim yaşlanmasının yanı sıra çevrim yaşlanmasında da en etkili etken faktör olduğudur. Hücrelerin sıcaklığı, ortam sıcaklığına ve şarj/deşarj akımına bağlı olacaktır. Ortalama şarj seviyesi de (SoC) bozunmayı etkileyen diğer bir faktördür, ancak genel olarak bozunmaya olan katkısı sıcaklıktan daha az bir ölçüdedir.

Bir lityum-iyon pili, yüksek seviyeden ziyade düşük şarj durumuna yakın tutmak daha sağlıklıdır. Mümkünse, şarj yüzdesindeki sapmaları (DoD) düşük tutmak da batarya ömrünü uzatabilir. Fakat bu durum, tüm uygulamalar için, özellikle menzili engelleyeceğinden ötürü BEV'ler için mümkün olmayabilir.

Bu tezde üzerinde durulan bozunma modellemesi ile ilgili genişletilebilecek konular mevcuttur. İdeal olarak, batarya hücresinin modeli ile batarya yaşlanma modeli verilerinin aynı kimyaya ve özelliklere sahip olması tercih edilmelidir. Bu tezde ise hücre modeli lityum nikel mangan kobalt oksit hücrelerine dayanmaktadır fakat yaşlanma modelleri lityum demir fosfat tipindedir.

Modellerin hesap süresini azaltacak biçimde geliştirilip, böylece daha uzun simülasyonlar yapıp yapılamayacağını görmek mümkün olabilir. Dikkate alınması gereken bir başka husus, farklı akım seviyeleri için ohmik ısınmadan kaynaklanan

bozunma etkilerini göz önünde bulundurmanın yeterli olup olmadığı veya kapasite kayıplarını daha iyi modellemek için akımın hesaba katılmasının gerekip gerekmediğidir. Böylelikle, şarj ve deşarj sürecinde oluşan bozunmaların ayrı ayrı değerlendirilmesine imkân verilebilir.

Model, kesme gerilimlerinin üstünde ve altında şarj etme veya sıfırın altındaki sıcaklıklarda kullanımın etkileri gibi bozunmaya etki eden daha fazla faktör içerecek şekilde genişletilebilir. Genişletilebilecek diğer alanlar, hücre dengelemesini ve batarya yönetim sisteminin modelini içerecek şekilde yapılan çalışmalar olabilir. Daha ayrıntılı ısı değişimi ve daha gerçekçi test senaryoları gibi alanlar da geliştirilebilir. Farklı paket yapılandırmalarını ve çalışma koşullarını daha kolay test edebilmek için, kullanıcının istenen bilgileri belirleyebileceği ve programın seçilen senaryoyu oluşturup simüle etmesine izin verecek bir grafik arayüz de tasarlanabilir.

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda batarya SoC tahmini için yeterli olan eşdeğer devre modeli önerilmiş, bataryalardaki bozunmanın asıl nedeninin sıcaklık olduğu sonucuna varılmıştır. Bu, sürüş sırasında olduğu gibi depolama sırasında da geçerlidir. Bir bataryanın kullanımı esnasındaki akım seviyesi ve bataryanın hangi şarj-deşarj aralığında kullanıldığı da diğer önemli faktörlerdir.





# CONTRIBUTIONS TO OPTIMIZATION OF LI-ION BATTERY MODELS AND ANALYSIS OF BATTERY DEGRADATION

## SUMMARY

It is very important to accurately estimate the remaining driving distance of electric vehicles (EV) to avoid range anxiety. Drivers need to know how far they can go without recharging the batteries in the vehicle. In addition, the battery management system must predict when the batteries should be replaced. The remaining charge calculation must be of high accuracy to take full advantage of the battery's capacity. The state of charge (SoC) of a battery or battery pack is similar to the fuel gauge of a conventional vehicle. SoC estimation techniques are also needed by the battery management system (BMS) for balancing battery cells in electric vehicles. The SoC estimate should be accurate in all operating conditions and should take into account changes in temperature, different flow rates, and cell aging. High temperatures, wide SoC operating ranges and compelling load profiles accelerate cell aging. Coulomb counting is a simple technique used to estimate SoC by integrating the measured current over time. However, Coulomb counting has several disadvantages. The Coulomb counting depends on the current flowing from the cell to the external circuits and does not take into account leakage currents and other parasitic reactions in the cell. In this technique, existing measurement errors should be periodically calibrated as they are accumulated over time and corrected. The maximum charge capacity of the cell depends on a number of factors such as average discharge current, discharge time, internal cell temperature, storage time and number of cycles.

Equivalent circuit modeling (ECM) is the most common approach to battery numerical analysis. One or two RC block models for lithium cells are commonly used circuit topologies. It has the advantage of being simple to calculate and can easily be combined with methods such as Coulomb counting for periodic calibration during rest. The model is also available for use with adaptive methods such as the extended Kalman filter (EKF). This thesis compares the performance of methods used to develop an isothermal lithium cell model. The reduction of the general ECM with  $n$  RC blocks to an ECM with only one RC block is sufficient to take into account all the dynamic characteristics of the cell, including non-linear open circuit voltage, average discharge current, and internal cell temperature. A numerical parameter estimation scheme using the impact discharge test in high-power lithium cells was performed using MATLAB®, Simulink® and Simscape™. The parameter estimation procedure provides data tables showing the exchange of equivalent circuit elements due to SoC. The model was then used to verify the deterioration mechanism of the battery using validated experimental data. This process can be used to estimate SoC under the actual operating conditions of the battery.

The aim of this study is to compare and optimize different equivalent circuit models especially for Lithium-Ion batteries, which are used extensively in electric vehicles, and to investigate the deterioration of the model as a cell and package on the main operating variables. Battery performance was compared using battery modeling

methods to accurately predict battery performance. Commercially used battery testers cause a lot of energy loss and are not ideal for use in high-power automotive-grade battery cells. The proposed models are intended to be applied to real-time BMS systems to further enhance vehicle performance.

The most optimized model was used to investigate which factors affect the degradation of lithium ion battery. To demonstrate this, the model developed should be able to determine the health status of a battery cell or package using data specified in terms of cell configuration, temperature, and charge / discharge usage.

Taking into account the heat exchange between the cells, simulations were performed for the battery packs in the electric vehicles and also the degradation levels during the particular operating conditions were evaluated. Accurate estimation of the remaining capacity (e.g. range in electric vehicles) is essential to reduce operational concerns such as range, capacity, and safety in sensitive applications where batteries are used. In addition, battery management systems must estimate how much the battery needs to be charged and discharged and when it should be replaced. The calculation of the battery state of charge status must be of high accuracy to take full advantage of the battery. For all of these, BMS systems need additional algorithms that serve to correct SoC's prediction by capturing battery cell parameters that vary according to internal and external factors. In this thesis, in order to help BMS systems and increase reliability in sensitive applications, a study has been made to obtain the most optimized battery model, the performance of equivalent circuit models has been compared based on experimental data and aging mechanisms have been examined over the preferred model.

In order to evaluate battery models and estimation of model parameters, it was aimed to obtain an overview using the techniques previously published in the literature. The techniques used were used to obtain a mathematical model for a lithium-ion battery and then to experimentally validate the proposed model. The structure of the models is in principle sufficient for other types of lithium batteries.

The results of cycle aging as well as cycle aging during use are shown in realistic scenarios. The cell discharges 0.5 C for one hour, followed by a rest of 11 hours, followed by a charge of 0.5 C for one hour and a rest of 11 hours. It is seen that the cell is almost linearly disrupted in the inclined resting cell which increases in charge and discharge times. The whole process can be seen linearly as the scheme repeats itself. If the sequence is simulated for a sufficiently long period of time, a nonlinear calendar loss graph may appear.

There is also a distortion effect whose effect is not sufficiently defined in the given figures. Due to the reduced cell capacity, the charging rate required to charge the same amount will be higher. This leads to a higher temperature and produces a self-feeding cycle for deterioration. If it is desired to summarize the long-term effects of cycle losses and calendar losses, it can be said that cycle losses will increase over time and calendar losses will decrease over time.

The health level of a battery pack will be optimal, the health level of a single cell with the worst data and reliability. Since the cells in the package exchange heat with each other, the cell packs will generally degrade faster than in a single cell. Conversely, the heat exchange between the cells will contribute to heating when the battery cells are exposed to dangerously low temperatures. The conclusion is that a thermal management system will greatly affect battery life.

The battery cells are connected in series to provide the required voltage and in parallel to reach high capacity. Depending on the configuration in the cell packs, the state of health may vary as the cells deteriorate.

Shorter simulations have not been presented due to long simulation times in cell packs. It is intended to demonstrate the basic properties of degradation in cell packs, in comparison with the given, single cell batteries. There are also areas where battery packs can contribute to the degradation model.

By combining degradation patterns with a vehicle model and driving cycle, it is possible to assess how much degradation will occur for a given scenario. The results related to the effect of temperature and SoH on degradation for a single cell and cell package were also found in the vehicle model. During both use and storage, high temperature is the most important factor affecting degradation.

In electrical vehicle simulation, cycle losses seem to be a greater factor than calendar losses. This relationship will increase if the vehicle is driven for a longer period of time for one day or if it is driven in more difficult terrain. However, the opposite relationship can be seen in PHEV vehicles; calendar aging is likely to play a greater role in the deterioration of the battery.

The electrical vehicle simulation is intended to provide data on what needs to be considered in relation to the longevity of cell packs for a given scenario. This method can also help in deciding which strategies to use when designing battery management systems. In addition to battery management systems, it can be helpful to make application-specific interpretations for cooling systems and where the battery will be used, for example, to decide when to use electrical power transmission in a hybrid vehicle.

The first part of this study provides a comparison on the overall structure of equivalent circuit cell models previously presented in the literature without including cell thermal dynamics. First of all, a practical method is shown to generate data tables corresponding to SoC using pulse discharge experimental data and to evaluate equivalent circuit parameters. The studied Lithium-Ion cell chemistry is simulated with the Rint model with a voltage source and series resistance, the Thevenin model with additional RC arm, the DP model with two RC arms and the PNGV model with a series capacitance in addition to the Thevenin model. For a model, the most appropriate optimization was made using the pulse discharge test data. Data tables of R, C, E values varying with SoC were created and these tables were used in the second experiment.

With the practical work performed, it was verified using a 20 minute charge-charge cycle and optimized for simulations. Simulation data of each model were compared with experimental data and maximum percentage errors were determined. According to the data obtained, the biggest percentage error of the models was calculated as 3.817% in the Rint model, 1.51% in the Thevenin model, 2.102% in the PNGV model and 1.379% in the DP model. Based on these results, it can be said that second-order equivalent circuit models such as PNGV and DP do not provide enough improvement. However, it may be the preferred choice for applications requiring precision. For this reason, the DP model was used as reference and used in the decomposition calculations and simulations within the scope of the thesis. The models compared in the parameter estimation stage were developed with a simple single cell battery model in mind. However, since the cells are generally formed from cell packs whose thermal parameters are different from each other, the idea of preferring non-isothermal models to calculate individual temperature of the cells in more sensitive SoC estimation applications has been confirmed.

The method in this study demonstrates that electrochemical systems can be modeled using equivalent circuit models. Parameter estimation data to be used with this method can be used as an auxiliary algorithm in SoC calculation of BMS systems. In further

studies, the data tables created can be made for a wide temperature range, not for a single temperature value, and parameter matrices can be created. These matrices will enable the estimation of SoC at different operating temperatures. Another study subject that will contribute to the literature is to observe the aging of the battery against the long-term charge-discharge profile and to calculate the remaining useful life.

In this thesis, a model considering cell degradation for Li-ion battery cells and cell packs has been developed. Degradation is a function of use-dependent cycle aging and time-dependent calendar aging.

The model used is based on an equivalent circuit model representing a Li-ion battery. This model has also been extended to include degradation of the battery. It is possible to use the model to calculate time-dependent health by determining driving conditions, ambient temperature, and characteristics of the battery cell or package. It is also possible to configure this model to match the specifications of a particular battery group in electric vehicles and to estimate how health changes in a given driving scenario.

The main result of degradation is that temperature is the most effective factor in cycle aging as well as calendar aging. The temperature of the cells will depend on the ambient temperature and the charge / discharge current. The average state of charge is another factor affecting degradation, but in general its contribution to degradation is less than the temperature.

It is healthier to keep a lithium-ion battery close to a low charge state rather than a high level. If possible, keeping the charge percentage deviations (DoD) low may also extend battery life. However, this may not be possible for all applications, especially for BEVs, as this will impede range.

In this thesis, there are some topics that can be expanded about decomposition modeling. Ideally, it should be preferred that the battery cell model and the battery aging model data have the same chemistry and properties. In this thesis, cell model is based on lithium nickel manganese cobalt oxide cells, but aging models are lithium iron phosphate type.

It may be possible to see if models can be developed to reduce computational time, so that longer simulations can be made. Another consideration is whether it is sufficient to consider the degradation effects due to ohmic warming for different current levels, or whether the current needs to be taken into account to better model capacity losses. Thus, it is possible to evaluate separately the disruptions that occur during the charging and discharging process.

The model can be expanded to include more factors that affect degradation, such as charging above and below shear voltages or the effects of use at temperatures below zero. Other areas that can be expanded include studies on cell balancing and the model of the battery management system. Areas such as more detailed heat exchange and more realistic test scenarios can also be improved. In order to more easily test different package configurations and operating conditions, a graphical interface can also be designed in which the user can specify the desired information and allow the program to create and simulate the selected scenario.

Electro-chemical analysis methods are often used by battery manufacturers and battery chemistry researchers and are not very useful for electrical engineers and system designers who need simple and simple models expressed as electrical quantities. As a result, equivalent circuit models aimed to simplify the modeling of the batteries of hybrid and electric vehicles.

Numerous models have been developed in the past to characterize and simulate lithium cells. Detailed electrochemical models simulating the internal dynamics of lithium

cells are complex, time-consuming, and inflexible in their calculations. It is also not suitable for system-level modeling or run-time applications. An alternative approach is to use equivalent circuit models. In this case, the aim is to establish a direct relationship between the electrochemical events and circuit elements within the cell. The level of complexity and calculation time are taken into account when selecting the model topology. These models capture the effects of nonlinear electrochemical events and help avoid long electrochemical process calculations. They are particularly suitable for system-level modeling, such as the whole of electric vehicles.

The number of equivalent circuit elements leads to a balance between fidelity and complexity. The parasitic branch can be omitted for cells with high coulombic activity. The choice of the model structure is determined by the balance between the ability to overlap the experimental data, the complexity of the equivalent circuit, and the calculation time. An extremely complex equivalent circuit fits well into experimental data sets, but is not suitable for embedded system applications in terms of computation time. In general, the level of complexity should be determined by associating each circuit component with an electrochemical phenomenon within the cell. Depending on the characteristics of the problem to be analyzed, the number of RC blocks is typically from one to two, because a greater number of blocks increases the computational time, although it does not significantly improve the accuracy of the model.

In this thesis, equivalent circuit models with different number of RC branches are used. Then the appropriate circuit topology was selected for the battery breakdown calculations. It is assumed that the equivalent circuit topologies used are sufficient to capture the general dynamics required for health status calculations.



## 1. GİRİŞ

Menzil kaygısını önlemek için elektrikli araçların (EV) kalan sürüş mesafesinin doğru olarak tahmin edilmesi çok önemlidir. Sürücülerin, araçtaki bataryaların yeniden şarj edilmesi gerekmeden ne kadar yol gidebileceklerini bilmeleri gerekir. Ayrıca, batarya yönetim sistemi bataryaların ne zaman değiştirilmesi gerektiğini de tahmin etmelidir. Kalan şarj hesaplaması, bataryanın tam kapasitesinden yararlanmak için yüksek doğruluğa sahip olmalıdır. Bir bataryanın veya batarya ünitesinin şarj durumu (SoC), geleneksel bir aracın yakıt göstergesine benzer. SoC tahmin tekniklerine, elektrikli taşıtlardaki batarya hücrelerinin dengelenmesi için batarya yönetim sistemi (BMS) tarafından da ihtiyaç duyulmaktadır. SoC tahmini, tüm çalışma koşullarında doğru olmalı ve sıcaklıktaki değişimleri, farklı akım oranlarını ve hücre yaşlanmasını dikkate almalıdır. Yüksek sıcaklıklar, geniş SoC çalışma aralıkları ve zorlayıcı yük profilleri hücre yaşlanmasını hızlandırır. Coulomb sayımı, ölçülen akımı zamanla bütünleştirerek SoC'yi tahmin etmek için kullanılan basit bir tekniktir. Bununla birlikte, Coulomb sayımı birkaç dezavantaja sahiptir. Coulomb sayımı, hücreden harici devrelere akan akıma bağlıdır ve hücredeki kaçak akımları ve diğer parazitik reaksiyonları hesaba katmaz. Bu teknikte, mevcut ölçüm hataları zamanla biriktirildiği için periyodik olarak kalibrasyon yapılarak düzeltilmelidir. Hücrenin maksimum şarj kapasitesi, ortalama deşarj akımı, deşarj süresi, iç hücre sıcaklığı, depolama süresi ve döngü sayısı gibi bir dizi faktöre bağlıdır.

Eşdeğer devre modellemesi (ECM), batarya sayısal analizi için en yaygın yaklaşımdır. Lityum hücreler için bir veya iki RC blok modeli sık kullanılan devre topolojileridir. Hesaplamasının basit olma avantajına sahiptir ve dinlenme sırasında periyodik kalibrasyonu için Coulomb sayma gibi yöntemlerle kolayca birleştirilebilir. Model ayrıca genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) gibi uyarlanabilir yöntemlerin kullanımına da açıktır. Bu tez çalışması, izotermal bir lityum hücre modeli geliştirmek için kullanılan sezgisel yöntemlerin başarımını kıyaslamaktadır. N adet RC bloklu genel ECM'nin sadece bir RC bloklu bir ECM'ye düşürülmesi, doğrusal olmayan açık devre gerilimi, ortalama deşarj akımı ve iç hücre sıcaklığı dahil olmak üzere hücrenin tüm

dinamik özelliklerini hesaba katmak için yeterlidir. Yüksek güçlü lityum hücrelerde darbe deşarjı testini kullanan sayısal bir parametre tahmin şeması MATLAB®, Simulink® ve Simscape™ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parametre tahmini prosedürü, eşdeğer devre elemanlarının SoC'ye bağlı değişimini gösteren veri tablolarını ortaya koymaktadır. Model, deneysel veriler kullanılıp doğrulanarak daha sonra bataryanın bozunma mekanizmasını incelemek amacıyla kullanılmıştır. Bu işlem bataryanın gerçek çalışma koşullarında SoC tahmini için kullanılabilir.

Yapılan benzetimlerde hücre modelleri literatürde daha önce kullanılmış olan lityum nikel mangan kobalt oksit hücrelerine dayanmaktadır, yaşlanma modelleri ise lityum demir fosfat tipindedir. Tez aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Bölüm 2'de genel batarya özellikleri açıklanmıştır. Bölüm 3 batarya benetim yöntemlerinden bahsetmektedir. Bölüm 4'de eşdeğer devre modelleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Bölüm 5, deney düzeneği, en uygunlaştırma aşaması ve bataryalardaki bozunumun incelemesinden oluşmaktadır. Bölüm 5'te batarya bozunum modeli bir elektrikli araca uygulanmıştır, Bölüm 6'da tezde elde edilen sonuçlar açıklanmış ve ileri çalışmalar için öneriler yapılmıştır.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bu çalışmanın amacı, özellikle elektrikli araçlarda yoğun olarak kullanılan Lityum-İyon bataryalar için farklı eşdeğer devre modellerinin karşılaştırılıp en uygunlaştırılması ve elde edilen model ile bataryanın ana işletme değişkenleri üzerinde hücre ve paket olarak bozunumlarının incelenmesidir. Batarya başarımını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılan batarya modelleme yöntemleri kullanılarak başarımları karşılaştırılmıştır. Ticari olarak kullanılan batarya test cihazları, çok fazla enerjine kaybına yol açmaktadır ve yüksek güçlü otomotiv sınıfı batarya hücrelerinde kullanım için ideal değildirler. Önerilen modellerin, araç başarımını daha da artırmak için gerçek zamanlı BMS sistemlerine uygulanması amaçlanmıştır.

Elde edilen en uygunlaştırılmış model ile hangi faktörlerin lityum iyon pilin bozunmasını ne ölçüde etkilediğini araştırılmıştır. Bunu ortaya çıkarmak için geliştirilen model, hücre konfigürasyonu, sıcaklık ve şarj/deşarj kullanımı açısından belirtilen verileri kullanarak, bir batarya hücresinin veya paketinin sağlık durumunu belirleyebilmelidir.



Hücreler arasındaki ısı değişimini hesaba katarak, elektrikli araçlarda bulunan batarya paketleri için benzetimleri yapılmış ve ayrıca belirli çalışma koşulları sırasındaki bozunma seviyeleri değerlendirilmiştir.

## 1.2 Literatür Araştırması

Son yıllarda elektrikli araçlar (EV) popülerlik kazanmıştır ve pek çok otomobil üreticisi bu gelişmekte olan pazarın bir parçası olmak için bu araçlar geliştirmektedir. Elektrikli araçlar bu tezde akülü elektrikli araçlar (BEV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV) olarak ayrılmıştır. Bir BEV tüm gücünü aküden çekerken, hibrit varyantlar ayrıca içten yanmalı bir motora sahiptir.

Bu araçlarda batarya, aracın en önemli yapılardan biridir. Bir BEV'deki akü, içten yanmalı motora sahip normal bir otomobildeki yakıt deposuna benzetilebilir. Bu nedenle aracın şarj olmadan ne kadar seyahat edebileceği sınırlayıcı bir faktördür. Bir HEV veya PHEV aküsündeki kapasite sınırı, tamamen elektrikli çalışmaya ne ölçüde bağlı kalılabileceğini belirler.

Dünya çapında kentsel bölgelerdeki elektrikli ve hibrit elektrikli otomobil satışlarındaki artış ve çok çeşitli tüketici elektroniği ürünleri, düşük maliyetli, çevre dostu ve güvenilir bir enerji depolama cihazı talebini artırmaktadır. Lityum-iyon bataryalar şu anda, maliyet, enerji yoğunluğu ve güvenlik dikkate alındığında en iyi çözümlerden birini sunmaktadır.

EV tasarlarken bataryalarla ilgili dikkate alınması gereken birçok husus vardır. Aküler pahalı, ağır ve yüksek hacimlidir ve bu nedenle mümkün olduğu kadar etkin bir şekilde kullanılması arzu edilir. Ayrıca bataryaların belirli bir ömrü vardır; kapasitelerini kaybedecekler ve sonunda artık işlevsel olamayacaklardır. Bu tezin ana odağı, bu bozunmayı modellemek ve pilin sağlık durumunu (SoH) etkileyen mekanizmaları anlamaktır. Elektrikli araçlarda akülerin ömrünü uzatmak için otomobil üreticileri akülerinde mümkün olduğunca düşük bir bozunma oranına sahip olmak istemektedir.

Bu araçlarda kullanılan bataryalar, seri ve paralel devrelerin bazı konfigürasyonlarında bağlanmış ayrı hücrelerden oluşan batarya paketleridir. Batarya paketinin bozunması, tek tek hücrelerin bozunmasına ve birden çok hücrenin elektriksel ve termal olarak nasıl düzenlendiğine bağlı olacaktır. Hücrelerin kimyasal özellikleri ve paketlenme yöntemi de aynı zamanda önemlidir.

Batarya modellenmesi, batarya hücrelerinin ve hücre paketlerinin gerçek aküler üzerinde test edilmeden önce nasıl davranacaklarına dair bilgi toplamak için kullanılır. Batarya davranışını modellemek için bataryalarla ilgili bazı temel bilgilere ihtiyaç vardır. [1]'deki çalışma genel olarak bataryalarla ilgili derinlemesine bilgi sağlar ve ayrıca bu tezde ele alınacak kimya olan lityum iyon bataryalara (Li-İyon) kapsamlı bir bölüm ayırmaktadır. [2]'deki çalışma, batarya yönetim sistemlerine (BMS) odaklanır ve batarya hücrelerinin paketlerde nasıl davrandığı ve bunların nasıl kontrol edileceği hakkında bir fikir verir. Bataryaların büyük öneme sahip olduğu elektrikli araçların itiş gücü ile ilgili bilgiler ayrıca [3]'de bulunabilir.

[1]'de bir ve iki RC dalı kullanarak eşdeğer devre modelinin fiziksel bir yorumu bulunabilir. RC dalında direnç yük transfer direnci ve kapasitans çift katman kapasitansdır. İkinci RC dalı, anot ve elektrolitin reaksiyona girmesiyle oluşan katı elektrolit arayüzün (SEI) kapasitesi ve empedansı olarak görülebilir.

Bataryanın davranışını tahmin etmek için, genellikle iki kategoriye ayrılacak birçok farklı model kurulmuştur: elektrokimyasal modeller ve eşdeğer devre modelleri. Her ne kadar elektrokimyasal model, temel elektrokimyasal parametreler ve değişkenler açısından batarya dinamikleri içindeki temel fiziği oluştursa da, karmaşıklığı nedeniyle batarya yönetim sistemlerine uygulandığında başarıyı yüksek değildir. Bu model tasarlamadan önce çok sayıda tasarım kriteri ve elektrokimyasal kinetik parametrenin elde edilmesi gerekir. Bu nedenle, elektrokimyasal mekanizma modeli genellikle batarya içindeki reaksiyon işlemi anlamak ve bataryanın tasarımını ve üretimini yönlendirmek için kullanılır. Eşdeğer bir devre modelinde (ECM) dirençler, kondansatörler ve gerilim kaynakları, şarj etme ve boşaltma işlemlerini tanımlamak için kullanılır ve modeldeki her bir bileşen bataryanın kinetik ve kararlı haldeki davranışlarını temsil eder. Basit matematiksel hesaplamalar yaparak daha sezgisel ve kullanımı kolay bir yapı sunar. Eşdeğer devre modelleri, lityum-iyon bataryalar için şarj durumu (SoC), sağlık durumu (SoH) ve çalışma durumu (SoF) tahmininde yaygın olarak kullanılmıştır. Feng ve Weng tarafından lityum-iyon batarya kısa devre tespiti için birinci dereceden RC (direnç kapasitör) modeline dayanan eşdeğer devre modeli kullanılmıştır [4]. Chiang, Sean ve Ke, lityum iyon pillerin açık devre geriliminin direncini tahmin etmek için birinci dereceden bir RC eşdeğer devre modeli kullanmıştır [5]. Mathew ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada, yine lityum iyon batarya paketlerinin modellenmesi ve simülasyonu için birinci

dereceden RC eşdeğer devre modelini kullanılmıştır [6]. Panchal ve arkadaşları tarafından yapılan iki farklı çalışmada iç sıcaklık dağılımı, açık devre gerilimi, ısı üretimi ve iç direnç göz önüne alınarak yapılan bir MATLAB Simulink modeli kullanılarak bataryalar için birinci dereceden bir RC eşdeğer devre modeli oluşturuldu ve doğrulandı [7], [8]. Referans [9] ve [10]' de Lityum-iyon bataryaların birinci dereceden RC eşdeğer devre modeline dayanan bir SoC tahmin yöntemi incelenmiştir. Referans [11] ve [12]'da yapılan çalışmalar, lityum-iyon pillerin ikinci dereceden RC eşdeğer devre modeline dayanan bir SoC tahmin yöntemini araştırmıştır. Ayrıca, Remmlinger de bir lityum-iyon akünün ikinci dereceden RC eşdeğer devre modellerine dayanarak SoH tahmini üzerinde çalıştı [13]. Lityum-iyon akü modellemesi için ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelini kullanan bir diğer çalışma Xia tarafından yapılmıştır [14].

[15]'nin yazarları, lityum-demir-fosfat bataryanın dinamiklerini yakalamak için üç RC dalından oluşan bir model önermiştir. Fazladan RC dalı kullanmak zaman sabitinin büyümesine neden olmaktadır. Fakat, histerezis davranışı (şarj ve deşarjda gerilimlerin birbirinden farklı grafik göstermesi) yakalanmak istenirse kullanılabilir. Histerezis davranışı başka bir modelde, bataryanın şarj mı yoksa boşalma mı olduğuna bağlı olarak değişen bir dirence kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16].

Eşdeğer devre modeline dayanan SoC ve SoH tahmin algoritmalarının batarya yönetim sistemlerinde en önemli tahmin algoritmaları sınıfı olduğu görülebilir. Birçok bilim adamı, basitten karmaşığa çeşitli eşdeğer devre modelleri tasarlamışlardır. Bununla birlikte, lityum-iyon pillerin eşdeğer devre modelleri üzerinde çok az sistematik karşılaştırmalı çalışma vardır ve basit modeller bataryaların dinamik özelliklerinin benzetimini yeterince yapamamaktadır. Ayrıca, karmaşık algoritmalara sahip olanların gerçek sistemlere uygulanması zordur. Bu modeller arasından yapılacak seçim, modellemenin karmaşıklığı, hassasiyet ve hesaplama süresine göre belirlenir. Bu nedenle, literatürde yaygın olarak kullanılan farklı dereceden RC modelleri basitliği ve göreceli doğruluğu nedeniyle bu çalışmada karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu tez çalışmasında öncelikle yukarıdaki modellerin parametreleri deneysel yöntemlerle bireysel olarak tanımlanmış ve daha sonra simülasyon modelleri Matlab / Simulink ortamında oluşturulmuştur ve son olarak her model için sonuçların başarımları karşılaştırmalı olarak doğrulanmış ve tartışılmıştır.

Bir bataryanın sağlık durumu kullanıma bağlı olarak değişebilen belirsiz bir terimdir. Eşdeğer devre modeli bazlı Li-iyon pil modeli sunan Long Lam, LiFePO<sub>4</sub> hücreleri için kapasite azalması üzerine bir makale yayınlamıştır [17]. Yazar, sıcaklık ve SoC'nin bir fonksiyonu olarak kapasite kaybını öngören bir SoH tahmini algoritması önermektedir. Lam, EV kullanımı için C-hızının oda sıcaklığında yaşlanmayı etkilemediğini ve dolayısıyla SoH tahminine bir girdi olmadığını belirtiyor. Bu, sıcaklıklarını aynı seviyede tutarken, farklı C hızına sahip akım çevrimleri ile test edilmiş ve omik ısınmanın neden olduğu sıcaklık artışının C-hızının etkisinden daha ağır olduğunu kanıtlanmıştır. Bu, BEV ve PHEV kullanımlarında, C hızı, akü üreticisinin belirtilen eşikleri dahilinde tutulduğu sürece doğru kabul edilebilir. Yüksek bir C-hızının düşük sıcaklıklarda bataryadaki kapasite kaybını arttırdığı da belirtiliyor. Fakat bu durum, deneysel veri eksikliği ve EV'deki BMS'in bu durumu önleyeceği varsayımı nedeniyle modellenmemiştir.

Kapasite kaybının modellenmesinin, şarj-deşarj döngü sayısından ziyade uygulanan şarj işleminin bir fonksiyonu olarak kurulması daha fazla avantaja sahiptir. Hücre bozunmalarının, hücrenin SoC grafiğinde hangi noktadan itibaren şarj edildiği veya boşaldığına bağlı olduğu tespit edilmiştir [18].

Bir hücre aynı zamanda, takvim yaşlanması olarak bilinen zamanla bozunur. Takvim yaşlanması, literatürde şarj-deşarj döngüsü nedeniyle oluşan yaşlanmaya göre daha az açıklanmaktadır, çünkü takvim yaşlanma testlerinin tamamlanması birkaç yıl almaktadır. Takvimin yaşlandırılması genellikle yalnızca sabit sıcaklık ve şarj durumuna dayanan Arrhenius denklemi ile tanımlanır. [19]'te Arrhenius denklemine dayanan ve zamanla değişen çalışma koşullarını da içeren yaşlanma modeli sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan ve önerilen model budur.

## 2. GENEL BATARYA ÖZELLİKLERİ

### 2.1 Batarya Teknolojisi

İlk batarya 1800 yılında Alessandro Volta tarafından icat edildi. İki ana batarya türü bulunmaktadır: tek kullanımlık ve bir kez kullanıldıklarında tekrar şarj edilemeyen birincil hücreler ve dışarıdan akım uygulandığında birçok kez şarj edilip kullanılacak ikincil hücreler. Çizelge 2.1'de her iki tip bataryadan birkaç örnek gösterilmektedir [20].

**Çizelge 2.1 :** Batarya sınıflandırması.

| Birincil Hücreler | İkincil Hücreler   |
|-------------------|--------------------|
| Çinko Karbon      | Kurşun-asit        |
| Alkali-mangan     | Nikel-kadmiyum     |
| Lityum            | Nikel-Metal Hidrür |
| Magnezyum         | Lityum-İyon        |
| Alüminyum         | Lityum-Polimer     |

Örneğin, çinko-karbon, magnezyum ve alüminyum pilleri geri dönüşü olmayan kimyasal reaksiyonları nedeniyle birincil hücreler olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca piyasada kolayca bulunabilen alkalın piller bu gruba girmektedir. Bu tip piller tek kullanımlık olduğu için şarj kontrolüne, koruma devresine veya yakıt ölçümüne gerek duymaz. İkincil hücreler ise başarımlarını arttırmak için bu işlemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu grup içinde, bu tez içinde odaklanacağımız Lityum-iyon pilleri bulabiliriz. Bu piller günümüzün taşınabilir kullanıcı elektroniği dünyasında yaygın olarak kullanılmaktadır [21] [22].

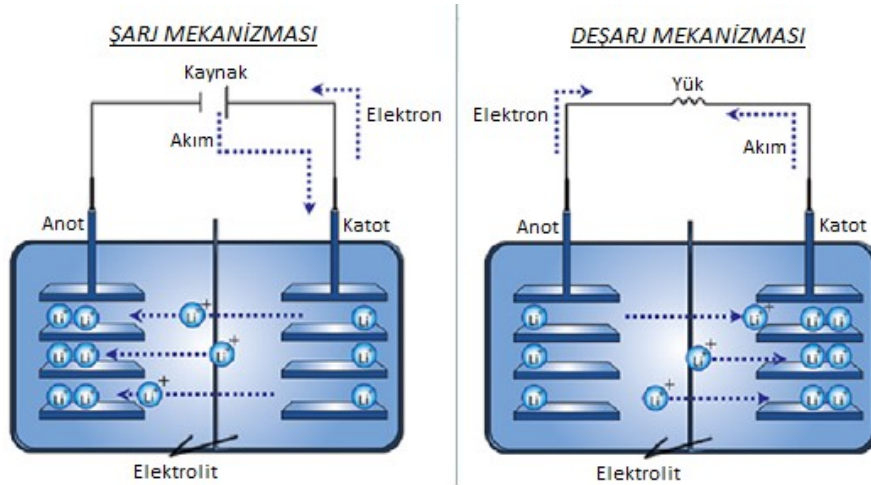
Bataryalar haricinde elektrikli taşıtlarda kullanılan bir diğer depolama teknolojisi yakıt hücreleridir. Yakıt hücreleri harici bir kimyasal enerji kaynağı kullanır ve bir hidrojen kaynağı veya oksijen kaynağı (genellikle hava) sağlandığı sürece süresiz olarak çalışabilir. Hidrojen kaynağı genel olarak yakıt olarak adlandırılır. Hidrojenin oksidasyonu, elektrokimyasal olarak çok verimli bir şekilde gerçekleşir. Oksidasyon sırasında, hidrojen atomları su oluşturmak için oksijen atomlarıyla reaksiyona girerler; işlemde elektronlar serbest bırakılır ve harici bir devrede elektrik akımı akmasını sağlar.

## 2.2 Çalışma Prensipleri

Bir batarya, içindeki kimyasal enerjiyi, elektronların bir elektrottan diğerine transferini içeren bir oksidasyon redoks reaksiyonu yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren, bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir cihazdır. Bir batarya deşarj esnasında, Şekil 2.1'deki gibi çalışır. Bataryanın her iki terminali de bir harici yüke (örneğin bir lambaya) bağlandığında, okside olan anottan harici yüke elektrotlar akar. Elektrolit, anot ve katot arasındaki yük transferine izin veren iyonik bir iletkenidir.

Li-iyon batarya hücresi, enerji depolamak için lityum iyonları kullanır. Tüm pillerde olduğu gibi, hücrenin işlevi kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektir ve bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, ikincil tip bir hücre olduğu için tersini de yapar. Bir batarya hücresi, bir negatif elektrot, bir pozitif elektrot, elektrolit sıvı ve çoğu Li-İyon hücresinde ayrıca bir de ayırma duvarından oluşur. Pozitif elektrot bataryanın ne tür bir Li-İyon hücresine sahip olduğunu tanımlar; örneğin lityum demir fosfat veya lityum kobalt oksit. Negatif elektrot genellikle grafitten yapılmaktadır. Ayırıcı duvarın gözenekli olması gerekir, böylece lityum iyonları elektrotlar arasında geçiş yapabilir ancak elektronlar arasında yapamaz.

Şarj ve deşarj sırasında akü hücresinin çalışmasına genel bir bakış Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Sağdaki şekilde gösterilen pil hücresi harici bir yüke bağlanır ve elektronlar anottan katoda akar. Benzer şekilde, hücre soldaki şekilde olduğu gibi şarj edilirken akış tersine çevrilir.



Şekil 2.1 : Lityum-iyon pillerin şarj ve deşarj mekanizması [23].

## 2.3 Temel Batarya Parametreleri

Bataryalar aşağıdaki parametreler ile karakterize edilir:

a) Kullanılabilir güç ( $P = V \cdot I$ ): Batarya gerilimi ( $V$ ) ve karşılayabileceği maksimum akımdan ( $I$ ) elde edilir.

b) Depolanan Enerji (KWh): Bu parametre, elektrikli aracın (EV) özerkliğini ve hibrit bir elektrikli araç (HEV) için ise verimini belirleyecektir. Bataryanın enerjisi, amper-saat (Ah) cinsinden kapasitesinin ve gerilimin bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

c) Bataryanın şarj durumu (SoC): Şarj durumunun tanımı (SoC), bataryanın kalan şarjının toplam şarja olan oranıdır. SoC genellikle yüzde olarak ifade edilir, burada %100 tamamen şarj edilmiş demektir ve %0 tamamen boşaltılmış demektir. SoC kritiktir bir büyüklük olmasına karşın, mevcut tümleşik ölçüm teknolojileri göz önüne alındığında kesin olarak hesaplanamaz.

d) Batarya Sağlık Durumu (SoH): SoH, bir bataryanın, nominal kapasite kaybıdır ve fiziksel durumunu tanımlar. SoH'nin genel bir tanımı, bir bataryanın sağlık durumunu ve yeni bir batarya ile karşılaştırıldığında belirli bir başarıyı sağlama yeteneğini ne kadar yansıttığıdır. EV uygulamalarındaki SoH, belirli bir mesafeyi sürdürebilme özelliğini karakterize etmek için kullanılır. Araştırmacılar ve üreticiler, bataryanın sağlık eşiği olarak nominal kapasite yüzdesini kullanır. Şarj-deşarj döngüsünden dolayı azalan kapasitenin, nominal kapasitesinin %80'ine düşmesi, batarya arızası olarak tanımlanır.

e) Batarya Ömrü (SoL): SoL ayrıca bir bataryanın kalan faydalı ömrü (RUL) olarak da bilinir. Doğru SoL tahminleri, bataryaların kullanım ömrünü uzatmak için arıza önleme ve bakımı kolaylaştıracaktır. Bununla birlikte, geçmişte, SoL öngörüsü konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Batarya güvenilirliği konusundaki artan talep, özellikle askeri uygulamalarda, en gelişmiş algoritmaların kullanımını gerektirmiştir.

## 2.4 Elektrikli Araçlarda Batarya Gereksinimleri

Bataryaların ağırlığı ve hacmi elektrikli araçlar için en önemli faktörlerden bazılarıdır. Elektrikli araç (EV) için batarya seçerken aşağıdaki şartları yerine getirmesine dikkat edilir:

- a) Birim kütleden alınan enerji (Wh/Kg): Kütle birimi başına depolanan enerji miktarı. Bataryanın ve aracın özerkliğinin tanımlanmasına izin verir.
- b) İyi bir güç / ağırlık oranı (W/Kg): Bataryanın birim kütlesi tarafından sağlanan güç.
- c) Yüke vereceği sabit ve kararlı bir gerilim.
- d) İyi bir özerklik.
- e) Döngü sayısı ile ifade edilen (şarj/deşarj) maksimum batarya ömrü: Batarya ömrü, batarya kullanım süresince, nominal değerinin %80'inden daha yüksek bir değerde olmalıdır.
- f) Daha az bakım gereksinimi
- g) Kullanılabilirlik

## 2.5 Güvenlik

Li-iyon bataryaların uygunsuz biçimde kullanılması termal kaçaklara neden olabilir ve batarya kimyasına bağlı olarak tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Termal yönetim ve güvenlik prosedürleri önemlidir, çünkü çok yüksek sıcaklıklar, kimyasal tepkimeleri tetikleyebilir. Bir hücrede sıcaklık çok yükseldiğinde, katı elektrolit arayüzü bozulur ve pozitif elektrotu elektrolite maruz bırakır. Bu işlem, yüksek sıcaklık nedeniyle daha az kontrollü bir durumda olacaktır. Bu reaksiyonlar ayrıca ekzotermiktir ve daha önce belirtildiği gibi, zincirleme reaksiyonlar için sıcaklık geri beslemesi yapar.

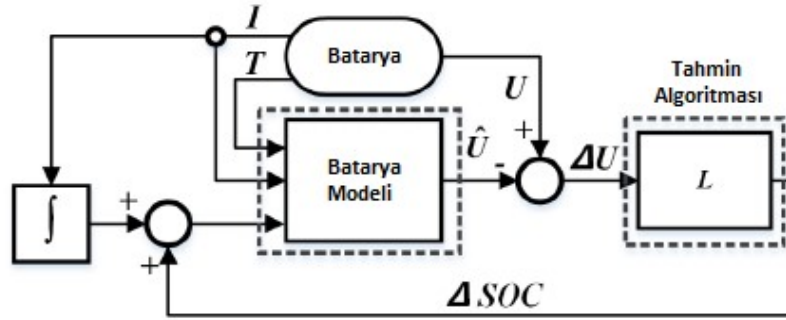
Sıcaklığın daha da artması, elektrolit bileşenlerinin bozulmasına neden olur ve hücre içindeki basıncı artırır. Araçlarda bulunan daha büyük hücreler tipik olarak bu gibi durumlarda patlamaları önlemek için emniyet deliklerine sahiptir. Ayrıca, ayırıcı, anot ve katodun kısa devre olmasına yol açan yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında eriyebilir. Negatif elektrotun da parçalanması durumunda, yangına neden olacak şekilde oksijen açığa çıkar.

Bataryalarda arıza olasılığı hücre kimyasına göre değişkenlik gösterir. Popülerlik kazanmış gibi görünen Lityum demir fosfat pillerin diğer birçok hücre kimyasından daha güvenli olduğu düşünülmektedir. Bu kimyada oksijen, demir ve fosfat ile daha güçlü bağlara sahiptir. Gün geçtikçe, farklı koşullar altında Li-iyon batarya arızaları bildirilmektedir. En bilinenlerden arasında cep telefonları gibi tüketici elektroniği ürünlerinde meydana gelen patlamalar sayılabilir.



### 3. BATARYA MODELLEMESİ VE BENZETİM YÖNTEMLERİ

Elektrikli araçların sürüş koşulları, kullanıldığı ülke ve coğrafyaya bağlı olarak önemli farklılıklar gösterir; bu, tahmin yöntemlerinin çeşitli sürüş koşullarında SoC'yi doğru bir şekilde tahmin edebilmesi gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle, EV'ler için gelişmiş sağlam SoC kestirim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Model tabanlı yöntemler, SoC tahmini konusunda iyi bir doğruluk sağladığı için sıklıkla kullanılmıştır. Model tabanlı SoC kestirim yönteminin yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Model tabanlı SoC tahmin şeması.

Şekil 3.1'den model temelli tahminin iki ana bölümden oluştuğu görülmektedir: bir batarya modeli ve bir tahmin algoritması. Modele dayalı tahmin yapısında, terminal gerilimini tahmin etmek için bir batarya modeli oluşturulmuştur ve akım, SoC ve sıcaklık normal girdilerdir. Model bazlı tahmin sürecini net bir şekilde açıklamak için, batarya modelinin tam olarak gerçek bataryaya eşdeğer olduğu ve sensörlerden yapılan ölçümlerin gürültü içermediği varsayılmaktadır. Bu nedenle, eğer gerçek SoC batarya modelinin girişi ise, batarya modelinin öngörülen geriliminin ölçülen terminal gerilimiyle aynı olması beklenir. Ancak, SoC'deki hatalar her zaman gerçek uygulamalarda mevcuttur. Batarya modelinin çıkışı ile terminal gerilimi arasındaki sapma, her örnekleme zamanında SoC'yi düzeltmek için kullanılabilir. Daha sonra, düzeltilmiş SoC, bir sonraki döngüde terminal geriliminin hesaplanması için batarya modelinin girişi olarak işlev görür. SoC kestirim hatası, dinamik geçici hata ve sabit durum hatası içerir. Tahminleme algoritmasında büyük bir kazanç  $L$  kullanıldığında

dinamik geçici hata küçük olabilirken, modelleme doğruluğuyla ilgili hatalar L'den bağımsızdır, bu, L kazancının batarya modelleme hatalarını düzeltemeyeceği anlamına gelir. Bu nedenle, doğru bir batarya modeli kesinlikle SoC tahmininin doğruluğunu artırır. Model tabanlı SoC tahmin yöntemleri, kapalı döngü yapısına sahip olması nedeniyle ilk SoC'ye duyarsızdır [24].

Model bazında kestirim yapısındaki batarya modelinin temel işlevine dikkat çektikten sonra bu bölümde farklı batarya modelleme yöntemleri anlatılmaktadır. Modelleme prensiplerine göre, modelleme yöntemleri temel olarak dört kategoriye ayrılır: ampirik modeller, ECM'ler, elektrokimyasal modeller ve veri odaklı modeller [25].

### 3.1 Ampirik Yöntemler

Ampirik modellerde, batarya terminal gerilimi, SoC ve akımın matematiksel bir işlevi olarak temsil edilir. Basitleştirilmiş bir elektrokimyasal model olan ampirik model, düşük dereceli polinomlarla veya matematiksel ifadelerle, bir bataryanın doğrusal olmayan özelliklerini temsil eder.

Çizelge 3.1'de verilen denklemlerde,  $u_k$  terminal gerilimidir, batarya tamamen şarj olduğunda  $E_0$  açık devre gerilimidir.  $R_i$  dahili direnç,  $K_I$  ise polarizasyon direncidir.  $i_k$  anlık akımdır ve  $z_k$  bataryanın SoC'sini temsil etmektedir. Shepherd modeli, Unnewehr evrensel modeli ve Çizelge 3.1'deki Nernst modeli, literatürdeki klasik deneysel modellerdir. Nernst modeli en iyi doğruluğu elde ederken, Shepherd modeli sürekli boşaltma akımında daha iyi başarımlar gösterir.

**Çizelge 3.1 : Tipik ampirik modeller.**

| Model           | Denklem                                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Shepherd modeli | $u_k = E_0 - R \cdot i_k - \frac{K_1}{z_k}$                             |
| Universal model | $u_k = E_0 - R \cdot i_k - K_1 \cdot z_k$                               |
| Nernst          | $u_k = E_0 - R \cdot i_k - K_2 \cdot \ln(z_k) + K_3 \cdot \ln(1 - z_k)$ |

Yukarıdaki modeller daha iyi bir doğruluk için Denklem 3.1'deki gibi birleştirilebilir [26]:

$$U_k = E_0 - R \cdot i_k - \frac{K_1}{z_k} - K_2 \cdot z_k + \ln(z_k) + K_4 \cdot (1 - \ln z_k) \quad (3.1)$$

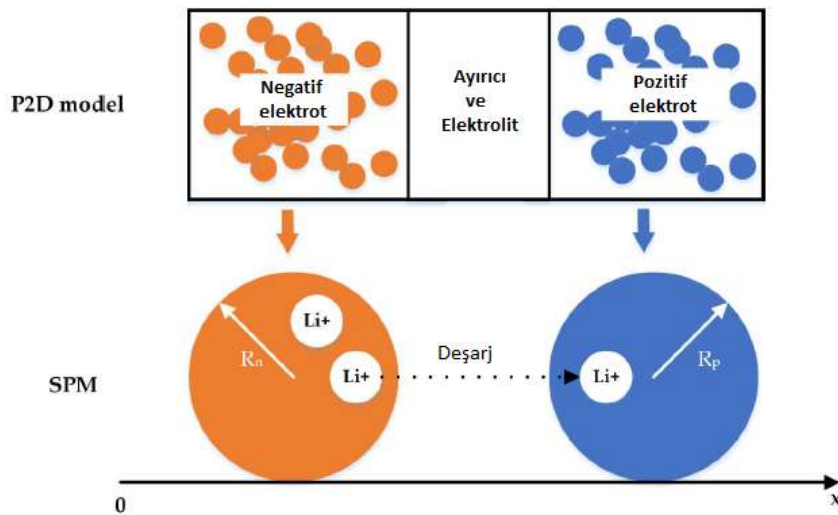
Temel ampirik modellerin modelleme doğruluğunu artırmanın başka yolları da vardır. Daha fazla parametre eklenerek ampirik modelin doğruluğu artırılabilir [27].

### 3.2 Elektrokimyasal Model

Elektrokimyasal kinetiğe ve yük aktarma işlemine göre, bataryanın içindeki iç reaksiyonları tanımlamak amacıyla elektrokimyasal modeller oluşturulur. Elektrokimyasal modeller, Faraday yasası, Ohm yasası, Fick'in yayılma kanunu ve Butler-Volmer denklemi gibi bir dizi fiziksel kuralı temel alır. Elektrokimyasal model, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler formunda ifade edilir. Bu nedenle, doğrudan analitik bir çözüme sahip olmak için, elektrokimyasal modeli kullanmanın ön koşulu olmayan kısmi diferansiyel denklemleri adi diferansiyel denklemlere dönüştürmektir. İntegral yaklaşım, Pade yaklaşımı, Ritz metodu, sonlu elemanlar metodu ve sonlu fark metodu gibi sayısal metotlar elektrokimyasal modellerde lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için sıklıkla kullanılır [28].

Ohm yasası, elektrolit ve aktif madde arasındaki potansiyel dağılımını gösterir. Fick'in difüzyon yasası, hem elektrolit hem de elektrottaki difüzyonları tanımlayabilen konsantrasyon ve difüzyon akısı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Butler-Volmer denklemi, elektrot potansiyelinin elektrot akımı üzerindeki etkisini gösterir.

Literatürde kullanılan iki çeşit elektrokimyasal model Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sahte iki-boyutlu modeli (P2D) ve Tek Parçacık Modelidir (SPM). Sahte 2D modeli konsantre çözelti teorisi ve gözenekli elektrot teorisine dayanmaktadır. SPM, elektrodu tek bir parçacık olarak gören 2D modelinin basitleştirilmesidir. 2D modeliyle karşılaştırıldığında, Lityum iyonların transferinin tanımlanması SPM için çok daha kolaydır [29].



Şekil 3.2 : Li-iyon batarya hücresinin elektrokimyasal modeli [25].

Elektrokimyasal modellerde yer alan her bir parametrenin temsil ettiği fiziksel bir büyüklük vardır. Elektrokimyasal modelin parametre tanımlaması için parçacık en uygunlaştırması (PSO) ve Genetik Algoritma (GA) gibi sezgisel yöntemler kullanılır [30]. Elektrokimyasal işlem bilgisi gerekliliğine rağmen, BMS'de bir elektrokimyasal model kullanılıyorsa hesaplama yükü de dikkate alınmalıdır. Elektrokimyasal modelin benzetim süresini hızlandırmak için yük transferi ve difüzyon denklemlerinin elektriksel analogisi kullanılır. Ancak, elektrokimyasal model sadeleştirilmiş olsa bile, hesaplama işlemi hala karmaşıktır ve çeşitli çalışma koşullarında doğruluğu garanti edilemez.

### **3.3 Veriye Dayalı Modeller**

Makine öğrenme alanındaki hızlı yöntemlerin geliştirilmesi nedeniyle, bataryadaki değişkenler arasındaki ilişki önceden herhangi bir bilgi olmadan doğrudan kurulabilir. Bu tür modelleme yöntemine dayanan batarya modelleri, ölçümün geçmiş verileri ile yakından ilgilidir. Makine öğrenme yöntemlerinin uygulamaları, modelleme sürecini çok daha kolaylaştırır. Uygulamalardan yeteri kadar eğitim örneği topladıktan sonra, makine öğrenme algoritmasının eğitim süreci boyunca veri odaklı bir model oluşturulur. Veriye dayalı modeller, girdiler ile (akım  $I$ , SoC, sıcaklık  $T$ ) terminal gerilimi arasındaki ilişkiyi doğrudan yansıtır.

Veriye dayalı modeller, uygun bir veri kümesi sağlanmışsa terminal gerilimini tahmin edebilir. Bununla birlikte, veri odaklı yöntemin doğruluğu, aynı zamanda kapsamlı kullanımını da sınırlandıran öğrenme veri seti ile büyük ölçüde ilgilidir.

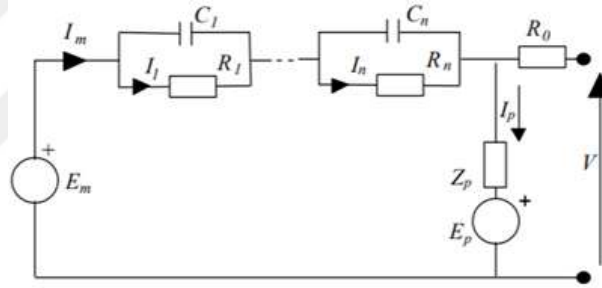
### **3.4 Eşdeğer Devre Modeli**

Elektro-kimyasal analiz yöntemleri genellikle batarya üreticileri ve batarya kimyası araştırmacıları tarafından kullanılır ve elektriksel nicelikler olarak ifade edilen basit ve basit modellere ihtiyaç duyan elektrik mühendisleri ve sistem tasarımcıları için çok kullanışlı değildir. Sonuç olarak, eşdeğer devre modelleri, hibrit ve elektrikli araçların bataryalarının modellenmesini basitleştirmeyi amaçlamıştır [31].

Geçmişte lityum hücreleri karakterize etmek ve simüle etmek için çok sayıda model geliştirilmiştir. Lityum hücrelerin iç dinamiklerinin benzetimini yapan ayrıntılı elektrokimyasal modeller, hesaplamaları karmaşık, zaman alıcıdır ve esnek değildir.

Aynı zamanda sistem düzeyinde modelleme veya çalışma zamanı uygulamaları için uygun değildir. Alternatif bir yaklaşım, eşdeğer devre modelleri (ECM) kullanmaktır. Bu durumda amaç, hücre içindeki elektrokimyasal olaylar ve devre elemanları arasında doğrudan bir ilişki kurmaktır. Model topolojisi seçilirken karmaşıklık seviyesi ve hesaplama süresi göz önünde bulundurulur. Bu modeller doğrusal olmayan elektrokimyasal olayların etkilerini yakalamakta ve uzun elektrokimyasal işlem hesaplamalarından kaçınmada yardımcı olmaktadır. Özellikle elektrikli araçların bütünü gibi sistem düzeyinde modellemeler için uygundurlar.

Eşdeğer devre elemanlarının sayısı, aslına uygunluk ve karmaşıklık arasında bir denge kurulmasına neden olur. Parazitik dal, yüksek coulombic etkinliği olan hücreler için ihmal edilebilir. Şekil 3.3, kurşun-asit bataryalar için genelleştirilmiş ECM'yi gösterir, ancak herhangi bir kimyanın elektrokimyasal bir hücresini tasvir etmek için kullanılabilir.

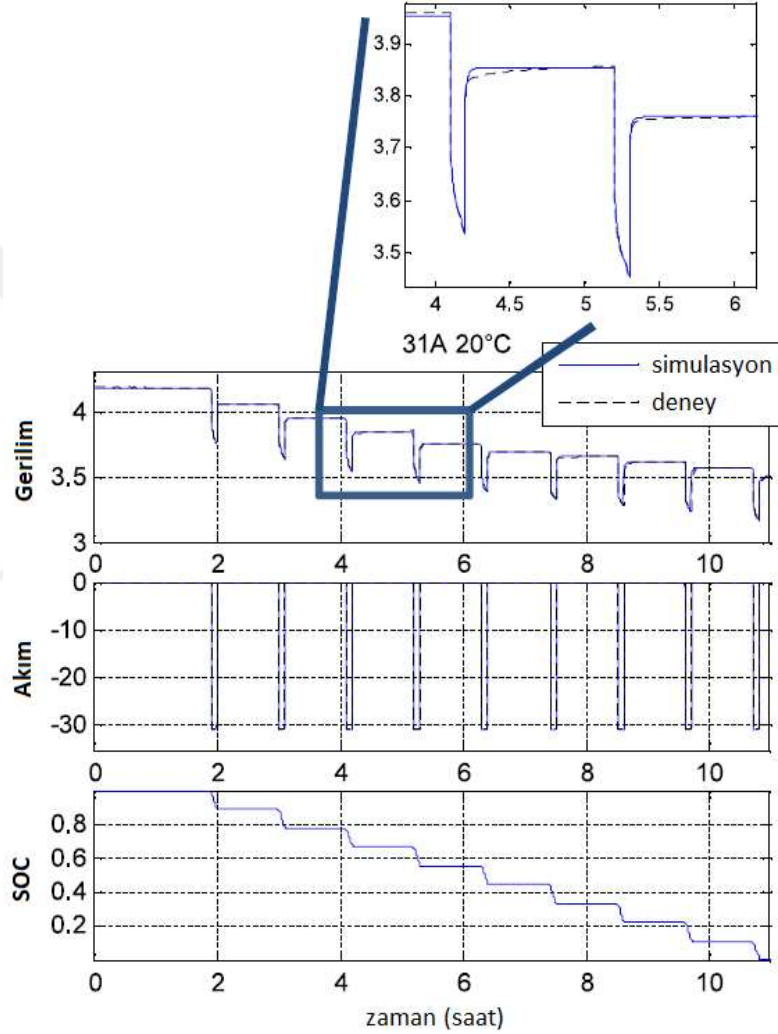


**Şekil 3.3 :** Genel bir eşdeğer devre modeli.

Model yapısının seçimi, deneysel verilerle örtüşme kabiliyeti, eşdeğer devrenin karmaşıklığı ve hesaplama süresi arasındaki dengeye göre belirlenir. Son derece karmaşık bir eşdeğer devre, deneysel veri setlerine iyi bir şekilde uyar, ancak hesaplama süresi açısından gömülü sistem uygulamaları için uygun değildir. Genel olarak, karmaşıklık seviyesi her devre bileşenini hücrenin içindeki bir elektrokimyasal fenomen ile ilişkilendirerek belirlenmelidir. Analiz edilecek problemin özelliklerine bağlı olarak, RC blokların sayısı tipik olarak bir ila iki arasındadır, çünkü daha fazla sayıda blok, modelin doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmemesine rağmen hesaplama süresini artırmaktadır.

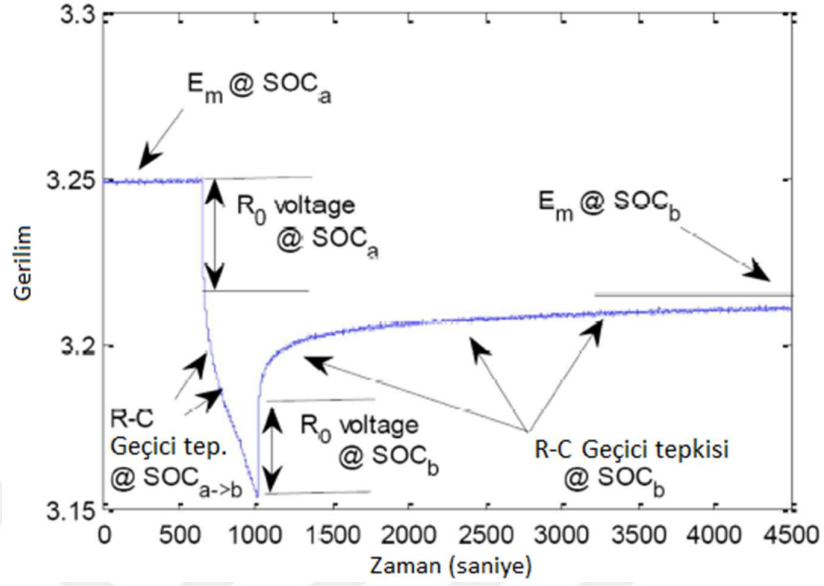
Bu tezde, farklı sayıda RC dalı bulunan eşdeğer devre modelleri kullanılmıştır. Daha sonra batarya bozunum hesaplamaları için uygun olan devre topolojisi seçilmiştir. Kullanılan eşdeğer devre topolojilerinin, sağlık durumu hesaplamalarında gerekli olan

genel dinamikleri yakalamak için yeterli olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.4'de, bir hücrenin gerilim davranışı gösterilmektedir. Mavi çizgiler benzetimi yapılmış değerleri, siyah çizgiler ise deneysel verileri temsil etmektedir. Gösterimi yapılan model ve veriler [32] 'den alınmıştır. Şekilde, gerilimin ve şarj durumunun (SoC), kısa deşarj darbeleri biçimindeki bir akım profiline nasıl tepki verdiği gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Deney ve simulasyon deşarjında gerilim değişimi [32].

Devre modelindeki farklı öğelerin etkileri Şekil 3.5'te gösterilmiştir [15].  $SoC_a$  ve  $SoC_b$  deşarjdan önceki ve sonraki şarj seviyeleridir. Görülebildiği gibi, açık devre gerilimi deşarjdan yeni bir gerilim seviyesine yakınsamaktadır.  $R_0$  bu esnada meydana gelen ani gerilim düşümü ve yükselmelerini göstermektedir. Deşarj sırasında ve sonrasında süreksiz davranışlar meydana gelmektedir. Bunlar grafikte R-C Geçici davranışları olarak gösterilmektedir.



**Şekil 3.5 :** Deney ve simülasyon deşarjında gerilim değişimi [15].

Şarj durumunu (SoC) elde etmek için, önce Coulomb sayımı metodu ile toplam çekilen yük ( $Q_e$ ) hesaplanır:

$$Q_e(t) = \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Bu formülden hareketle SoC aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$SoC = 1 - \frac{Q_e}{Q_{nom}} \quad (3.3)$$

Burada  $Q_{nom}$  bataryanın nominal kapasitesidir. Coulomb sayımı, basit bir tekniktir ve bu teknik ile ölçüm hataları zamanla birikir, potansiyel parazitik reaksiyonlar ise dikkate alınmaz. Bu tezde bu hataların oluşmadığı ve coulomb sayımının şarj durumunun hesaplanmasında yeterli olduğu kabul edilmektedir.

Bir batarya hücresinin şarj/deşarj oranı genellikle C deşarj oranı olarak tanımlanır. Bu değer, hücrenin nominal kapasitesine bağlı olarak, hücrenin şarj veya deşarj akımının ölçüsü olarak kullanılır. 1 C'lik bir C oranı, tamamen dolu bir hücreyi bir saat içinde

deşarj edecek bir boşalma akımını ifade eder, yani bir N\*C boşalma hızı bir bataryayı 1 / N saatte boşaltacaktır.

### 3.4.1 Yöntem

Bu tezde kullanılan modeller elektrik devresi tipindedir ve batarya hücresini direnç ve kapasitör devresi olarak modellemektedir. Tipik olarak, elektrik modeli dinamikleri daha iyi yakalamak için daha fazla RC dalı ile genişletilir. Fakat bu modeller, daha fazla karmaşıklığı ve hesaplama süresini beraberinde getirmektedir. Şekil 3.6'da bir batarya hücresi için RC dallarının sayısına bağlı olarak model doğruluğu gösterilmektedir [15].

Zaman bağlı bozunmanın yanı sıra, bozunmaya maruz kalmamış bir batarya hücresi de her döngüde aynı performansa sahip olmaz. Şekil 3.3'deki devrede gösterilen bileşenlerin özellikleri şarj durumuna (SoC) ve sıcaklığa (T) bağlı olarak değişecektir. Bunu dikkate almak için kullanılan bir yöntem, [15]'de de bahsedilen, ısı değişimlerini dikkate alacak veri tabloları kullanmaktır. Simulink ve Simscape modelleri, bir akım sinyali profili iledeşarj edilerek batarya hücresi verilerini oluşturulmuştur. Tasarlanan model, ohmik ısınmadan kaynaklı güç dağılımını kullanmaktadır;

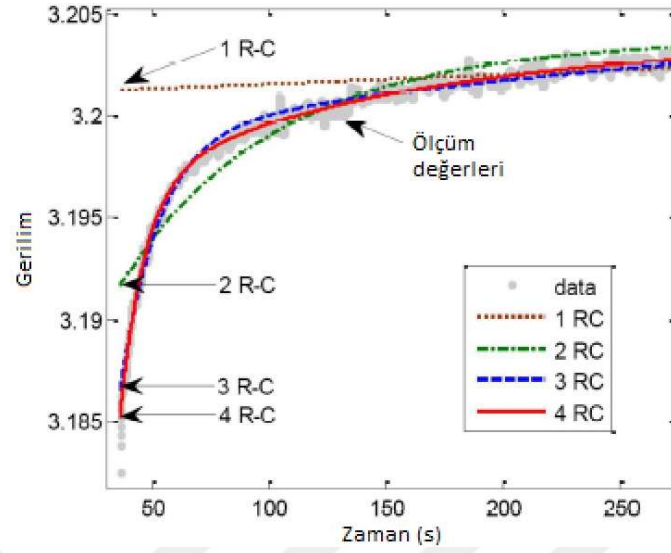
$$C_T \frac{dT}{dt} = -\frac{T - T_a}{R_T} + P_S \quad (3.4)$$

Bu formülde  $P_S$  hücre içinde üretilen enerjiyi,  $R_T$  hücrenin termal direncini,  $T_a$  ortam sıcaklığını ve  $C_T$  ısı kapasitesini ifade eder. Laplace dönüşümü uygulandığında, hücre içindeki ortalama sıcaklık  $T(s)$  aşağıdaki gibidir;

$$T(s) = \frac{P_S R_T + T_a}{1 + R_T C_T s} \quad (3.5)$$

Bu tezde batarya davranışını modellemek için eşdeğer devre modelleri kullanılacaktır. Bir RC dalı (Thevenin modeli), artan sayıda dal tarafından verilen doğruluğun bozunma modellemesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı için yeterli bulunmuştur. Elektrik devresi modeli daha sonra bataryanın sağlık durumunu tahmin etmek için batarya bozunmasını içerecek şekilde genişletilmiştir.





Şekil 3.6 : Eşdeğer devre modellerinin başarımının karşılaştırılması [15].

### 3.4.2 Batarya hücre paketinin modellenmesi

Batarya hücrelerini paket olarak birleştirirken, hesaplama açısından fazladan karmaşıklık katmanları olacaktır. Şekil 3.7'de silindirik hücreli bir paket gösterilmektedir. Batarya paketindeki hücreler ısıyı yaydıkları için birbirlerinin sıcaklıklarını da etkilerler. En ortadaki hücrenin, ortam sıcaklığı hücre sıcaklıklarından daha yüksek olmadığı sürece, en yüksek sıcaklığa maruz kalması muhtemeldir. Sıcaklık yaşlanmayı etkiler ve hücrelerin her birinin ayrı ayrı yaşlanma durumu hesaba katılarak yönetilmeleri gerekir.



Şekil 3.7 : Li-iyon batarya hücre paketi [33].

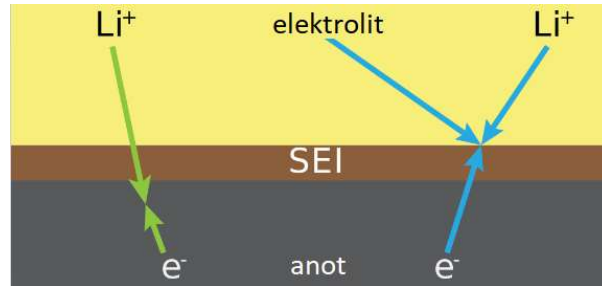
### 3.5 Hücree Yaşlanmasısı

Bu bölüm, bir batarya hücresinin yaşlanmasını tanımlamayı ve modellenmesini amaçlamaktadır. Bir hücrenin bozunmasına katkıda bulunan veya bulunabilecek faktörlerin etkileri açıklanmaktadır. Bir hücrenin yaşlanması, kullanım ve depolama sırasında meydana gelen kayıplara göre gruplanır; bu kayıplar sırasıyla çevrim kaybı ve takvim kaybı olarak adlandırılır.

#### 3.5.1 Yaşlanma mekanizması

Lityum-iyon bataryalarda bozunma ve kapasite kaybı genellikle katı elektrolit arayüzünün (SEI) büyümesine bağlanır. Elektrolit arayüzü, elektrotlar ile elektrolit arasındaki reaksiyonlardan dolayı oluşur. Bu tepkimeler, lityum iyonlarının elektrotlarla reaksiyona girmesini engelleyen bir tabaka oluşturur ve bu tabakanın kalınlığı arttıkça hücre bozulur. SEI, hücre bozunmasının ana sebebi olmasına rağmen, elektrot ve elektrolit arasındaki parazitik tepkimeleri önlediği için aynı zamanda gereklidir.

SEI'nin büyümesi, bataryanın nasıl kullanıldığına bağlıdır. Tabaka oluşumuna yüksek sıcaklıklar ve yüksek şarj durumları katkıda bulunur. SEI büyümesi genellikle bir Li-İyon hücresindeki karbon elektrotla bağlanır, ancak lityum metal oksit elektrot için de benzer olaylar gözlenmiştir. SEI'nin oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonlar, ulaşılabilir lityum iyon kaynağını azaltır, böylece hücre kapasitesini azaltır. Şekil 3.8'de elektrot üzerindeki kahverengi katman, elektrot üzerindeki SEI oluşumunu gösterir ve tabakanın büyümesinin, elektrolitte elektrot ve iyonlar arasındaki reaksiyonları nasıl engellediğini gösterir.



Şekil 3.8 : Elektrot üzerinde SEI tabakası oluşumu [34].

SEI oluşumu dışındaki diğer bozunma mekanizmalarına literatürde SEI ile aynı ölçüde yer verilmemiştir. Bu mekanizmalara bir örnek, hücrenin aşırı şarj edilmesi nedeniyle

oluşan lityum kaplamadır. Grafit elektrot, lityum iyonlarını temin edemezse, elektrotun yüzeyinde metalik lityum olarak birikebilir ve bu da daha az serbest lityum iyonlarına ve kapasite kaybına neden olur. Lityum kaplama batarya hücresi çok düşük sıcaklıklarda çalıştırıldığında da gözlenir. Elektrot üzerindeki kaplama dallanmalar gösterir ve elektrotların kısa devre olmasına yol açabilir.

Bir bataryanın hızlı şarj edilmesi sırasında lityum kaplama da oluşabilir. Lityum iyonlarının anot üzerinde toplanması hızlı bir şekilde gerçekleşmezse, aşırı şarj durumundakine benzer şekilde lityum kaplama oluşabilir. Bu problem, bataryayı sabit akım yerine yüksek akım darbeleriyle şarj ederek önlenabilir [35]. Bunun yararı, lityum iyonları darbeler arasındaki dinlenme periyotları boyunca elektrolit ara yüzüne yayılıp dağılması ve kaplamanın oluşmasının engellenmesidir.

Bozunma modellemesi, aşırı şarj, aşırı yüksek veya düşük sıcaklıklarda kullanım gibi faktörleri dikkate almaz. Aşırı şarj ve aşırı deşarj, bir hücrenin kesme gerilimlerinin dışında şarj edilmesi veya boşaltılmasıdır. Bu tezde, yukarıda belirtildiği gibi batarya hücresinin suistimali olmadığı varsayılır, çünkü bu durumun araçtaki BMS tarafından önlenmesi beklenir.

### 3.5.2 Batarya sağlık durumu (SoH)

Bir batarya hücresinin sağlık durumu, bataryanın nominal durumuna kıyasla ne kadar bozulduğunun bir değeridir. Genel kriter olarak, bataryanın kapasitesi ilk değerinin %80'ine düştüğü zaman kullanım ömrünün bittiği kabul edilir. Sağlık durumunun tanımı keyfidir ve uygulamaya göre değişebilir, ancak EV uygulamalarında genellikle %80 sınırı kullanılır. Ayrıca, bir batarya hücresi yaşlandıkça hücrenin dahili direncinin artmasından kaynaklı güç kaybı da yaşar. Bu durum, HEV uygulamalarında kullanılan bir bataryanın sağlık durumunu belirlemek için önemli bir parametre olabilir, ancak literatürde kapasite kaybı ile aynı ölçüde açıklanmamıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan SoH aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır;

$$SoH = \left(1 - \frac{\xi_{tot}}{0.2Q_{nom}}\right) \quad (3.6)$$

$Q_{nom}$  hücrenin nominal kapasitesini,  $\xi_{tot}$  ise takvim ve döngü kayıplarından meydana gelen toplam kapasite kaybını ifade etmektedir.

Bozunma süreci doğrusal olmadığı için, sağlık değeri bataryanın ömrünün sona erdiğine dair kesin bir değerlendirme yapamayacaktır. SoH parametresi kalan kapasitenin bir tahminini verir fakat hücrenin ne kadar uzun süre dayanacağı konusunda isabet sağlamayabilir.

Toplam kapasite kaybı ( $\xi_{tot}$ ), döngü kayıpları ( $\xi_{cyc}$ ) ve takvim kayıplarının ( $\xi_{cal}$ ) toplamı olarak gösterilir:

$$\xi_{tot} = \xi_{cyc} + \xi_{cal} \quad (3.7)$$

Bu iki faktör ayrı ayrı modellenmiştir ancak ikisi de SEI katmanının büyümesine katkıda bulunur. Yaşlanmaya neden olan kayıpların yukarıdaki denklemin tersine, birbirinden bağımsız olmadığı tahmin edilmektedir, ancak literatürde bireysel olarak çalışılmaktadır ve birbirleriyle ne kadar ilişkili olduğunun tahmin edilmesi zordur. Uzun süreli kullanım sırasında döngü kayıplarının kapasite kaybının önemli bölümünü oluşturacağı için takvim kayıplarının katkı oranı azalacaktır. Bu yüzden takvim kayıplarını ihmal etmek de mümkündür.

### 3.5.3 Çevrim bozunumu

Şarj-deşarj çevrimi nedeniyle ortaya çıkan kapasite azalışı, sabit olarak her  $i$  anında gerçekleşen ve yaşlanmayı etkileyen faktörlerin toplamı olarak modellenmiştir. Termal bozulmayı modellemek için, ampirik katsayılarla sahip olan, Arrhenius denklemi temelli bir eşitlik kullanılır. Arrhenius denklemi, hücrelerin anlık sıcaklığı  $T$ , referans sıcaklığı  $T_{ref}$ , aktivasyon enerjisi  $E_a$  ve gaz sabiti  $R$ 'yi kullanır. Referans sıcaklığı  $T_{ref}$ , tekrar edilen her döngüden sonra hücrelerin geri getirildiği 25° C'lik sıcaklıktır.  $SoC_{avg}$ , her çevrimin ortalama şarj durumu,  $SoC_{dev}$  ise bu değere göre standart sapmayı ifade eder. Çevrim kaybı ( $\xi_{cyc}$ ) bu parametrelerle aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned} \xi_{cyc}(T, SoC_{avg}, SoC_{dev}, Q_{proc}) \\ = \sum_i^E (k_{s1} SoC_{dev,i} e^{(k_{s2} SoC_{avg,i})} \\ + k_{s3} e^{(k_{s4} SoC_{dev,i})}) e^{\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)} Q_{proc,i} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Arrhenius denkleminde türetilen aşağıdaki denklem ortalama SoC'yi hesaplamak için kullanılır;

$$SoC_{avg,m} = \frac{1}{\Delta Q_{proc,m}} \int_{Q_{proc,m-1}}^{Q_{proc,m}} SoC dQ_{proc} \quad (3.9)$$

Bu denklemde  $Q_{proc, m-1}$ , herhangi bir m olayındaki başlangıç yük miktarıdır,  $Q_{proc, m}$ , olayın sonundaki yüküdür,  $\Delta Q_{proc,m}$  ise ikisi arasındaki farktır.

Çevrim bozulması hesaplamaları için kullanılan parametre değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Parametreler [17] 'de MATLAB eğri uydurma ve yüzey uydurma araçları kullanılarak tahmin edilmiş verilerdir. Ortalama şarj durumunun tanımını kullanarak, yük durumunun normalize edilmiş standart sapması  $SoC_{dev}$  aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$SoC_{dev,m} = \sqrt{\frac{1}{\Delta Q_{proc,m}} \int_{Q_{proc,m-1}}^{Q_{proc,m}} (SoC - SoC_{avg,m})^2 dQ_{proc}} \quad (3.10)$$

Kapasite kaybını çevrimden ziyade işlenmiş şarjın bir fonksiyonu olarak tasarlanmasının avantajları vardır. Bozulmanın SoC grafiğinde hücrenin şarj edildiği veya boşaldığı noktadan etkilendiği tespit edilmiştir ve 3.8 'te önerilen denklemde bu durum dikkate alınmıştır.

**Çizelge 3.2 : Çevrim kayıpları modeli parametreleri.**

| Parametre | Değer                  |
|-----------|------------------------|
| $T_{ref}$ | 25° C                  |
| R         | 8.314 J/molK           |
| $E_A$     | 78.06 kJ/mol           |
| $k_{s1}$  | $-4.092 \cdot 10^{-4}$ |
| $k_{s2}$  | -2.167                 |
| $k_{s3}$  | $1.408 \cdot 10^{-3}$  |
| $T_{ref}$ | 25° C                  |

[17]'de -20° C'ye maruz bırakılan bir hücrenin deneyleri yapılmış ve ciddi kapasite kaybı görülmüştür. Bu deneyden elde edilen sonuçlar dikkate alınmadı ve modelin, sıfır altı sıcaklıklar için geçersiz olduğu kabul edildi. Çünkü bu sıcaklıklarda hücre yaşlanmasına sebep olan katı elektrolit arayüzü oluşumundan başka, lityum kaplama gibi durumlarda da ortaya çıkar.

### 3.6 Paket Bozunumu

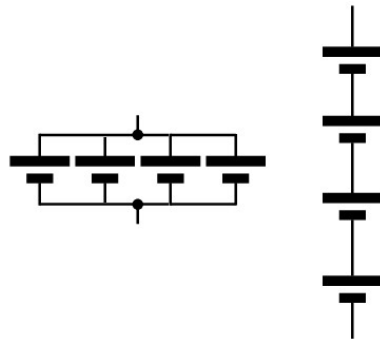
Hücrenin sağlık durumunun modellenmesini durumunu hücre paketi seviyesine taşırken, karmaşıklık artar. Hücreler birbirleriyle ısı alış-verişi yapacağı için ve hücre paketinin sağlık durumunun da bir tanımının yapılması gerekmektedir.

#### 3.6.1 Paket dengeleme

Batarya hücreleri bir pakette bir araya getirilirse, farklı zorlanma koşullarına maruz kalırlar. Hücreler birbiriyle özdeş olmadığından ve çekilen akım da gerçekte aynı olamayacağından, hücreler aynı şarj seviyesine sahip olmayacaktır. Bunu hesaba katmak için hücrelerin dengelenmesi gerekir. Bu, yüksek yüke sahip hücrelerdeki enerjiyi düşük yüklü olanlara aktararak ya da sadece seri bağlı hücre paketindeki kapasiteyi en zayıf hücrenin kapasitesine sınırlandırarak yapılabilir. Bu tezde, BMS ile yönetilen bir dengeleme devresi bulunmadığından, sağlık hesaplamasının durumu her zaman seri bağlantıdaki en düşük hücreye dayanacaktır.

#### 3.6.2 Paket sağlık durumu

Seri bağlanmış hücreler için devrenin gerilimi artacaktır ve kapasite her bir hücre için aynı kalacaktır. Paralel bağlantıda ise, hücrelerin kapasitesi artarken, gerilim tek bir hücrenininki ile aynı kalır. Şekil 3.9'da dört batarya hücresinin seri ve paralel devrelerdeki konfigürasyonu görülebilir.



**Şekil 3.9 :** Paralel ve seri bağlı batarya hücreleri.

Bir dizi hücre için kapasite, dizedeki en düşük hücrenin kapasitesi ile sınırlı olacaktır. Bu, hücrelerin aktif bir eşitlemesinin olmadığı, yani enerjinin yüksek kapasiteli bir hücreden düşük kapasiteli bir hücreye aktarılmadığı varsayılmaktadır.  $n_i$  sayıda

hücresinin bir seri bağlantısı için, dizinin kapasitesi  $Q_{series}$ , en düşük kapasiteye sahip hücresinin kapasitesine eşittir.

$$Q_{series} = \min_i(Q_i) \quad i \in \mathbb{Z}^+, \quad i \leq n_i \quad (3.11)$$

$i$ , paketteki her bir hücreyi ifade eder.

Eğer hücreler paralel bağlanırsa toplam kapasite, hücrelerin kapasitesine eşit olacaktır:

$$Q_{parallel} = \sum_{j=1}^{n_j} Q_j \quad (3.12)$$

Burada  $Q_{parallel}$ , paralel devre için kapasitedir,  $j$ , tek tek hücreleri belirtir ve  $n_j$ , toplam hücre sayısını gösterir.

Bir batarya hücresinin sağlık durumu, hücresinin kapasitesine dayandığından, bir paketin sağlık durumu, paketin içerdiği hücrelerin kapasitesine bağlı olacaktır. Bir seri devrede, hücre paketinin sağlık durumu, en düşük SoH'e sahip hücreye eşit olacaktır;

$$SoH_{series} = \min_i(SoH_i) \quad (3.13)$$

Paralel devrede ise SoH, hücrelerin ortalama SoH değerine eşit olacaktır;

$$SoH_{parallel} = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} SoH_j \quad (3.14)$$

Birden fazla hücre seri ve paralel devrelere bağlandığında, iki farklı konfigürasyon mevcuttur. Birkaç seri bağlantının paralellenmesiyle oluşan bir paket paralel seri bağlantıya (PS) sahiptir. Birkaç paralel bağlantının birbirine seri bağlanmasıyla oluşan devre, seri paralel bağlantı (SP) olarak bilinir. Her iki konfigürasyon da aynı nominal kapasiteye ve gerilime sahip olacaktır.

### 3.6.2.1 Paralel seri bağlantı

Birkaç seri bağlantının paralellenmesiyle oluşan bir paketin bağlantısı paralel seri bağlantı (PS) olarak adlandırılır Paralel-seri bağlantı konfigürasyonu Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu tip devrelerin sağlık durumu 3.14 nolu denklemden yararlanılarak bulunur.

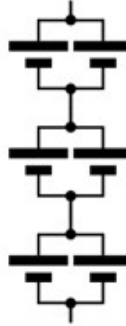


**Şekil 3.10 :** PS tipi bağlantıya sahip batarya hücreleri.

$$SoH = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} \left( \min_i (SoH_{i,j}) \right) \quad (3.14)$$

### 3.6.2.2 Seri paralel bağlantı

Seri-paralel bağlantı konfigürasyonu Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Bu tip devrelerin sağlık durumu 3.15 nolu denklemden yararlanılarak bulunur;



**Şekil 3.11 :** SP tipi bağlantıya sahip batarya hücreleri.

$$SoH = \min_i \left( \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} SoH_{i,j} \right) \quad (3.15)$$

Aynı kapasiteye sahip hücrelerden oluşan batarya paketi için SoH, hücrelerinki ile aynı olacaktır, fakat hücreler bozuldukça SoH yapılandırmaya göre farklılaşacaktır. SP ve PS konfigürasyonlarında sağlık durumu, yalnızca bir hücre bozunmuşsa veya seri ve paralel bağlantılardaki aynı hücreler bozunmuşsa birbirine eşit olacaktır.

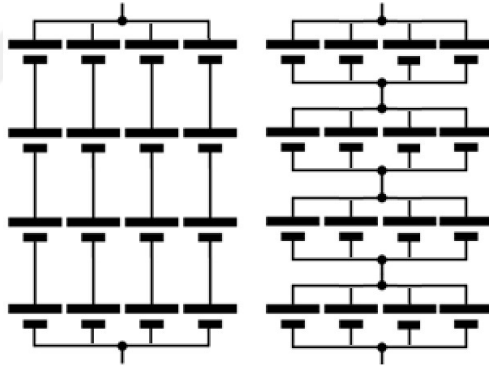


Bu kriterlere uymayan, iki veya daha fazla hücrenin bozulduğu durumlar için, her zaman PS devresinin SoH'ı, SP devresinden daha düşük olacaktır.

### 3.6.2.3 Paket sağlık durumu için örnek uygulama

PS veya SP bağlantıdaki her hücrenin SoH değeri konumlarına göre matris biçiminde gösterilebilir. Aşağıdaki  $[SoH]_{n \times m}$  matrisinde  $n \times m$  boyutlarında bir paketin her bir hücresinin  $SoH_{ij}$  değeri gösterilmiştir. Satır sayısı  $n$ , seri bağlantı sayısını, sütun sayısı  $m$  ise paralel bağlantı sayısını gösterir. Örnek olarak Şekil 3.12'de görülen 16 hücreli paketler ele alınıp, her iki konfigürasyon için paketlerin SoH hesaplamaları yapılmıştır.

$$[SoH] = \begin{bmatrix} SoH_{11} & \cdots & SoH_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SoH_{n1} & \cdots & SoH_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$



Şekil 3.12 : 16 hücreye sahip SP ve PS bağlı batarya paketleri.

Hücre SoH'ları farklı şekilde dağıtılmış temsili matrisler aşağıda gösterilmiştir; burada her matris değeri, o pozisyondaki bir hücrenin SoH'ını temsil eder. İlk matris tek bir bozulmuş hücre, ikinci matris seri ve paralel olarak bağlanmış beş bozulmuş hücre, üçüncü matriste seri veya paralel bağlanmamış iki bozulmuş hücre ve son matriste rastgele SoH değerlerine sahip hücrelerin ataması yapılmıştır. 3.17 ve 3.18 numaralı eşitliklerindeki her matrisin altında PS ve SP durumları için toplam SoH hesaplamaları vardır. Bu hesaplamalar yapılırken  $SoH_{PS}$  için 3.15 nolu eşitlik,  $SoH_{SP}$  için ise 3.16 nolu eşitlikten yararlanılmıştır. Bu sonuçlardan anlaşılabileceği gibi bir SP devresinin SoH değeri her zaman aynı sayıda hücreye sahip bir PS devresinden daha yüksek veya eşit olacaktır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$SoH_{PS} = 0.875 \quad SoH_{PS} = 0.625$$

$$SoH_{SP} = 0.875 \quad SoH_{SP} = 0.625$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.4 & 0.6 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.7 \\ 0.3 & 0.9 & 0.7 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$SoH_{PS} = 0.750 \quad SoH_{PS} = 0.300$$

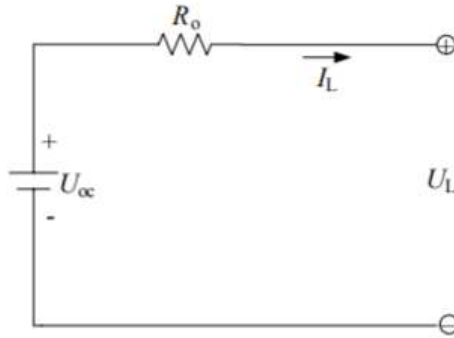
$$SoH_{SP} = 0.875 \quad SoH_{SP} = 0.375$$

#### 4. EŞDEĞER DEVRE TOPOLOJİLERİ

Eşdeğer devre modellerinde dirençler, kapasiteler, gerilim kaynakları gibi devre bileşenleri kullanılarak bataryanın elektriksel davranışları yakalamış olur. Basit yapısı ve nispeten az sayıda model parametresine sahip olması nedeniyle eşdeğer devre modelleri bataryanın gerçek zamanlı uygulamalarında geniş çapta kullanıma sahiptir. Yapılan çalışmalarda, birinci ve ikinci dereceden modellerin daha sık kullanıldığı ve birçok durumda daha yüksek dereceli modellerin, başarımları önemli ölçüde değiştirmediği için gerekli olmadıkları görülmüştür [36]. Bu bölümde Rint modeli, RC modeli, Thevenin modeli, PNGV modeli ve DP modeli gibi EV çalışmalarında kullanılan çeşitli eşdeğer devre modellerinin yapısı hakkında bilgi verilecektir.

##### 4.1 Rint Modeli

Şekil 4.1 ve Denklem 4.1'de gösterildiği gibi Rint modeli  $U_{oc}$  'ye ideal bir gerilim kaynağı uygular.  $U_{oc}$  batarya açık devre gerilimini tanımlar. Hem direnç  $R_o$  hem de açık devre gerilimi  $U_{oc}$ 'un işlevleri SoC, SoH ve sıcaklık.  $I_L$  boşaltmada pozitif değer ve negatif değere sahip yük akımıdır şarjda,  $U_L$  terminal gerilimidir.

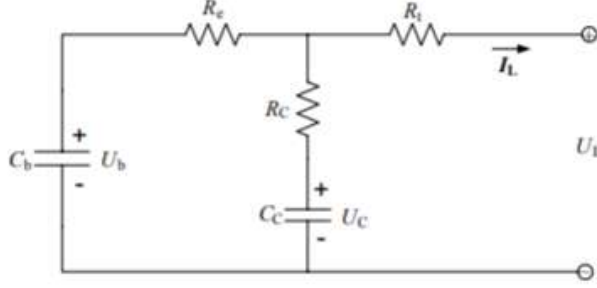


Şekil 4.1 : Rint modeli.

$$U_L = OCV - I_L R_o \quad (4.1)$$

## 4.2 RC Modeli

Genel RC modeli, SAFT Batarya Şirketi tarafından tasarlanmış ve ADVISOR yazılımıyla beraber iyi bir başarı elde etmiştir. Model, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, iki kapasitör ( $C_c$ ,  $C_b$ ) ve üç dirençten ( $R_b$ ,  $R_e$ ,  $R_c$ ) oluşmaktadır.



Şekil 4.2 : RC modeli.

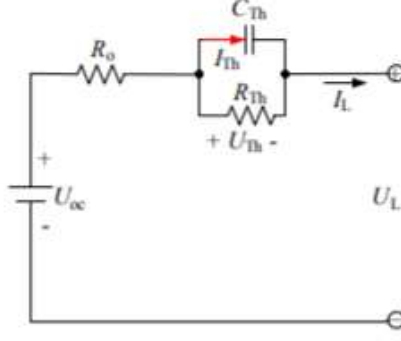
$C_c$  kapasitörü küçük bir kapasitansa sahiptir ve çoğunlukla bir bataryanın yüzey etkilerini temsil etmektedir.  $C_b$  ise çok büyük bir kapasitansa sahiptir ve bataryanın kimyasal olarak yükü saklama kapasitesini temsil eder. SoC,  $C_b$  kapasitöründeki gerilim ile belirlenebilir. Dirençler  $R_t$ ,  $R_e$ ,  $R_c$  sırasıyla terminal direnci, uç direnci ve kapasitör direnci olarak adlandırılmıştır.  $U_b$  ve  $U_c$  sırasıyla  $C_b$  ve  $C_c$ 'deki gerilimlerdir. Devrenin elektriksel davranışı 4.2 ve 4.3 numaralı denklemler ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{(R_e+R_s)C_b} & \frac{1}{(R_e+R_s)C_b} \\ \frac{1}{(R_e+R_s)C_s} & -\frac{1}{(R_e+R_s)C_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{(R_e+R_s)C_b} \\ \frac{-R_e}{(R_e+R_s)C_s} \end{bmatrix} I_L \quad (4.2)$$

$$U_L = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{R_e+R_s} & \frac{R_e}{R_e+R_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C_b} \\ V_{C_s} \end{bmatrix} + \left( -\frac{R_e R_s}{R_e+R_s} - R_t \right) I_L \quad (4.3)$$

## 4.3 Thevenin Modeli

Thevenin modeli, bataryanın dinamik özelliklerini tanımlayan Rint modelini temel almakla beraber seri bir paralel RC kolunu da içermektedir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, esas olarak açık devre gerilimi  $U_{oc}$ , iç dirençler ve eşdeğer kapasitanslar ile birlikte toplam üç kısımdan oluşur.



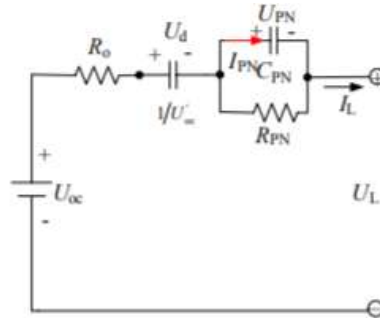
**Şekil 4.3 :** Thevenin modeli.

İç dirençler, seri direnç  $R_o$  ve Thevenin eşdeğer direnci  $R_{Th}$ 'yi içerir. Eşdeğer kapasitans  $C_{Th}$ , doldurma ve boşaltma sırasındaki geçici davranışı temsil etmek için kullanılır.  $U_{Th}$ ,  $C_{Th}$  üzerindeki gerilimdir.  $I_{Th}$ ,  $C_{Th}$ 'nin çıkış akımıdır. Thevenin modelinin elektriksel davranışı Denklem 3.4 ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Th} &= -\frac{1}{R_{Th}C_{Th}}U_{Th} + \frac{1}{C_{Th}}I_L \\ U_L &= OCV - V_{Th} - R_o I_L \end{aligned} \quad (4.4)$$

#### 4.4 PNGV Modeli

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) modeli, yük akımı birikiminde üretilen açık devre geriliminin değişimini tarif etmek için, Thevenin modeline seri olarak bir kapasitörün eklenmesi ile elde edilebilir.



**Şekil 4.4 :** PNGV modeli.

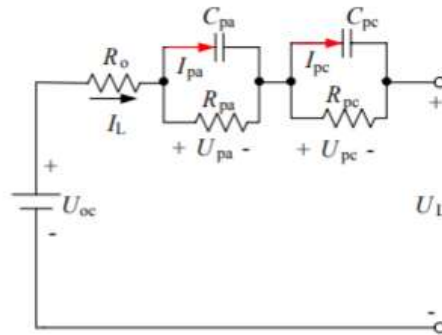
$U_d$  ve  $U_{PN}$ , sırasıyla  $I/U'_{oc}$  ve  $C_{PN}$ 'deki gerilimlerdir.  $I_{PN}$ ,  $C_{PN}$ 'nin çıkış akımıdır. PNGV modelinin elektriksel davranışı Denklem 4.5 ile ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{Cp} &= OCV \cdot I_L \\ \dot{U}_{Cp} &= -\frac{1}{R_p C_p} U_{Cp} + \frac{1}{C_p} I_L \\ U_L &= OCV - U_d - U_{PN} - R_0 I_L\end{aligned}\quad (4.5)$$

#### 4.5 Çift kutuplamalı (DP) Eşdeğer Devre Modeli

Bir lityum-iyon güç bataryasının özelliklerinin test analizine dayanarak, belirgin bir kutuplanma gözlemlenebilir. Kutuplanma özelliğinin benzetimi Thevenin modeli tarafından bir dereceye kadar yapılabilir, gerçek elektrokimyasal kutuplanma ile arasındaki fark, şarj veya deşarjın sonundaki anlarda hatalı bir benzetime yol açar [37]. Polarizasyon özelliklerinin tanımını iyileştirmek ve konsantrasyon polarizasyonunu ve elektrokimyasal polarizasyonu ayrı olarak simüle etmek için çift polarizasyon (DP) modeli olarak tanımlanan Şekil 4.5'te gösterilen devre modeli kullanılmaktadır. DP modeli üç parçadan oluşur:

- (1) Açık devre gerilimi  $U_{oc}$ ;
- (2) Elektrokimyasal polarizasyonu temsil etmek için kapasitanslara paralel  $R_{pa}$  ve  $R_{pc}$  kutuplanmış dirençleri;
- (3) Gücün bataryadan aktarılması sırasında geçici tepkimeyi karakterize etmek ve elektrokimyasal polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonunu ayrı ayrı tarif etmek için kullanılan  $C_{pa}$  ve  $C_{pc}$  kapasitansları.



Şekil 4.5 : DP modeli.

$U_{pa}$  ve  $U_{pc}$  sırasıyla  $C_{pa}$  ve  $C_{pc}$  üzerindeki gerilimlerdir.  $I_{pa}$  ve  $I_{pc}$ , sırasıyla  $C_{pa}$  ve  $C_{pc}$ 'nin çıkış akımlarıdır. Devrenin elektriksel davranışı Denklem 4.6 ile ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{pa} &= -\frac{1}{R_{pa}C_{pa}}U_{pa} + \frac{1}{C_{pa}}I_L \\ U_L &= OCV - U_{pa} - U_{pc} - R_0I_L \\ \dot{U}_{pc} &= -\frac{1}{R_{pc}C_{pc}}U_{pc} + \frac{1}{C_{pc}}I_L \end{aligned} \tag{4.6}$$





## 5. EŞDEĞER DEVRE MODELİ OPTİMİZASYONU

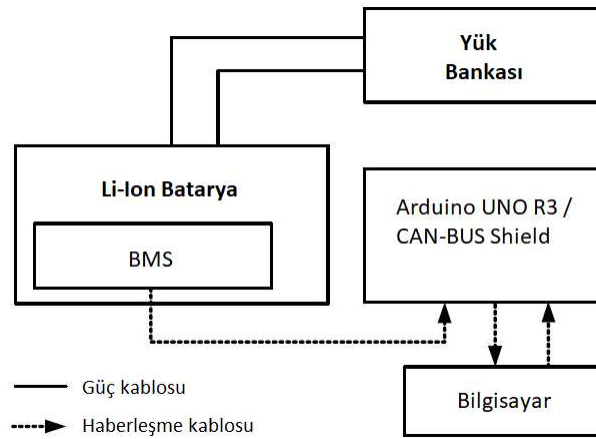
### 5.1 Örnek Batarya Verilerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde deney aşamaları ve deney sırasında kullanılan ekipmanlar ile ilgili bilgiler verilecektir. Batarya bozunum hesaplamaları için uygun olan devre topolojisi seçmek amacıyla eşdeğer devre modellerinde parametre en uygunlaştırması yapılacaktır. En uygunlaştırmayı gerçeklemek için deneysel ölçümlere ihtiyaç vardır. Batarya eşdeğer devre modellerinde SoC ile değişen parametreleri belirlemek ve daha sonra bu eşdeğer devre modellerin başarımlarını test etmek amacıyla temelde 2 deney uygulanmıştır.

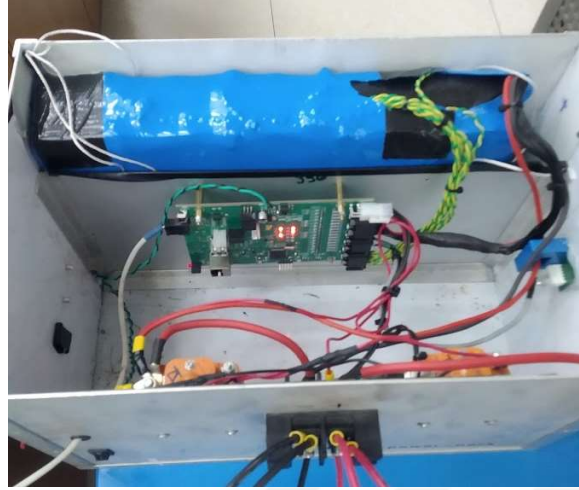
Yapılan ilk deneyde, kısadeşarj darbeleri biçimindeki bir akım profiline gerilimin ve şarj durumunun (SoC) nasıl tepki verdiği görülecektir. İkinci deneyde ise homojen dağılmışdeşarj darbeleri yerine, şarj vedeşarjdan oluşan bir sürüş profili uygulanacaktır. Kurulan deney setinin şeması Şekil 5.1’de görülebilir.

#### 5.1.1 Batarya test düzeneği

Deney düzeneği şarj,deşarj ve ölçüm sistemlerinden oluşmaktadır. Kullanılan batarya 48V nominal gerilime sahip, 20Ah kapasiteli ve 15 hücreden meydana gelen Li-iyon tip bir bataryadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1 : Deney seti şeması.

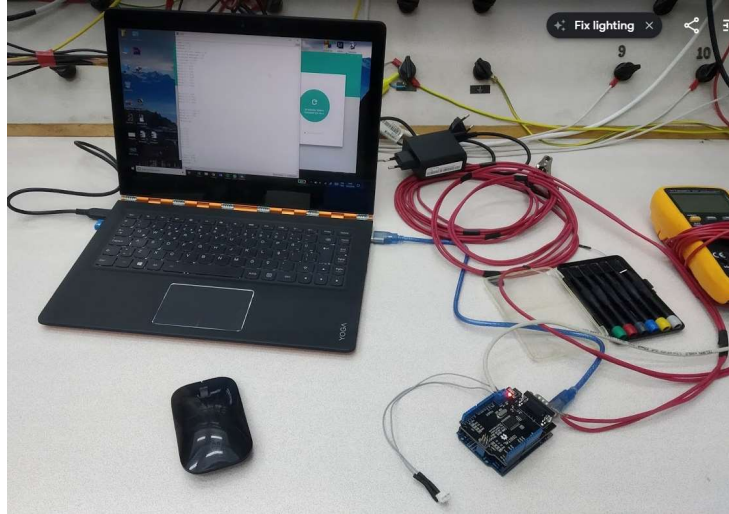


**Şekil 5.2 :** 48V 20Ah batarya.

Bataryanın kendi üzerinde bulunan BMS devresinden CAN-BUS ile haberleşilerek, Arduino Uno üzerinden bilgisayara akım, gerilim, sıcaklık, SoC verileri aktarılmıştır.

Ölçüm Ekipmanları :

- Dijital akım ve gerilim ölçü aletleri.
- Arduino Uno R3
- DIGITAL CAN-BUS Shield V1.2

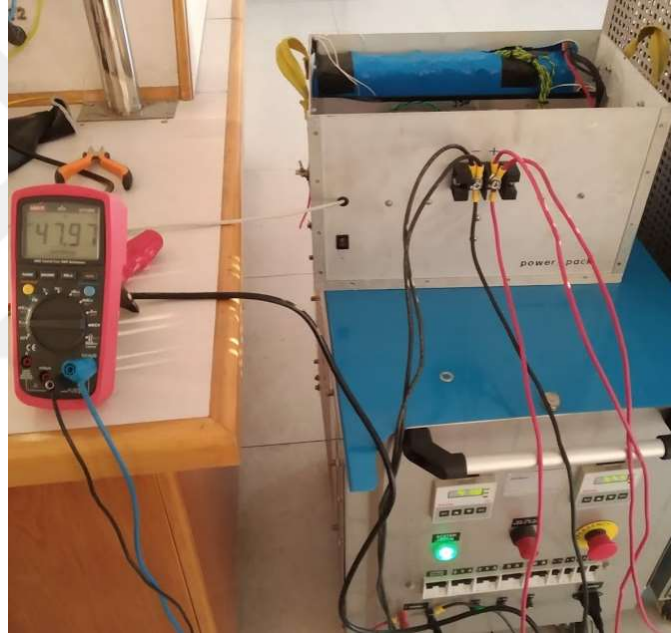


**Şekil 5.3 :** Arduino Uno ile ölçümlerin elde edilmesi.

Şarj Sistemi olarak Şekil 5.4'te görülen pasif PFC özellikli MeanWell 300W SMPS batarya şarj cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.5'te görünen rezistif yük bankası ile bataryanın akım modunda yüklenmesine izin verilmiştir.



Şekil 5.4 : MeanWell PB-300.



Şekil 5.5 : Yük birimleri.

### 5.1.2 Deney aşamaları ve sonuçları

Deneyler sırasında bataryaya hücreleri başlangıçta şarj edilerek kısmi yükleme-dinlenme faz döngülerine tabi tutuldu. SoC her adımda, hücreden çekilen akımın Coulomb sayımına dayanarak türetildi.

İlk olarak, on adet boşaltma darbesini üretilerek sıcaklık, akım, hücre gerilimleri ve diğer değerler CAN haberleşmesi ile sürekli olarak bilgisayara aktarıldı (Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2). 15 A'lık deşarj akımını sağlayacak direnç, yük bankaları bataryaya bağlanılarak oluşturuldu.

Bir sonraki aşamada, darbe deşarj profili yerine, yirmi dakikalık şarj-deşarj profili parametreleri en uygunlaştırılmış eşdeğer devre modellerine uygulandı. Aynı şekilde hücre gerilimleri ve akım değerleri gözlemlendi ve CAN hattından veri akışı sağlandı. Yapılan tüm deney ve simulasyon aşamalarında batarya hücrelerinin ortalama gerilimi göz önüne alındı.

**Çizelge 5.1 : SoC %94 olduğu anda alınmış anlık batarya verileri.**

| V      | V <sub>ort</sub> | SoC | A |
|--------|------------------|-----|---|
| 47.203 | 3.404            | %94 | 0 |

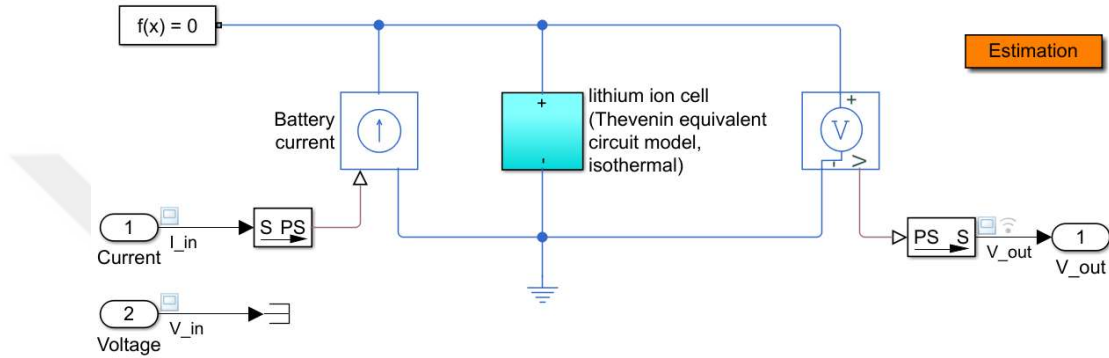
**Çizelge 5.2 : SoC %94 olduğu anda alınmış anlık hücre verileri.**

|          | V     | Sıcaklık | A |
|----------|-------|----------|---|
| Hücre 1  | 3.421 | 21       | 0 |
| Hücre 2  | 3.401 | 21       | 0 |
| Hücre 3  | 3.392 | 21       | 0 |
| Hücre 4  | 3.435 | 21       | 0 |
| Hücre 5  | 3.420 | 21       | 0 |
| Hücre 6  | 3.358 | 21       | 0 |
| Hücre 7  | 3.421 | 18       | 0 |
| Hücre 8  | 3.419 | 21       | 0 |
| Hücre 9  | 3.421 | 21       | 0 |
| Hücre 10 | 3.365 | 21       | 0 |
| Hücre 11 | 3.326 | 21       | 0 |
| Hücre 12 | 3.421 | 21       | 0 |
| Hücre 13 | 3.421 | 21       | 0 |
| Hücre 14 | 3.421 | 21       | 0 |
| Hücre 15 | 3.419 | 21       | 0 |

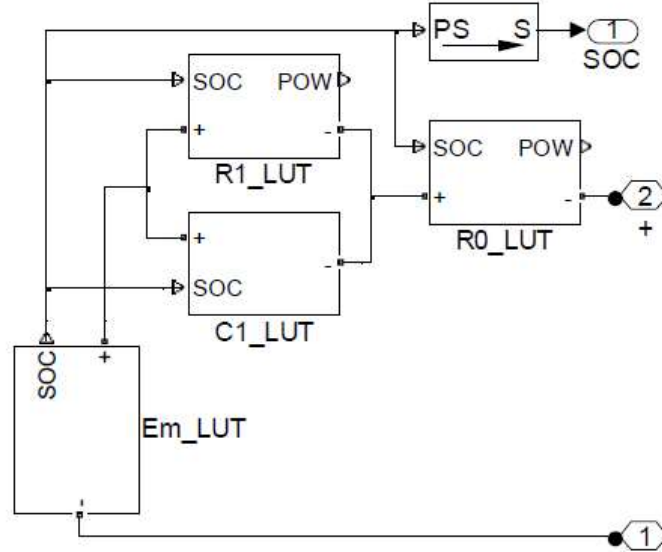
## 5.2 Elde Edilen Verilerle Modellerin En Uygunlaştırılması

Bu bölümde, farklı eşdeğer devre modelleri türleri başarımlarına göre karşılaştırılacaktır. Burada önerilen sayısal analiz, bir parametre tahmin / doğrulama aşaması ve bir benzetim aşamasından oluşmaktadır. Parametre tahmini sırasında, bir boşaltma profilinin benzetimi yapıldı ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırıldı. Eşdeğer devre modelleri, Simscape™ blokları ve Simscape™ dili kullanılarak oluşturuldu. Şekil 5.6'da gösterilen çizim devre modeli, eşdeğer devre modellerinin uygulandığı genel bir Simulink modelini göstermektedir. Devre elemanlarının her biri, özel elektrik bloklarından ve devre elemanının özelliklerini hesaplamak için alt bloklardan oluşmaktadır.

Dirençli devre elemanları, Şekil 5.7'de gösterildiği gibi değişken devre elemanları olarak modellenmiştir. Bu bloklar, Ohm kanununa göre modellenmiştir ancak parametre tahmini veya simülasyonu sırasındaki diferansiyel denklem çözümlerinde sorunla karşılaşmamak için minimum bir direnç değeri kullanılmıştır. Direncin değeri, SoC girişi içeren bir veri tablosu ile sağlanmıştır. Bu bölümde kullanılan modeller için Mathwork® tarafından sunulan Lityum-İyon batarya modelleri baz alınmıştır [38].



Şekil 5.6 : Benzetim modeli genel görünümü.

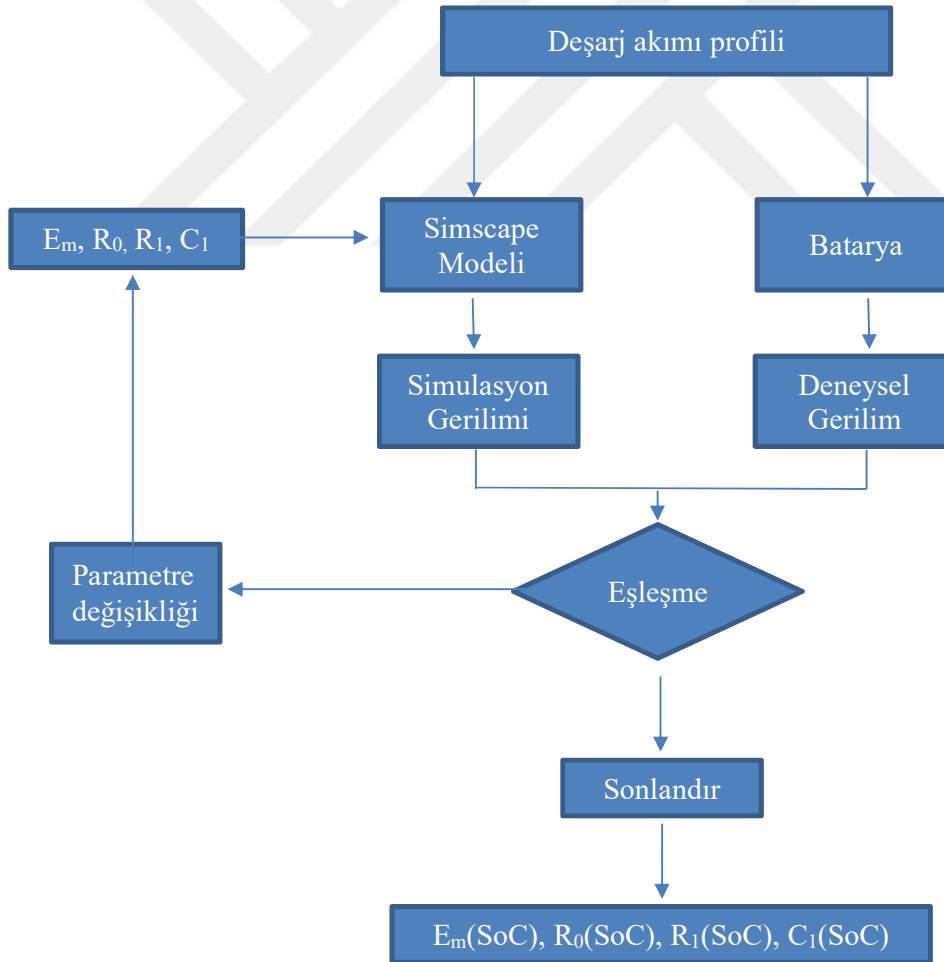


Şekil 5.7 : Özelleştirilmiş devre elemanları ile oluşturulmuş bir ECM.

Lityum hücrelerin başarımı, hücreden hücreye önemli ölçüde değişmektedir. Tipik olarak kurşun-asit bataryalar için kullanılan ampirik denklem yaklaşımı, lityum kimyası için kullanılamaz [39]. Devre elemanlarının parametrelendirilmesinde iki nedenden dolayı veri tabloları seçilmiştir. Birincisi, veri tablolarının çok esnek olmasıdır. İkinci olarak, darbe deşarj tekniği, her parametrede ve veri tablolarındaki

her bir kesme noktasını izole etmek için sayısal bir optimize edicinin her darbeye açık devre gerilimi ve RC ağı hakkında yeterli hücre başarımlı bilgisi sağlar.

Parametre tahmini için, sadece 20° C sıcaklığı baz alındı. Her devre elemanı için veri tabloları, 7 farklı SoC noktasına denk gelecek şekilde seçildi, SoC kesişim noktaları en düşükten en yüksek SoC'ye doğru yerleştirildi. Daha fazla parametre değeri parametre tahminini yavaşlatmaktadır. % 10 SoC deşarj darbelerinin sadece parametre tahminine % 10 SoC artışlarına yakın iyi veriler sağlamasıydı. Aşırı sınır değerler, verilerde iyi bir şekilde kullanılmayan çok sayıda parametrenin bulunmasına sebebiyet verebilir; bu da kısıtlanmamış veri tablolarını en uygunlaştırırken karşılaşılan bir problemdir [40]. Parametre tahmin aşamasının genel akış seması Şekil 5.8'de görülebilir.



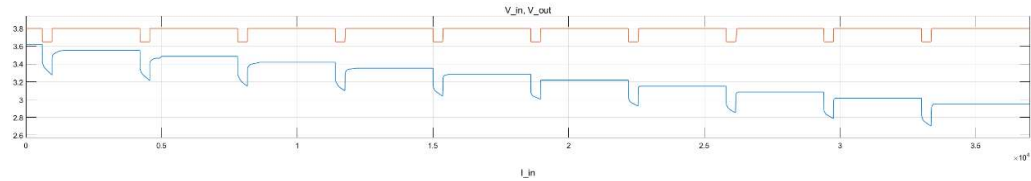
**Şekil 5.8 :** Parametre tahmini aşamasının akış şeması.

Parametreler Simulink Design Optimization™ parametre tahmin aracı kullanılarak belirlenmiştir. Tahmin yapmak için, Simscape™ eşdeğer devre modelleri ideal bir akım kaynağı ve bir gerilim sensörü kullanılarak basit bir şarj devresi modeline bağlandı. Şekil 5.9’da görülen darbe deşarj eğrisi, bir tahmin algoritması aracılığıyla tek tek çalıştırıldı. Bu yöntem, her parametre için SoC'ye karşı tek boyutlu veri tablosu seti üretti. Bu veri tablolarını üretmek için Simulink Design Optimization™, simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırırken Simscape™ ise deşarj profilinin yinelemeli olarak benzetimini yaptı. Benzetim sırasında doğrusal olmayan en küçük kareler algoritması kullanıldı. Bu algoritma, karesel hatanın toplamını en aza indirmek için parametrelerin her birinde hata derecesini hesaplamıştır.

$E_m(\text{SoC})$ ,  $R_0(\text{SoC})$ ,  $R_1(\text{SoC})$  ve  $C_1(\text{SoC})$  değerleri, doğrusal bir interpolasyon işleminin de yardımıyla simülasyon aşamasında eşdeğer devre elemanlarının değerlerini belirleyen tek boyutlu veri tablolarını oluşturmuştur. Sonuçta koyulan modelde, hücrelerin empedansının, boşalma akımının büyüklüğü nedeniyle önemli ölçüde değişmediği varsayıldı.

Şekil 5.11, Rint modeli için 20° C’de deneysel ve benzetimi yapılmış gerilim, akım ve SoC arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Benzetim on adet boşaltma darbesini yeniden üretti ve batarya boşalırken açık devre geriliminde düşüş görüldü. Aynı prosedür diğer eşdeğer devre modelleri için de tek tek uygulandı.

Bir sonraki aşamada, darbe deşarj profili yerine, yirmi dakikalık şarj-deşarj profili parametreleri en uygunlaştırılmış eşdeğer devre modellerine uygulandı. Rastgele oluşturulmuş yük durumları için ECM’lerin tepkisi OCV grafiklerinde izlendi ve yüzdesel hataları hesaplandı.

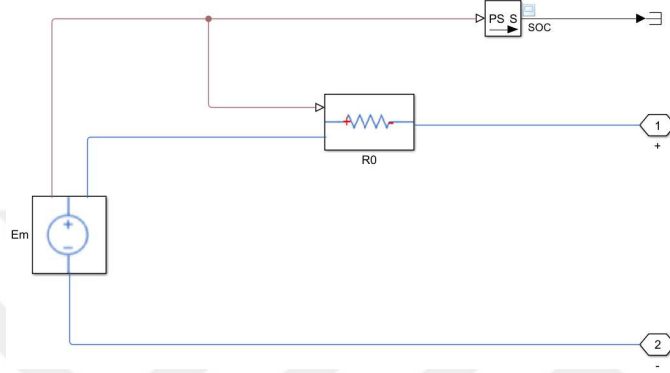


**Şekil 5.9 :** Optimize edilmemiş parametrelerle ECM’nin davranışı.

### 5.2.1 Rint modeli en uygunlaştırılması

Şekil 5.10’da görülen benzetim modelinde, 4. bölümde açıklanan Rint eşdeğer devre modeli baz alınmıştır. Darbe deşarj deneyi ile elde edilen akım ve terminal gerilimi

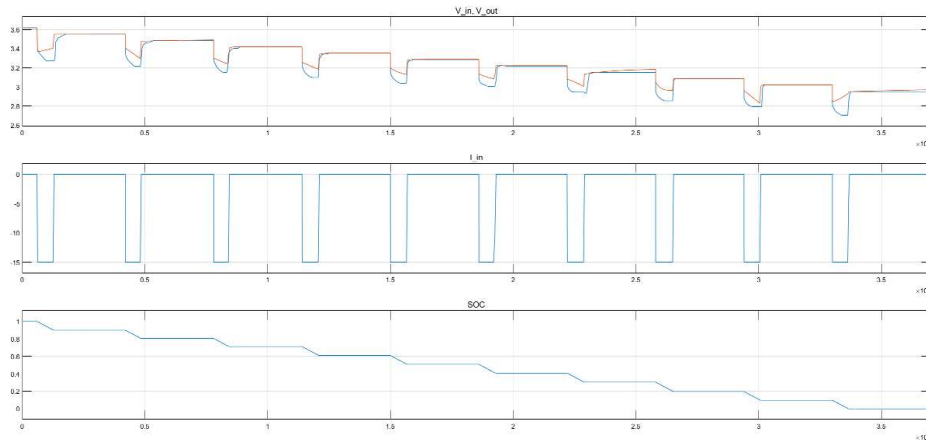
değerleri kullanılarak  $E_m$  ve  $R_0$  parametrelerinin tahmini yapılmıştır (Çizelge 5.3). En uygunlaştırma sonrası gerilim değerlerinin ölçüm değerlerine yakınsaması Şekil 5.11’de görülebilir. Yapılan şarj-deşarj deneyi akım profili parametreleri en uygunlaştırılmış Rint modeline uygulandığında deneysel sonuçlar ile arasındaki maksimum hatanın %3.817 olduğu görülmüştür (Şekil 5.12).



**Şekil 5.10 :** Rint eşdeğer devre Simulink modeli.

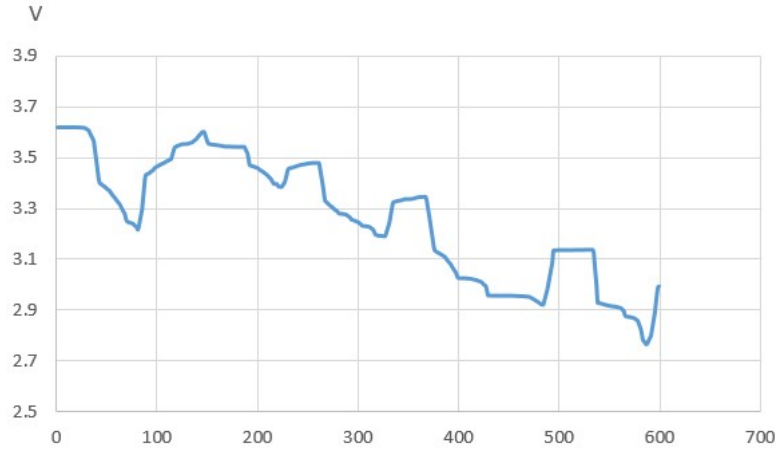
**Çizelge 5.3 :** Rint modeli tahmin edilen parametre değerleri.

| SoC  | $E_m$    | $R_0$    |
|------|----------|----------|
| %100 | 3.000012 | 0.006026 |
| %90  | 3.011193 | 0.011659 |
| %80  | 3.083882 | 0.008041 |
| %70  | 3.149162 | 0.009302 |
| %60  | 3.211209 | 0.008264 |
| %50  | 3.278291 | 0.009674 |
| %40  | 3.345618 | 0.010463 |
| %30  | 3.409709 | 0.010924 |
| %20  | 3.481811 | 0.012692 |
| %10  | 3.553845 | 0.009521 |
| %0   | 3.610526 | 0.016385 |



**Şekil 5.11 :** Optimize edilmiş Rint eşdeğer devresinin davranışı.

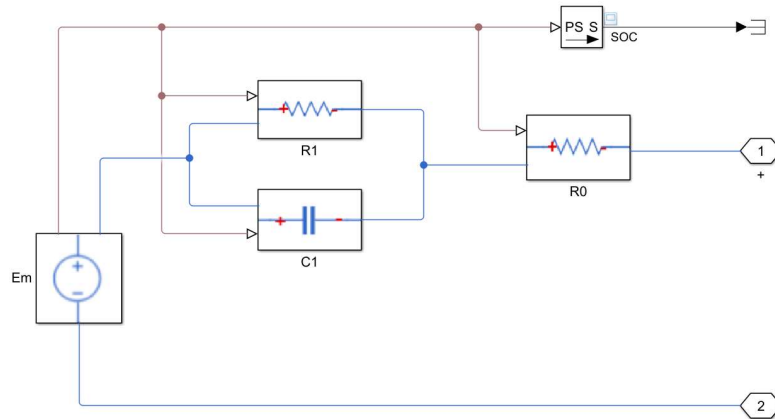




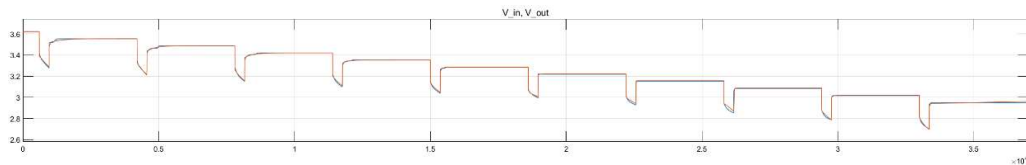
**Şekil 5.12 :** Şarj-deşarj profilinde Rint eşdeğer devresinin davranışı.

### 5.2.2 Thevenin modeli en uygunlaştırılması

Thevenin eşdeğer devre modelinin benzetimi için Şekil 5.13'te görülen model kurulmuştur. Darbe deşarj deneyi ile elde edilen akım ve terminal gerilimi değerleri kullanılarak  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_1$  ve  $C_1$  parametrelerinin tahmini yapılmıştır (Çizelge 5.4). En uygunlaştırma sonrası gerilim değerlerinin ölçüm değerlerine yakınsaması Şekil 5.14'de görülebilir. Yapılan şarj-deşarj deneyi akım profili parametreleri optimize edilmiş Thevenin modeline uygulandığında deneysel sonuçlar ile arasındaki maksimum hatanın %1.51 olduğu görülmüştür (Şekil 5.15).



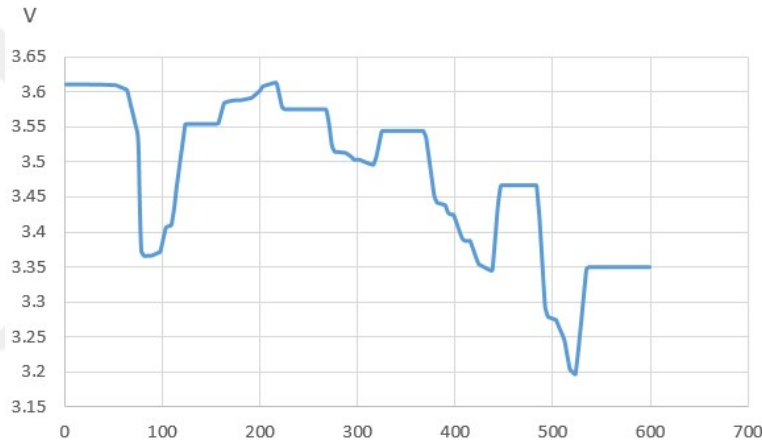
**Şekil 5.13 :** Thevenin eşdeğer devre Simulink modeli.



**Şekil 5.14 :** Optimize edilmiş Thevenin eşdeğer devresinin davranışı.

**Çizelge 5.4 :** Thevenin modeli tahmin edilen parametre değerleri.

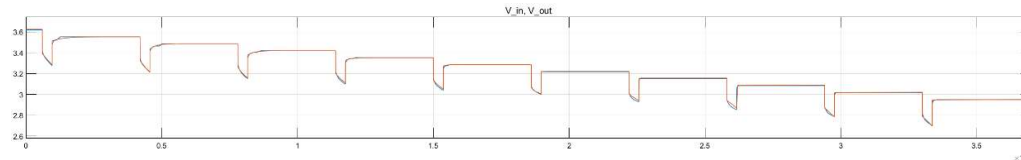
| SoC  | $E_m$   | $R_0$   | $R_1$   | $C_1$    |
|------|---------|---------|---------|----------|
| %100 | 3.00689 | 0.00144 | 0.01869 | 40084.7  |
| %90  | 3.0213  | 0.01103 | 0.00173 | 1003.62  |
| %80  | 3.08975 | 0.00814 | 0.0002  | 52782.4  |
| %70  | 3.18851 | 0.00902 | 0.00425 | 39370.9  |
| %60  | 3.24711 | 0.00949 | 0.43560 | 881008.1 |
| %50  | 3.28299 | 0.00985 | 0.00063 | 139283.5 |
| %40  | 3.35018 | 0.01051 | 0.00146 | 139501.8 |
| %30  | 3.40824 | 0.01052 | 0.00012 | 119275.9 |
| %20  | 3.50609 | 0.01262 | 0.00329 | 553665.9 |
| %10  | 3.57106 | 0.00989 | 0.12269 | 693129.6 |
| %0   | 3.6111  | 0.01634 | 0.31326 | 520815.3 |



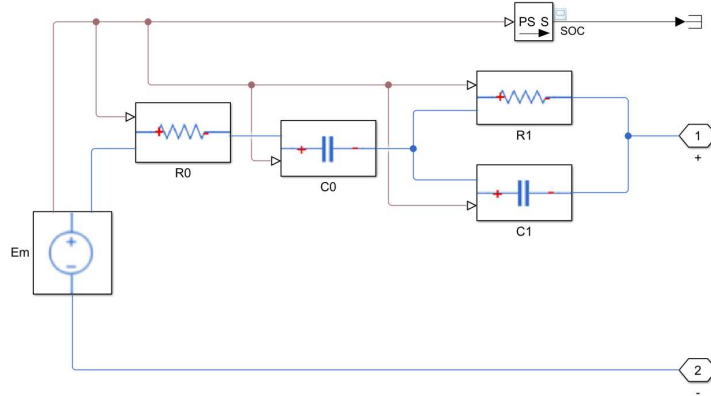
**Şekil 5.15 :** Şarj-deşarj profilinde Thevenin eşdeğer devresinin davranışı.

### 5.2.3 PNGV modeli en uygunlaştırılması

PNGV eşdeğer devre modelinin benzetimi için Şekil 5.17’te görülen model kurulmuştur. Darbedeşarj deneyi ile elde edilen akım ve terminal gerilimi değerleri kullanılarak  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $C_0$  ve  $C_1$  parametrelerinin tahmini yapılmıştır (Çizelge 5.5). En uygunlaştırma sonrası gerilim değerlerinin ölçüm değerlerine yakınsaması Şekil 5.16’da görülebilir. Yapılan şarj-deşarj deneyi akım profili parametreleri optimize edilmiş PNGV modeline uygulandığında deneysel sonuçlar ile arasındaki maksimum hatanın %2.102 olduğu görülmüştür (5.18).



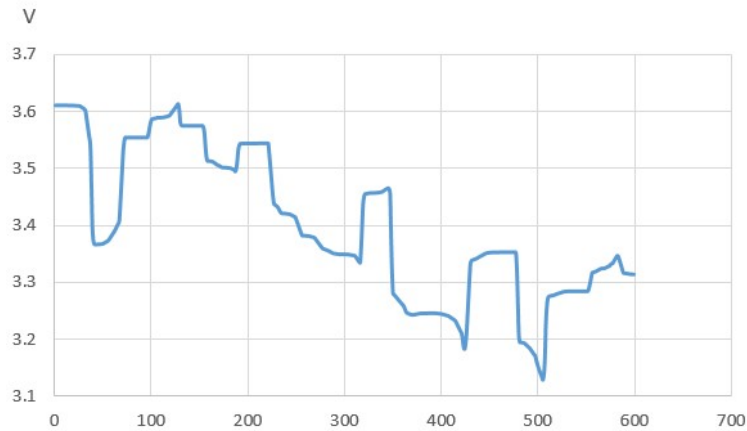
**Şekil 5.16 :** Optimize edilmiş PNGV eşdeğer devre modelinin davranışı.



**Şekil 5.17 :** PNGV eşdeğer devre Simulink modeli.

**Çizelge 5.5 :** PNGV modeli tahmin edilen parametre değerleri.

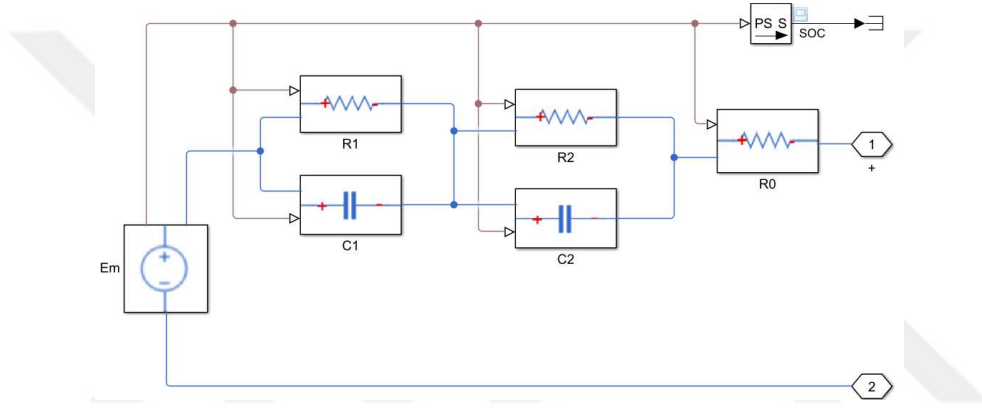
| SoC  | Em      | R0      | R1      | C0       | C1       |
|------|---------|---------|---------|----------|----------|
| %100 | 4.98800 | 0.00622 | 0.00226 | 60448.41 | 14676.73 |
| %90  | 4.80288 | 0.00978 | 0.00180 | 22550.96 | 1854.486 |
| %80  | 4.37597 | 0.00788 | 0.00185 | 17987.15 | 1964.341 |
| %70  | 3.98445 | 0.00823 | 0.00682 | 24402.75 | 25046.07 |
| %60  | 3.78619 | 0.01368 | 0.11869 | 42526.93 | 514700.8 |
| %50  | 3.77539 | 0.01156 | 0.10523 | 337593.5 | 444773.4 |
| %40  | 3.72928 | 0.01145 | 0.01635 | 30949.47 | 401658.3 |
| %30  | 3.6718  | 0.01434 | 0.01375 | 166688.7 | 373015   |
| %20  | 3.71989 | 0.01208 | 0.00516 | 1016473  | 244975.5 |
| %10  | 3.71360 | 0.0133  | 0.00768 | 849.14   | 138557.2 |
| %0   | 3.63193 | 0.0224  | 0.00118 | 428079.6 | 125375.2 |



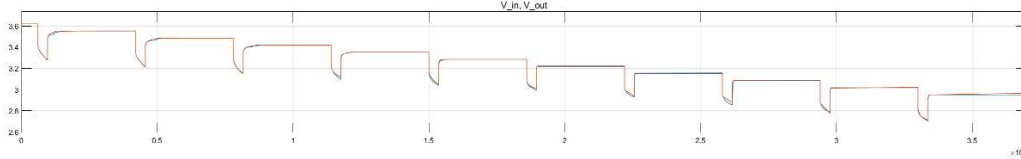
**Şekil 5.18 :** Şarj-deşarj profilinde PNGV eşdeğer devresinin davranışı.

#### 5.2.4 DP modeli en uygunlaştırılması

DP (Double polarization) eşdeğer devre modelinin benzetimi için Şekil 5.19’da görülen model kurulmuştur. Darbe deşarj deneyi ile elde edilen akım ve terminal gerilimi değerleri kullanılarak  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  ve  $C_2$  parametrelerinin tahmini yapılmıştır (Çizelge 5.6). En uygunlaştırma sonrası gerilim değerlerinin ölçüm değerlerine yakınsaması Şekil 5.20’de görülebilir. Yapılan şarj-deşarj deneyi akım profili parametreleri optimize edilmiş DP modeline uygulandığında deneysel sonuçlar ile arasındaki maksimum hatanın %1.379 olduğu görülmüştür (Şekil 5.21).



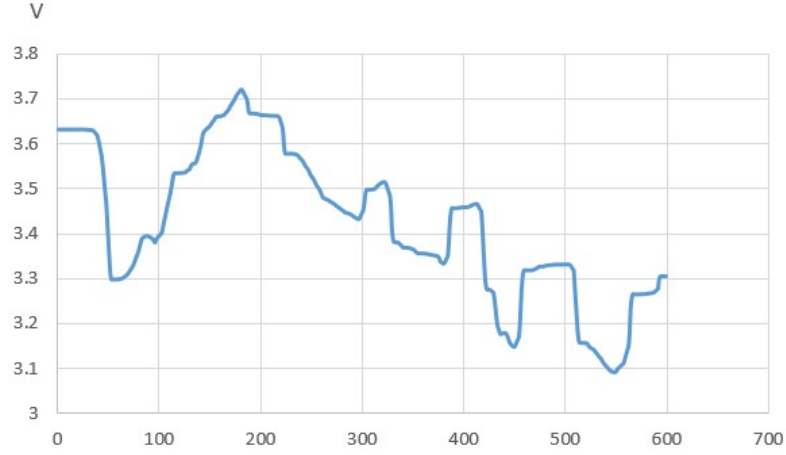
Şekil 5.19 : DP eşdeğer devre Simulink modeli.



Şekil 5.20 : Optimize edilmiş DP eşdeğer devre modelinin davranışı.

Çizelge 5.6 : DP modeli tahmin edilen parametre değerleri.

| SoC  | Em      | R0      | R1      | R2      | C1       | C2       |
|------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| %100 | 3.50571 | 0.00851 | 0.00286 | 0.005   | 13091.51 | 10000    |
| %90  | 3.56665 | 0.00848 | 0.00241 | 0.005   | 18867.98 | 10000    |
| %80  | 3.61163 | 0.00869 | 0.00257 | 0.005   | 33983.96 | 10000    |
| %70  | 3.6498  | 0.00854 | 0.00241 | 0.005   | 34748.3  | 10000    |
| %60  | 3.00014 | 0.01550 | 0.30113 | 0.00377 | 257286.9 | 7557.406 |
| %50  | 3.01082 | 0.01306 | 0.00092 | 0.00182 | 45725.35 | 5415.014 |
| %40  | 3.13646 | 0.01374 | 0.0001  | 0.00059 | 49255.36 | 9784.191 |
| %30  | 3.25183 | 0.01337 | 0.00053 | 0.00140 | 57754.52 | 12117.23 |
| %20  | 3.37373 | 0.01293 | 0.00166 | 0.00171 | 103374.9 | 13722.75 |
| %10  | 3.49861 | 0.01349 | 0.00473 | 0.00210 | 62478.09 | 12587.84 |
| %0   | 3.62155 | 0.01322 | 0.00283 | 0.00286 | 100035   | 11506.63 |



**Şekil 5.21 : Şarj-deşarj profilinde DP eşdeğer devre modelinin davranışı.**

### **5.3 En Uygunlaştırılmış Modellerin Başarım Karşılaştırılması**

Lityum-iyon batarya modelleri genellikle elektrokimyasal mekanizma modelleri ve eşdeğer devre modelleri olmak üzere ikiye ayrılır. Literatürde yaygın olarak kullanılan farklı dereceden temsili RC modelleri bu çalışmada karşılaştırmalı olarak çalışılmış ve aşağıdaki ana sonuçlara ulaşılmıştır:

(1) ECM, elektrokimyasal modellerin aksine hesaplama süresinde çok büyük bir avantaja sahiptir [13].

(2) Bütün RC modellerinin temsili işletme koşulundaki maksimum nispi hatalarının tümü %3'ten azdı; bu, genellikle gelişmiş BMS'ler için ECM'ye dayalı algoritmalar gibi hassas gereksinimleri karşılayabilir.

(3) PNGV modeli ve ikinci dereceli bir RC modeli olan DP modeli, birinci dereceli RC modellerinin aksine çıktı hatasını iyileştirdi, ancak fazla bir gelişme göstermedi. Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi, modellerin yüzdesel maksimum hatası, Rint modelinde %3.817, Thevenin modelinde %1.51, PNGV modelinde %2.102 ve DP modelinde %1.379 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, portatif tüketici elektroniği gibi sıradan uygulamalar için, birinci dereceden RC modeli (Thevenin) tercih edilen seçenek olabilir. Bununla birlikte, otomotiv ve havacılık gibi katı uygulamalar için ikinci dereceden RC modeli tercih edilen seçenek olabilir.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde en uygunlaştırılmış modelin elektrikli araç sürüş senaryosu ile irdelemesi yapılacağından, DP modeli referans alınıp kullanılmıştır.

**Çizelge 5.7 :** ECM'ler için hata sonuçlarının karşılaştırılması.

| Model    | Maksimum hata<br>(V) | Maksimum<br>yüzdesel hata (%) | RMS hata<br>(V) |
|----------|----------------------|-------------------------------|-----------------|
| Rint     | 1.7339               | %3.817                        | 0.4945          |
| Thevenin | 0.3876               | %1.515                        | 0.1455          |
| PNGV     | 0.6683               | %2.1020                       | 0.1875          |
| DP       | 0.3074               | %1.379                        | 0.1429          |

## 6. HÜCRE VE PAKET BOZUNUMUNUN ANALİZİ

Bu bölümde, çevrime bağlı kapasite kaybına katkıda bulunan faktörlerin etkileri gösterilecektir. 3. bölümde verilen sağlık durumu ile alakalı eşitlikler kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Anlık şarj durumunun hesaplanması gerektiği durumlarda DP eşdeğer devresinden yararlanılarak akıma bağlı SoC değerleri elde edilmiştir. Batarya hücresindeki ortalama şarj durumu, sıcaklık ve deşarj oranının yaşlanmaya etkisi yapılan benzetim sonuçları ile beraber verilmiştir. Bununla beraber, batarya paketlerindeki sıcaklık dağılımı ve batarya yaşlanmasına etkisi incelenmiştir.

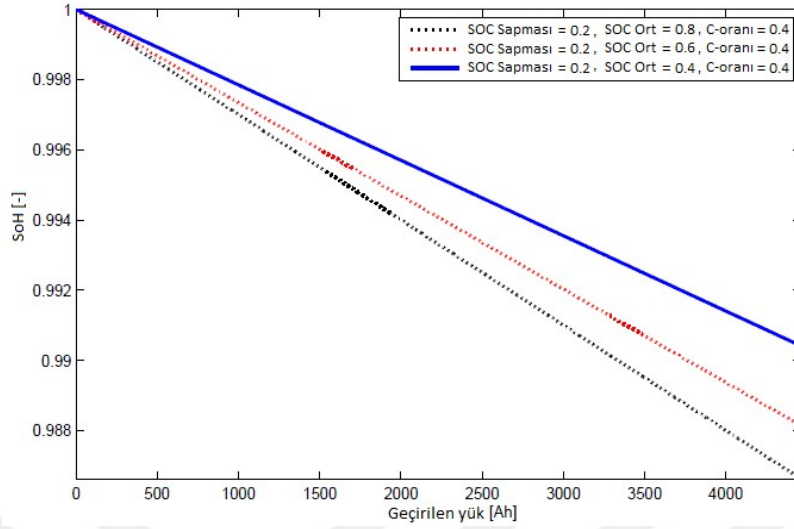
### 6.1 Hücre Bozunumunun Analizi

Bu bölümde bir batarya hücresinin yaşlanma mekanizmalarından olan ortalama şarj durumu, hücre sıcaklığı, deşarj oranının etkileri ve takvim bozunumu incelenmiştir. Batarya paketlerinde her hücrenin sıcaklığı ve sağlık durumu birbirinden farklı olacağı için, bozunum ile ilgili incelemeler birden çok hücreden oluşan batarya paketleri için de yapılmıştır.

#### 6.1.1 Ortalama şarj durumu

Şarj yüzdesinin bozulma üzerindeki etkisini göstermek için, sadece ortalama şarj durumu değiştirilerek benzetim modeli aynı çevrime tabi tutulmuştur.

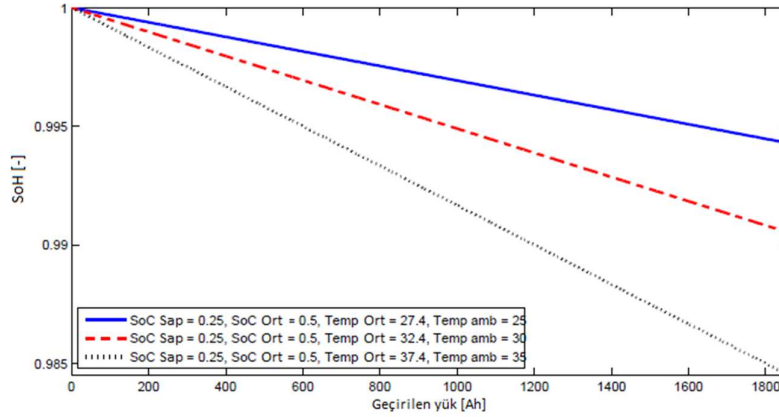
Şekil 6.1'de, aynı şarj-deşarj göngüsü farklı üç durum için kullanılmıştır, ancak başlangıç şarj seviyesi değiştirilmiştir. Hücre, bir saat boyunca 0.4 C ile şarj ve bir saat boyunca 0.4 C ile deşarj edilmiş ve bu ikisi arasında bir saat dinlenme süresi bırakılmıştır. Benzetimlerden çıkarılacak sonuç, çevrime bağlı yaşlanma dikkate alındığında, düşük şarj durumunun yüksek şarj durumuna göre daha avantajlı olduğudur. Ortalama şarj durumu yüksek hücreler çevrim kayıplarından daha fazla etkilenmektedir. Bu senaryo, ortalama şarj durumu %40, %60 ve %80 olan hücrelerin benzetimi yapılarak hücre bozunumuna etkileri gözlenmiştir.



**Şekil 6.1 :** Farklı ortalama şarj durumları için hücre sağlık durumları.

### 6.1.2 Hücre sıcaklığı

Yüksek bir sıcaklık, kapasite kayıplarını ciddi şekilde etkiler. Bunu etkiyi gözlemleyebilmek için hücrenin ortam sıcaklığı aynı çevrim profili kullanılarak değiştirilir ve benzetimi yapılır. Şekil 6.2'deki benzetim sonuçlarında görüldüğü gibi, ortam sıcaklığının 5°C kadar yükselmesi batarya hücrelerinin ömrünü neredeyse yarıya indirmektedir.



**Şekil 6.2 :** Farklı ortam sıcaklıkları için hücre sağlık durumları.

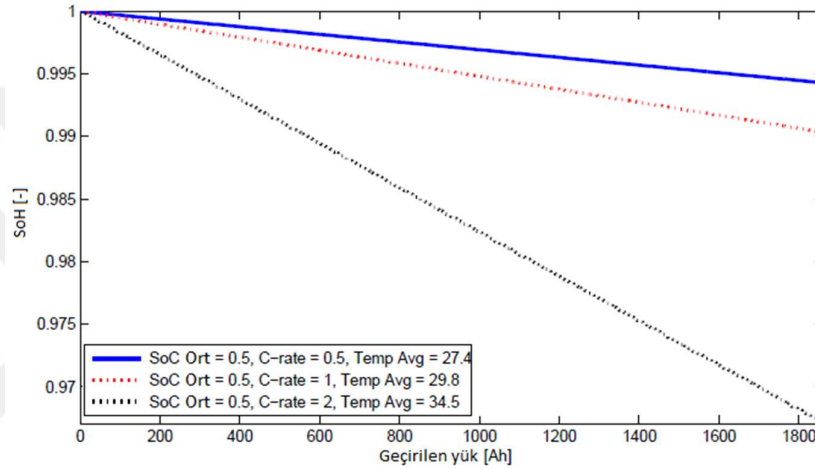
### 6.1.3 Hücre deşarj oranı

Yaşlanma modelinde deşarj hızı tek başına bir faktör olmamakla birlikte, yüksek bir deşarj hızı bir hücrenin sıcaklığını arttırır. Aşağıda, Şekil 6.3'de gösterilene benzer bir



test uygulanarak ve sıcaklık değışimleri dikkate alınarak deşarj hızının etkisi gösterilmiştir.

Grafik, üç farklı deşarj hızı için benzetimi yapılan hücrenin kapasite kaybını göstermektedir. Bu benzetimde, üç farklı durum için deşarj profili toplam çekilen enerji aynı olacak şekilde ayarlandı. Yüksek bir deşarj oranının sıcaklığı artırdığı ve buna bağlı olarak bozulmayı kuvvetle etkilediği görüldü. Sıcaklıktaki yüksek tepe değerleri bozulmayı ciddi şekilde arttırmaktadır.



Şekil 6.3 : Farklı deşarj akımlarına göre SoH profili.

#### 6.1.4 Hücre takvim bozunumu

Takvim kapasite kayıpları zaman, sıcaklık ve şarj durumunun bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Bataryanın depolanması sırasındaki kapasite kaybını öngören modeller genellikle yalnızca sıcaklığı dikkate alır ve ayrıca sürekli çalışma koşullarını kabul eder. EV uygulamasındaki bir batarya için bu doğru olmayacaktır, çünkü hem şarj seviyesi hem de sıcaklık değişkendir. Bu çalışmada uygulanan modeldeki bozulma tahmin algoritması, değişken çalışma koşullarındaki kapasite kaybını dikkate alan Arrhenius eşitliğini kullanır:

$$\frac{d\xi_{cal}}{dx} = k(T, SOC) \left( 1 + \frac{\xi_{cal}(t)}{Q_{nom}} \right)^{-\alpha(T)} \quad (6.1)$$

Bu formül kullanılırken, referans [4]’de  $\alpha$  değerini kompanze etmek için sıcaklığa bağlı ve deneysel olarak elde edilmiş ampirik eşitlikler kullanılmıştır. Sıcaklığa bağlı

$\alpha$  değerleri ve takvim yaşlanması modelinde kullanılan parametreler Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de görülebilir.

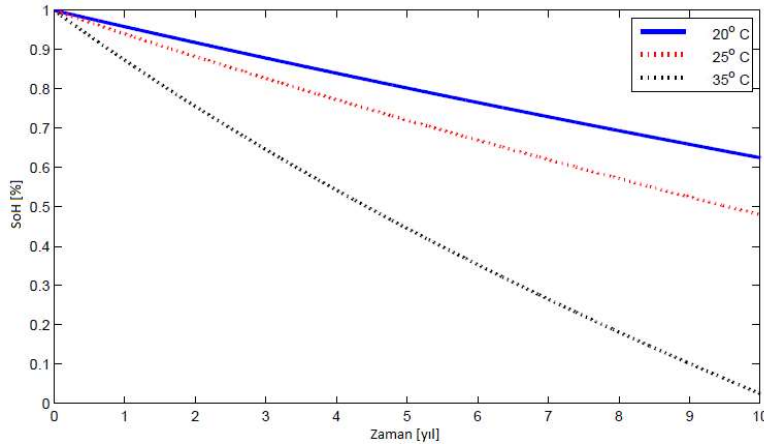
**Çizelge 6.1 :** Takvim kayıpları modeli parametreleri.

| Parametre | Değer                |
|-----------|----------------------|
| $k_A$     | $4.39 \cdot 10^{-5}$ |
| $E_A$     | 182 kJ/mol           |
| $k_B$     | $1.01 \cdot 10^{-3}$ |
| $E_B$     | 52.1 kJ/mol          |

**Çizelge 6.2 :** Takvim kayıpları modeli sıcaklık katsayıları.

| Sıcaklık | $\alpha$ |
|----------|----------|
| 30° C    | 3        |
| 45° C    | 3        |
| 60° C    | 7        |

Batarya modelini farklı çalışma koşulları altında, zaman dikkate alınarak takvim yaşlanması simüle edilebilir. Şekil 6.4'deki gibi, şarj durumunun başlangıçta %50'ye ayarlandığı farklı ortam sıcaklıkları için benzetimler yapılmıştır. Sıcaklığın bozulma üzerinde ciddi bir etkisi olduğu görülebilir. 25° C'ye kıyasla 35° C'ye maruz kalan bir hücre, neredeyse yarı sürede %0 SoH'ye düşecektir. Grafikte görüldüğü gibi, bozulma oranları zamanla azalmaktadır.



**Şekil 6.4 :** Farklı ortam sıcaklıklarına göre takvim kayıpları.

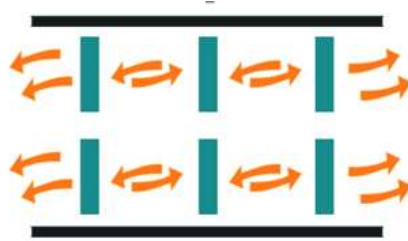
## 6.2 Paket Bozunumu Analizi

Bir paketteki hücrelerin temel davranışını göstermek için, üç hücrenin seri, iki hücrenin de devrelere paralel olduğu SP ve PS konfigürasyonunda altı hücreyle simülasyonlar yapılmıştır. Isı değişimi, hücreler, hücreler arası hava boşluğu ve dış

çevre arasındaki konveksiyonel ısı taşınımı olarak modellenmiştir. Isı değişimi, Newton'un soğuma yasasına tabidir.

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_a(t) - T_b(t)) \quad (6.2)$$

Burada, yüzey alanı  $A$ , ısı transferi katsayısı  $h$ , sıcaklık farkı  $T_a - T_b$  ve termal enerji  $Q$  olarak gösterilmiştir. Benzetimi yapılan devrelerde aktif soğutma olmadığı varsayılmaktadır. Bir hücre paketi içindeki ısı değişimi, Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



**Şekil 6.5 :** Batarya paketindeki ısı alış-verişi.

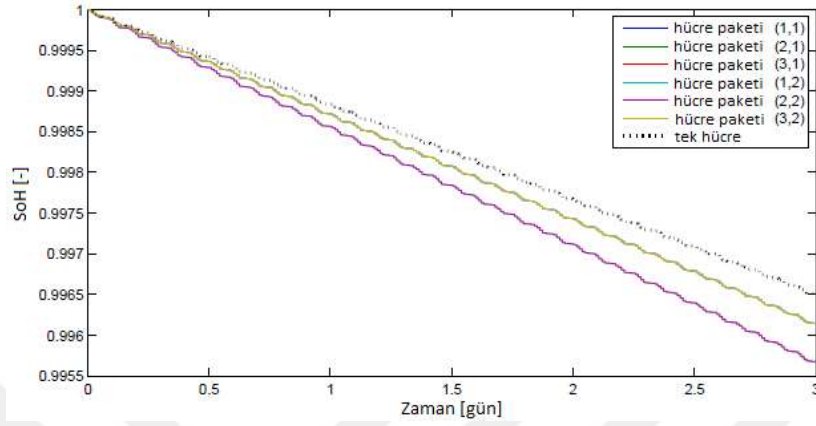
Hücre paketleri için yapılan benzetimler, daha önce tek hücreli bataryalarda yapılanlardan daha kısa zaman periyotlarında gerçekleştirilir. Bunun nedeni, hücrelerin sayısı arttıkça simülasyon zamanının artmasıdır, kabaca  $t_n = 2n \cdot t_1$  ilişkisi vardır, burada  $t_n$  ve  $t_1$  sırasıyla  $n$  adet hücre için benzetim süresidir.

Hücre sayısı belirlenirken, benzetim süresini düşük tutup paketin davranışını da gösterecek şekilde mümkün olduğunca düşük seçilir. Isı aktarımı, SP veya PS tipi bir devre olsa da aynı olacaktır. Benzetimlerde kullanılan hücreler prizmatik yapıya sahiptir. Hücreler arasındaki üretim farklılıklarını göz önünde bulundurmak için,  $R_0$ ,  $R_1$  ve  $C_1$  parametre değerleri nominal değerlerinden %2 standart sapma ile normal dağılıma tabi tutulmuştur.

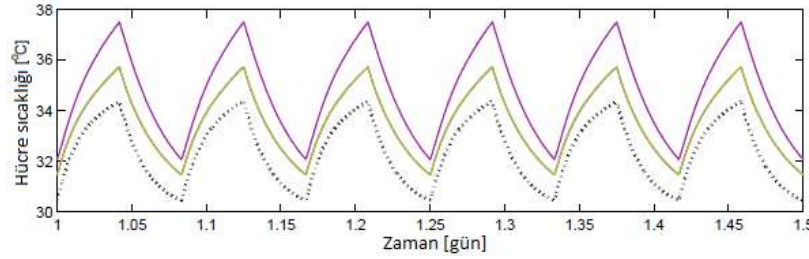
Tek bir hücreye kıyasla, bir paketteki hücreler, dış ortam yerine birbirleriyle ısı alışverişinde bulunduklarından daha yüksek sıcaklıklara maruz kalacaklardır. Batarya hücreleri ayrıca, aracın diğer bileşenlerinden de ısıya maruz kalabilir. Bu bölümde, hücre bozunumlarını gözlemlemek için 0,5 C'lik deşarj oranı kullanılmıştır.

Şekil 6.6'da, altı hücreli bir paketteki hücrelerin sağlık durumu ve ayrıca kesikli çizgi ile tek bir hücrenin sağlık durumu gösterilmiştir. Şekil 6.7'de gösterildiği gibi, hücrelerin simetrik yerleşiminden dolayı, hücre sıcaklıkları birbirine yakın olacaktır. Bu da hücreler için birbiriyle örtüşen sağlık durumlarına yol açar. En düşük çizgi iki

iç hücre ve ortadakiler dört dış hücre olacaktır. Alttağı grafik, bu çevrim sırasında hücrelerin sıcaklığını gösterir.

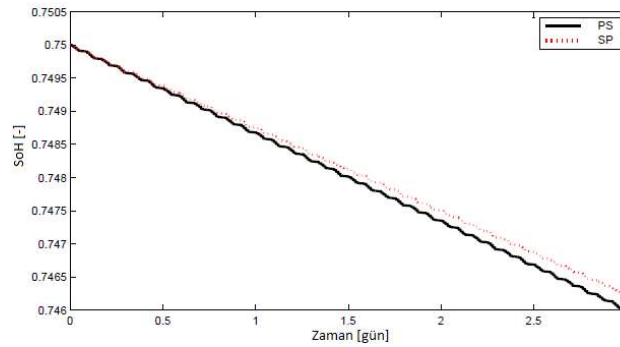


**Şekil 6.6 :** Hücre paketinde 6 hücrenin ve ayrı bir hücrenin SoH grafiğı.



**Şekil 6.7 :** Hücre paketinde 6 hücrenin ve ayrı bir hücrenin sıcaklık grafiğı.

Paralel-seri ve seri-paralel sağlık durumu hesaplaması arasındaki farkı göstermek için, tek bir hücreye, arızalı olduğu varsayılp, % 50'lik bir SoH değeri verilir. Şekil 6.8, üç günlük bir simülasyondaki sağlık düşüşünün durumunu göstermektedir. PS yapılandırması için SoH'nin, SP durumuna göre daha hızlı azaldığı görülmektedir. Her iki yapılandırma da aynı SoH'da başlar, fakat hücreler bozundukça PS'nin SoH değeri daha düşük olacaktır.



**Şekil 6.8 :** PS ve SP devreleri için SoH değişimi.

### 6.3 Sonuçların Yorumlanması

Kullanım sırasındaki takvim yaşlanması yanı sıra döngü yaşlanmasının sonuçları, 7. Bölümde daha gerçekçi senaryolarda gösterilmektedir. Buradaki hücre, bir saat 0.5 C deşarj, ardından 11 saat dinlenme, ardından bir saat 0.5 C şarj ve 11 saat dinlenme, bir süre tekrar eder. Şarj ve deşarj sürelerinde artan eğimli dinlenme hücresinde hücrenin neredeyse doğrusal olarak bozulduğu görülmektedir. Tüm süreç, şema kendini tekrar ettiği için doğrusal olarak görülebilir. Sekansın yeterince uzun bir süre için simüle edilmesi durumunda, doğrusal olmayan bir takvim kaybı grafiği görülebilir.

Ayrıca, verilen şekillerde etkisi yeterince tanımlanmayan bir bozulma etkisi daha vardır. Hücre kapasitesinin düşmesi nedeniyle, aynı miktarda şarj etmek için gereken şarj oranı daha yüksek olacaktır. Bu durum daha yüksek sıcaklığa yol açar ve bozulma açısından, kendi kendini besleyen bir döngü üretir. Çevrim kayıplarının ve takvim kayıplarının uzun süreli etkileri özetlenmek istenirse, çevrim kayıplarının zamanla artacağı ve takvim kayıpları zamanla azalacağı söylenebilir.

Bir batarya paketinin sağlık seviyesi optimum durumda, verileri ve güvenilirliği en kötü olan tek bir hücrenin sağlık seviyesi ile aynı olacaktır. Paketteki hücreler birbirleriyle ısı alışverişinde bulunduğu için, genellikle hücre paketleri tek bir hücrede olduğundan daha hızlı bir şekilde bozunuma uğrayacaktır. Bunun tam tersi şekilde, batarya hücrelerinin tehlikeli derecede düşük sıcaklıklara maruz kaldığı zamanlarda hücreler arasındaki ısı alışverişi ısınmaya katkıda bulunacaktır. Buradan çıkarılacak sonuç, bir termal yönetim sisteminin batarya ömrünü büyük ölçüde etkileyeceğidir.

Batarya hücreleri, gerekli gerilimini sağlamak için seri olarak ve yüksek kapasiteye ulaşmak için paralel olarak bağlanmıştır. Hücre paketlerindeki konfigürasyona bağlı olarak sağlık durumu, hücreler bozuldukça farklılık gösterebilir.

Hücre paketlerindeki uzun benzetim süreleri nedeniyle daha kısa periyotlu benzetimler sunulmamıştır. Sunulan verilen, tek hücreye sahip bataryalar ile karşılaştıracak şekilde, hücre paketlerindeki bozunmanın temel özelliklerini göstermesi amaçlanmıştır. Batarya paketleri ile ilgili bozunma modeline katkı yapılabilecek alanlar mevcuttur ve bu konular 8. bölümde irdelenmiştir Bir sonraki bölümde, batarya yaşlanma mekanizması elektrikli araç sürüş senaryosuna uygulanacaktır.



## 7. EN UYGUNLAŞTIRILMIŞ BATARYA MODELİNİN ÖRNEK UYGULAMASI

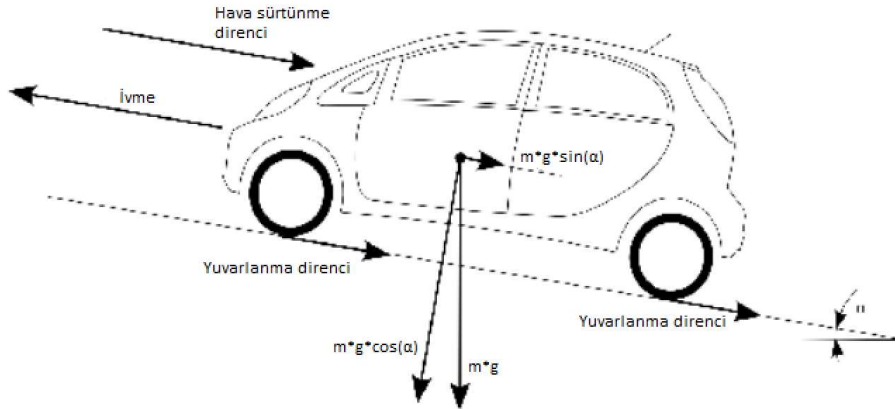
Bu bölümde yaşlanma modeli sürüş çevrimleri ve bir araç modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu uygulama, gerçek zamanlı bir uygulamada batarya hücrelerinin nasıl bozunacağına dair bir ipucu elde etmek için yapılmıştır. Benzetimlerde SoH hesabında kullanılan ampirik denklemlerden ve daha önce irdelenmiş olan DP eşdeğer devre modeli kullanılmıştır.

### 7.1 Kullanılacak Yükün Modellenmesi

Sürüş sırasında gerçekçi bir akım profili elde etmek için, bir araç modeli ve bir sürüş profili kullanılır. Bir kara taşıtının doğrusal dinamiği için denklem aşağıdaki gibidir:

$$m_v \frac{d}{dt} v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)) \quad (7.1)$$

$F_g(t)$  yerçekimi kuvveti,  $F_t(t)$  elektrik motoru tarafından oluşturulan cer kuvveti (güç aktarma sistemi ile bağlantılı kayıplar hariç),  $F_a(t)$  aerodinamik sürtünme,  $F_r(t)$  yuvarlanma direnci,  $m$  araç kütlesi ve  $v$  araç hızıdır. Yerçekimi kuvveti  $F_g(t)$ , aracın yatay yollarda seyahat ettiği varsayıldığı için ihmal edilir ve bu nedenle denklemde sıfır kabul edilir. (4.1) deki kuvvetler, Şekil 7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 : Elektrikli araca etkiyen kuvvetler.

Aerodinamik kuvvetler aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d v^2 \quad (7.2)$$

Bu formülde  $\rho_a$  hava yoğunluğunu,  $A_f$  aracın kesit alanını ve  $c_d$  aerodinamik sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Sürtünme direnci  $F_r(t)$ ;

$$F_r(t) = c_r m_v g \cos(\alpha) \quad (7.3)$$

Yukarıdaki formüllerde bir binek aracın özellikleri dikkate alınmış ve Çizelge 7.1'deki parametreler benzetimde kullanılmıştır.

**Çizelge 7.1 : Elektrikli araç parametreleri.**

| Parametre   | Değer  | Birim               |
|-------------|--------|---------------------|
| $\rho_a$    | 1.2922 | kg / m <sup>3</sup> |
| $A_f$       | 2.3    | m <sup>2</sup>      |
| $c_d$       | 0.3    | -                   |
| $m_v$       | 1500   | kg                  |
| $g$         | 9.82   | m / s <sup>2</sup>  |
| $c_r$       | 0.01   | -                   |
| $\alpha$    | 0      | °                   |
| $\eta_{em}$ | 0.85   | -                   |
| $\eta_{pe}$ | 0.95   | -                   |

Burada,  $m_v$  araç kütlesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $c_r$  sürtünme direnci katsayısı ve  $\alpha$  ise yolun eğimini belirtir. Eğim mevcut durumda yolun düz olduğu kabul edilerek 0° alınmıştır.

Aracın hızı ve çekiş kuvveti kullanılarak,  $P_t$ , aracın çekiş gücü hesaplanır:

$$P_t = F_t v \quad (7.4)$$

Bataryanın güç tüketimi,  $P_b$ , aracın çekiş gücü, elektrik motorunun verimi ( $\eta_{em}$ ) ve güç elektroniği devrelerinin verimi ( $\eta_{pe}$ ) kullanılarak bulunabilir:

$$P_b = P_t \cdot (\eta_{em} \eta_{pe})^{-sgn(P_t)} \quad (7.5)$$

Formüldeki işaret fonksiyonu  $x$  bir reel sayı olmak üzere aşağıdaki şekilde tanımlıdır (7.6). Burada rejeneratif gücün frenleme yoluyla bataryaları şarj etmek için kullandığı düşünüldükçe hareket edilmiştir.



$$\text{sgn}(x) := \begin{cases} -1 & x < 0 \text{ ise} \\ 0 & x = 0 \text{ ise} \\ 1 & x > 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (7.6)$$

Görülebileceği üzere, araç yavaşlarken güç negatif olacaktır. Batarya güç tüketimi ve gerilimini kullanılarak herhangi bir şarj-deşarj döngüsündeki akım profili çıkartılabilir:

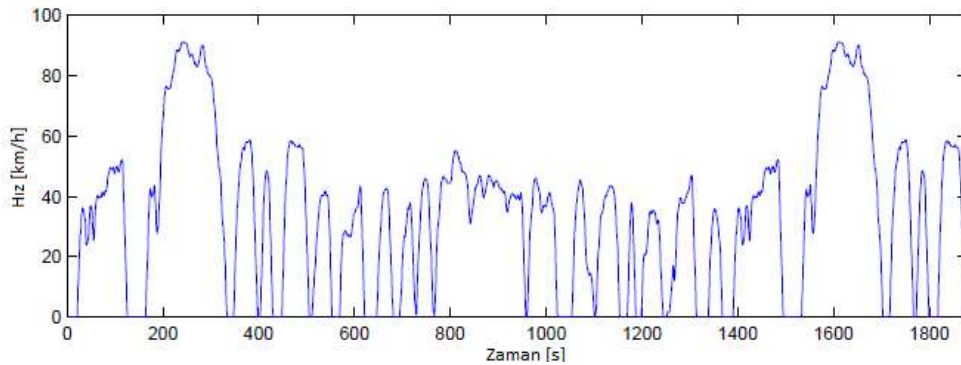
$$P_b = \frac{QV}{t} = IV \quad (7.7)$$

Parametreleri belirli olan bir aracın akım profili  $I_b(v, V)$  aracın hızı ve batarya gerilimine bağlı olarak elde edilebilir. 7.1 ve 7.7 nolu denklemler birleştirilerek aşağıdaki sonuç elde edilir:

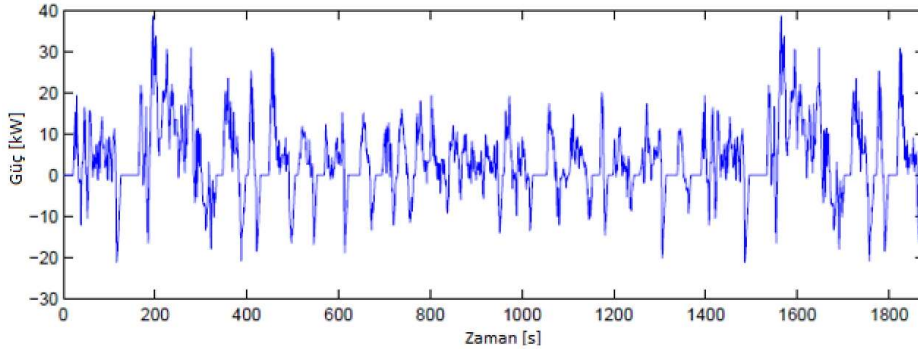
$$I_b(v, V) = \frac{(m_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d v^2 + c_r m_v g) v}{V} \cdot (\eta_{em} \eta_{pe})^{-\text{sgn}(P_t)} \quad (7.8)$$

## 7.2 FTP-75 Sürüş Çevrimi

Akım profili, araç modelini kullanarak standart bir sürüş çevriminden elde edilir. ABD federal test prosedürü sürüş çevrimi FTP-75, Şekil 7.2'deki grafikte gösterilmiştir. Bu sürüş çevrimi, gerçek sürüş senaryolarına benzetilerek hız-zaman grafiği olarak sunulmuştur. Bu sürüş döngüsü verileri ve 7.1 ile 7.5 denklemleri kullanılarak, sürüş döngüsü, güç döngüsüne çevrilebilir ve Şekil 7.3'deki grafikte gösterildiği gibi negatif bölümleri aküyü şarj etmek için kullanılabilir.



Şekil 7.2 : FTP-75 test sürüşü için hız grafiği.

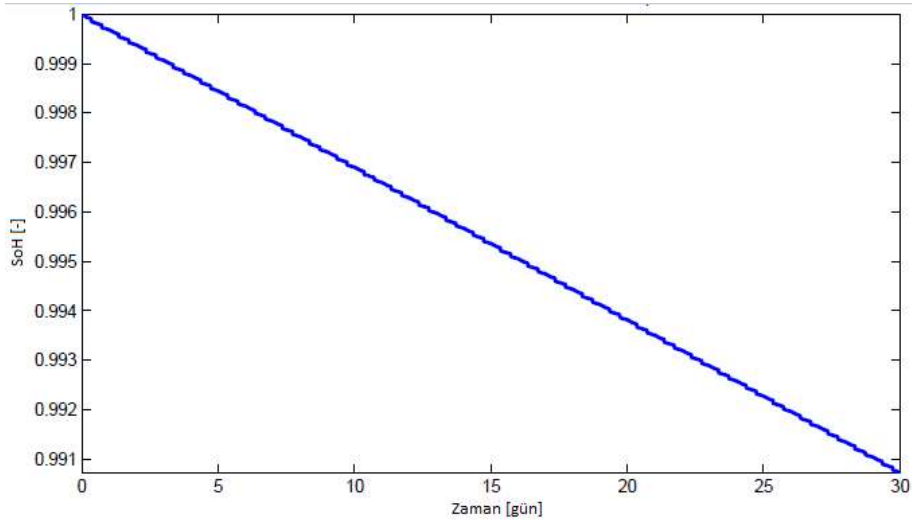


**Şekil 7.3 :** FTP-75 test sürüşü için güç tüketimi grafiği.

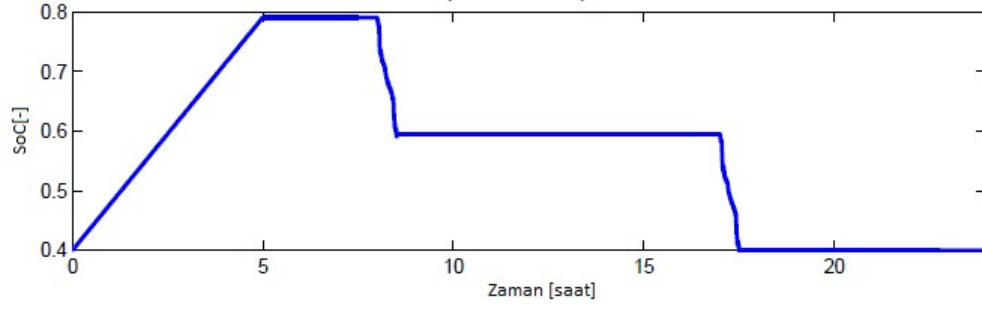
### 7.3 Benzetimler

Tekrarlanabilir, gerçekçi bir test senaryosu elde etmek için, sürüş çevrimi bir şarj sekansı ile birleştirilir. Bu süreç, bir SoH tahmini elde etmek için bir süre tekrarlanır. Bataryada kullanılan akım profilini elde etmek için güç çevriminin, 7.7 formülünden yararlanılarak bir akım çevrimine dönüştürülmesi gerekir. Bir akü hücresi ile yapılacak olan yaklaşımda olan testte, akım yaklaşık 4 C maksimum deşarj tepe değerine sahip sürüş senaryosu verecek şekilde ölçeklendirilir.

Yapılan test, aralarında birkaç saat dinlenme bulunan FTP-75 döngüsünün ikitekrarı, ardından yavaş bir şarjla yapılmıştır. Bu işlem, bir ay boyunca 25° C ortam sıcaklığına sahip bir hücre için yapılır ve Şekil 7.4’da sunulmaktadır. Şekil 7.5 ise hücrenin şarj durumunun bir gün içinde nasıl değiştiğini gösterir. Zaman aralığı yalnızca bir ay olduğundan, takvim yaşlanmasının bozunma üzerinde önemli bir etkisi yoktur.

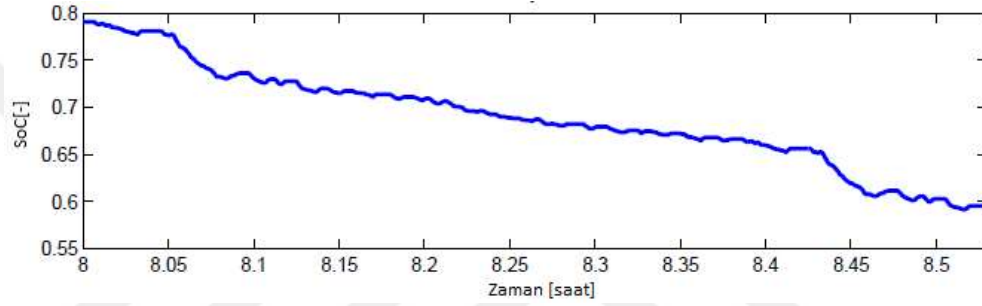


**Şekil 7.4 :** FTP-75 test sürüşüne tabi tutulan hücre için 30 günlük SoH değişimi.



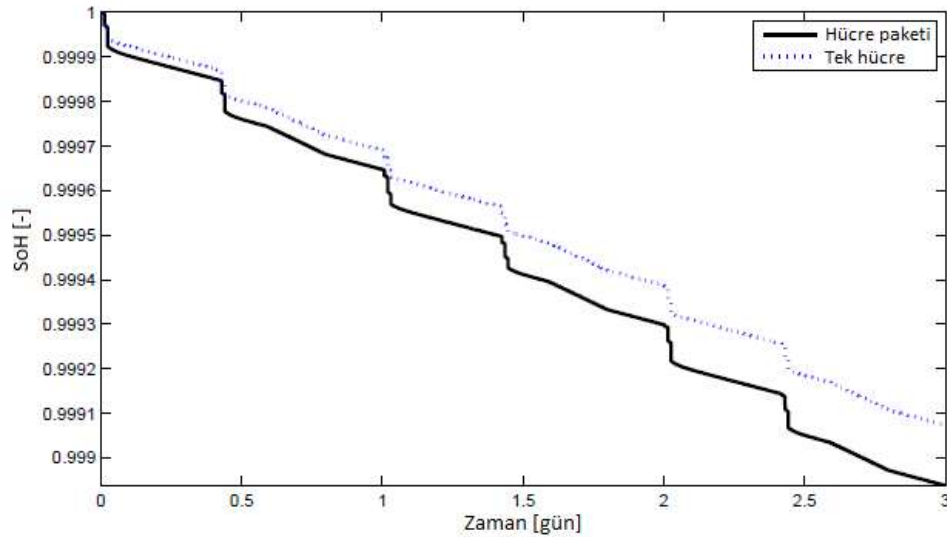
**Şekil 7.5 :** FTP-75 test sürüşüne tabi tutulan hücre için günlük SoC.

Şekil 7.6’da FTP-75 sürüş çevrimine göre SoH değişimi verilmektedir:



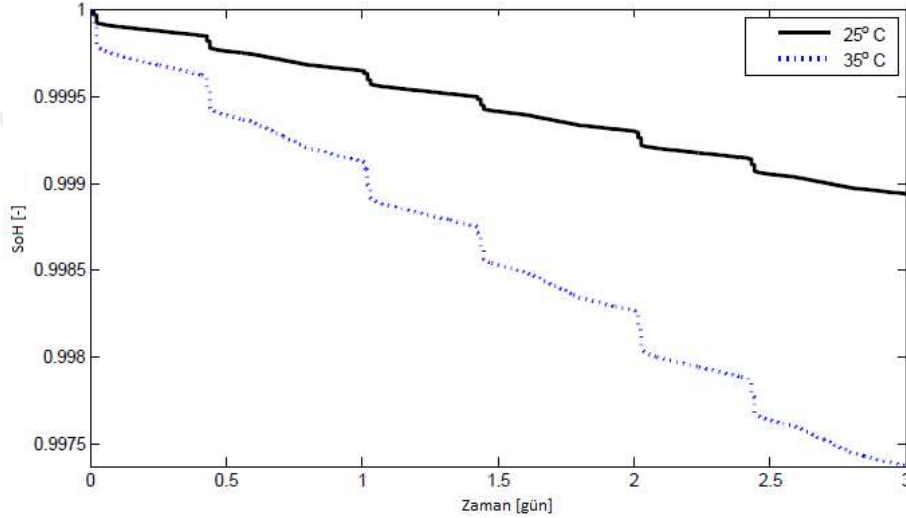
**Şekil 7.6 :** Tek bir sürüş çevrimi için SoC grafiği.

Aynı akım senaryosu, 6. Bölüm’de altı hücreli batarya paketinde kullanılmıştır, ancak simülasyon süresindeki artış nedeniyle daha kısa bir benzetim periyodu seçilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 7.7’de gösterilmiştir. Önceki bölümde olduğu gibi, SoH paketi, yüksek sıcaklıklar nedeniyle tek hücreli SoH’den daha hızlı yaşlanmaya başlayacaktır.



**Şekil 7.7 :** Batarya paketi ve batarya hücresi için SoH değişimi.

Farklı sıcaklıklar altında bir akü paketi için sürüş döngüsü senaryosunda olanları karşılaştırmak için iki sıcaklık için bir test yapılır. Paket, 25° C ve 35° C ortam sıcaklığına maruz bırakılır. Beklendiği gibi, yüksek sıcaklık durumu düşük olandan daha hızlı düşer. Bu, Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Aşağıdaki şekil esas olarak, önceki bölümlerde neler gözlemlendiğinin bir kanıtı olsa da, çevrim ve takvim kayıplarının farklı iklimlerde bozunmayı ne kadar etkileyebileceğinin iyi bir örneği olarak işlev görür.



**Şekil 7.8 :** Batarya paketinin iki farklı ortam sıcaklığındaki SoH değişimi.

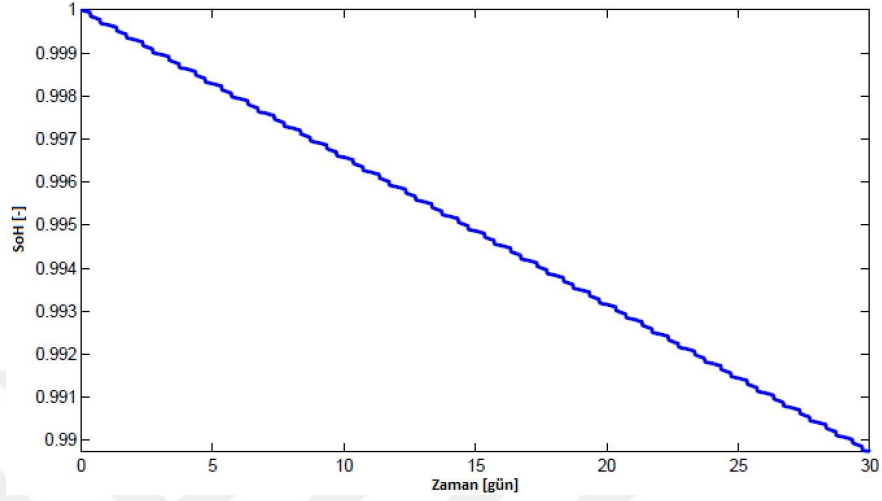
#### 7.4 Değişken Sıcaklık

Bu bölüm, bir batarya ünitesinin gerçek hayattaki uygulamalarda nasıl bozunma göstereceği konusunda bir fikir vermeyi amaçlamaktadır. Şekil 7.9'da, daha önce kullanılan akım senaryosu kullanılarak bir bataryanın paketinin sağlık durumunu, şarj durumunu ve sıcaklığını gösteren bir grafik verilmiştir. Değişken ortam sıcaklığını ( $T_{amb}$ ) elde etmek için kullanılan formülde,  $T_{pe}$  güç elektroniği devrelerinin neden olduğu 5° C sıcaklık artışını,  $T_{avg} = 18.5^{\circ}$  C ortalama sıcaklığı,  $T_{dev} = 5.5^{\circ}$  C, gün içindeki sıcaklık sapmasıdır.

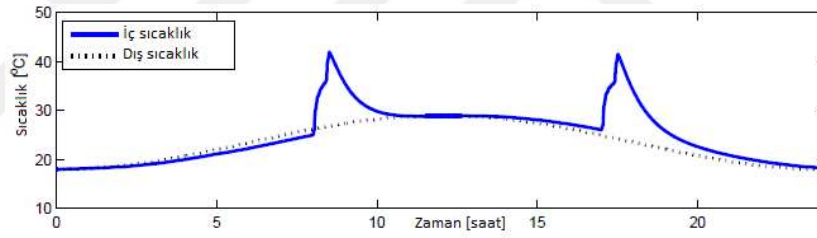
$$T_{amb}(t) = T_{avg} - T_{dev} \cdot \cos\left(\frac{t}{24} 2\pi - \frac{3}{24} 2\pi\right) + T_{pe} \quad (7.9)$$

Burada t saat cinsinden zamanı ifade eder. Yukarıdaki bilgilerden yararlanılarak, aşağıdaki Şekil 7.10'da bir hücre paketinin ortasındaki hücrenin sıcaklığı çevre

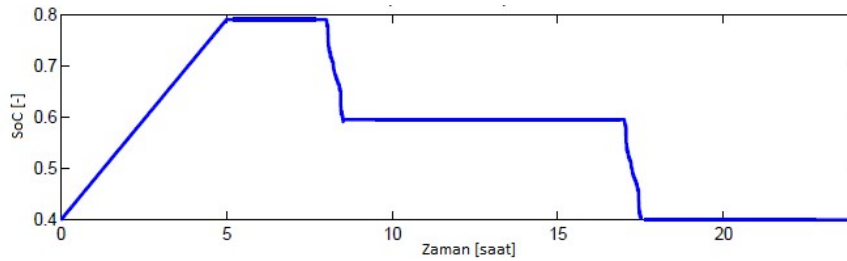
sıcaklığı ile beraber verilmiştir. Şekil 7.11’de ise bataryanın 1 gün süresince SoC değişimi görülebilir.



Şekil 7.9 : Değişken sıcaklıkta SoH değişimi.



Şekil 7.10 : Tek bir deşarj için sıcaklık grafiği.



Şekil 7.11 : Tekrarlanan deşarj sekansı için SoC değişimi.

## 7.5 Sonuçların Yorumlanması

Bozunma modellerini bir araç modeliyle ve sürüş çevrimiyle birleştirerek, belirli bir senaryo için ne kadar bozunma olacağının değerlendirilmesi yapmak mümkündür. Önceki bölümlerde tek bir hücre için ve hücre paketi için yapılan sıcaklık ve SoH'ın bozunmadaki etkisine ilişkin sonuçlar burada da karşımıza çıkmıştır. Hem kullanım hem de depolama sırasında, yüksek sıcaklık bozunmayı etkileyen en önemli faktördür.

Bu bölümdeki benzetimlerde kullanılan senaryoda, çevrim kayıplarının takvim kayıplarından daha büyük bir faktör olduğu görülmektedir. Araç, bir gün boyunca daha uzun bir süre boyunca sürülürse veya daha zor arazi koşullarında kullanılırsa bu ilişki artacaktır. Bununla birlikte, PHEV araçlarda tam tersi bir ilişki görülebilir; takvim yaşanmasının bataryanın bozunmasında daha büyük bir rol oynaması mümkündür.

Bu bölümdeki benzetimler, belirli bir senaryo için hücre paketlerinin uzun ömürlülüğüne ilişkin olarak nelerin göz önünde bulundurulması gerektiğine dair bir veri elde etmek amaçlıdır. Bu yöntem ayrıca, bataryalar yönetim sistemleri tasarlarken hangi stratejilerin kullanılacağına karar verirken de yardımcı olabilir. Batarya yönetim sistemlerinin yanı sıra soğutma sistemleri için ve bataryanın kullanılacağı uygulamaya has yorumların yapılması, örneğin elektrikli güç aktarımının bir hibrit araçta ne zaman kullanılacağına karar verilmesi konusunda yardımcı olabilir.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bataryaların kullanıldığı hassas uygulamalarda menzil, kapasite, güvenlik gibi işletme kaygılarını azaltmak için, kalan kapasiteyi (örneğin elektrikli araçlarda menzil mesafesi) tahminini doğru olarak yapmak büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, batarya yönetim sistemleri (BMS) bataryanın ne kadar şarj ve deşarj edilmesi gerektiğini ve ne zaman değiştirilmesi gerektiğini de tahmin etmelidir. Batarya şarj durumunun (SoC) hesaplaması, bataryanın tam kapasitesinden yararlanmak için yüksek doğruluğa sahip olmalıdır. Tüm bunlar için BMS sistemleri, iç ve dış etkenlere göre değişen batarya hücre parametrelerini yakalayarak SoC'nin tahmininde düzeltme görevi görecektir. Bu ek algortimallara ihtiyaç duyar. Bu tez çalışmasında, BMS sistemlerine yardımcı olmak ve hassas uygulamalardaki güvenilirliği artırmak amacıyla en uygunlaştırılmış batarya modelinin elde edilmesine yönelik bir çalışma yapılmış,, eşdeğer devre modellerinin başarımı deneysel verilere dayanarak karşılaştırılmış ve tercih edilen model üzerinden yaşlanma mekanizmaları incelenmiştir.

Batarya modellerini ve model parametrelerinin tahminini değerlendirmek için, daha önce literatürde yayınlanmış olan teknikleri kullanarak, genel bir bakış açısının elde edilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan teknikler, bir lityum-iyon bataryası için matematiksel bir model elde etmek ve daha sonra önerilen modeli deneysel olarak doğrulamak için kullanılmıştır. Modellerin yapısı, prensip olarak diğer lityum batarya tipleri için de yeterli olmaktadır.

Bu çalışmanın ilk kısmı, hücre termal dinamiklerini dahil etmeden, daha önce literatürde sunulan eşdeğer devre hücre modellerinin genel yapısı üzerinde bir karşılaştırma sunmaktadır. İlk olarak, darbe deşarjı deneysel verileri kullanarak SoC'ye karşılık gelen veri tabloları oluşturup, eşdeğer devre parametrelerinin değerlendirildiği pratik bir yöntem gösterilmiştir. İncelenen Lityum-İyon hücre kimyasının, bir gerilim kaynağına ve seri dirence sahip Rint modeli, bu modele ek olarak ayrıca RC koluna sahip olan Thevenin modeli, iki RC koluna sahip DP modeli ve Thevenin modeline ek olarak bir seri kapasitansa sahip PNGV modeli ile benzetimi yapılarak her bir model için darbe deşarj deneyi verileri kullanılıp en uygunlaştırması

yapılmıştır. Yapılan en uygunlaştırma SoC ile değişen R, C, E değerlerine ait veri tabloları oluşturulmuş ve bu tablolar ikinci deneyde kullanılmıştır.

Yapılan uygulamalı çalışma ile 20 dakikalık bir yükleme-şarj çevrimi kullanılarak doğrulanmış ve benzetimlerle en uygunlaştırılmıştır. Her bir modelin benzetim verileri ile deneysel veriler karşılaştırılarak maksimum yüzdesel hataları saptanmıştır. Elde edilen verilere göre modellerin en büyük yüzdesel hatası, Rint modelinde %3.817, Thevenin modelinde %1.51, PNGV modelinde %2.102 ve DP modelinde %1.379 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara bakarak, PNGV ve DP gibi ikinci dereceden eşdeğer devre modellerinin yeterince iyileştirme sağlamadığı söylenebilir. Ancak, hassasiyet gerektiren uygulamalar için tercih sebebi olabilir. Bu sebeple, tez kapsamındaki bozunma hesaplamaları ve benzetimlerinde DP modeli referans alınmış ve kullanılmıştır. Parametre tahmini aşamasında karşılaştırılan modeller basit bir tek hücreli batarya modeli düşünülerek geliştirilmiştir. Bununla birlikte, hücreler genellikle termal parametreleri birbirinden farklı olan hücre paketlerinden oluşturulduğu için, daha hassas SoC tahmini uygulamalarında hücrelerin münferit olarak sıcaklığını hesaplayan, yani izotermal olmayan modeller tercih edilmesi görüşü teyit edilmiştir.

Bu çalışmadaki yöntem, MATLAB®, Simulink® ve Simscape™'in, Simulink Tasarım En uygunlaştırmasının parametre tahmin işlevleriyle birlikte, eşdeğer devre modelleri kullanarak elektrokimyasal sistemleri modellemek için sayısal bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yöntem ile edilecek olan parametre tahmin verileri, BMS sistemlerinin SoC hesabında yardımcı algoritma olarak kullanılabilecektir. Yapılacak daha ileri çalışmalarda, oluşturulan veri tabloları tek bir sıcaklık değeri için değil geniş bir sıcaklık aralığı için yapılp parametre matrisleri oluşturulabilir. Bu matrisler farklı çalışma sıcaklıklarında da SoC tahminini mümkün kılacaktır. Literatüre katkı sağlayacak bir diğer çalışma konusu ise bataryanın uzun süreli şarj-deşarj profiline karşı yaşlanmasının gözlenip kalan faydalı ömrün hesaplanmasıdır.

Bu tez çalışmasında Li-iyon batarya hücreleri ve hücre paketleri için hücre bozunumunu dikkate alan bir model geliştirilmiştir. Bozunma, kullanıma bağlı döngü yaşlanması ve zamana bağlı takvim yaşlanmasına bağlı olan bir fonksiyondur.



Kullanılan model, bir Li-iyon bataryayı temsil eden eşdeğer devre modeline dayanmaktadır. Bu model, aynı zamanda, bataryanın bozunmasını kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sürüş koşullarını, ortam sıcaklığını, batarya hücresinin veya paketinin özelliklerini belirleyerek, modeli zamana bağlı sağlık durumunu hesaplamak için kullanmak mümkündür. Ayrıca bu modeli, elektrikli araçlardaki belirli bir batarya grubunun teknik özelliklerine uyacak şekilde yapılandırmak ve belirlenen bir sürüş senaryosunda sağlık durumunun nasıl değiştiğine dair bir tahmin yürütmek de mümkündür.

Bozunma ile ilgili elde edilebilecek ana sonuç, sıcaklığın, takvim yaşlanmasının yanı sıra çevrim yaşlanmasında da en etkili etken faktör olduğudur. Hücrelerin sıcaklığı, ortam sıcaklığına ve şarj/deşarj akımına bağlı olacaktır. Ortalama şarj seviyesi de bozunmayı etkileyen diğer bir faktördür, ancak genel olarak bozunmaya olan katkısı sıcaklıktan daha az bir ölçüdedir.

Bir lityum-iyon pili, yüksek seviyeden ziyade düşük şarj durumuna yakın tutmak daha sağlıklıdır. Mümkünse, şarj yüzdesindeki sapmaları (DoD) düşük tutmak da batarya ömrünü uzatabilir. Fakat bu durum, tüm uygulamalar için, özellikle menzili engelleyeceğinden ötürü BEV'ler için mümkün olmayabilir.

Bu tezde üzerinde durulan bozunma modellemesi ile ilgili genişletilebilecek konular mevcuttur. İdeal olarak, batarya hücresinin modeli ile batarya yaşlanma modeli verilerinin aynı kimyaya ve özelliklere sahip olması tercih edilmelidir. Bu tezde ise hücre modeli lityum nikel mangan kobalt oksit hücrelerine dayanmaktadır fakat yaşlanma modelleri lityum demir fosfat tipindedir.

Modellerin hesap süresini azaltacak biçimde geliştirilip, böylece daha uzun simülasyonlar yapıp yapılamayacağını görmek mümkün olabilir. Dikkate alınması gereken bir başka husus, farklı akım seviyeleri için ohmik ısınmadan kaynaklanan bozunma etkilerini göz önünde bulundurmanın yeterli olup olmadığı veya kapasite kayıplarını daha iyi modellemek için akımın hesaba katılmasının gerekip gerekmediğidir. Böylelikle, şarj vedeşarj sürecinde oluşan bozunmaların ayrı ayrı değerlendirilmesine imkân verilebilir.

Model, kesme gerilimlerinin üstünde ve altında şarj etme veya sıfırın altındaki sıcaklıklarda kullanımın etkileri gibi bozunmaya etki eden daha fazla faktör içerecek şekilde genişletilebilir. Genişletilebilecek diğer alanlar, hücre dengelemesini ve

batarya yönetim sisteminin modelini içerecek şekilde yapılan çalışmalar olabilir. Daha ayrıntılı ısı değişimi ve daha gerçekçi test senaryoları gibi alanlar da geliştirilebilir. Farklı paket yapılandırmalarını ve çalışma koşullarını daha kolay test edebilmek için, kullanıcının istenen bilgileri belirleyebileceği ve programın seçilen senaryoyu oluşturup simüle etmesine izin verecek bir grafik arayüz de tasarlanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **D. Linden**, (2011). *Linden's Handbook of Batteries*, McGraw-Hill. s. 2,4,8.
- [2] **D. Andrea**, (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Artech House, s. 2.
- [3] **A. S. Guzella**, (2013). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, Springer.
- [4] **X. Feng, C. Weng, M. Ouyang ve J. Sun**, (2016). Online internal short circuit detection for a large format lithium-ion battery, *Applied Energy*, Cilt 1 / 2168-180, s. 161
- [5] **Y. Chiang, W. Sean ve J. Ke**, (2011). Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles, *J. Power Sources*, cilt 3921–3932, s. 196.
- [6] **M. Mathew, Q. Kong, J. McGrory ve M. Fowler**, (2017). Simulation of lithium ion battery replacement in a battery pack for application in electric vehicles., *J. Power Sources*, cilt 94–104, s. 349.
- [7] **S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser ve M. Fowler**, (2016). Experimental and simulated temperature variations in a LiFePO 4–20 Ah battery during discharge process, *Appl. Energy*, cilt 504–515, s. 180.
- [8] **S. Panchal, J. Mcgrory, J. Kong, R. Fraser, M. Fowler, I. Dincer ve M. Agelin-Chaab**, (2017). Cycling degradation estimation method for lithium-ion battery, *Appl. Energy*.
- [9] **H. Mu, R. Xiong, H. Zheng, Y. Chang ve Z. Chen**, (2017). A novel fractional order model based state-of-charge estimation method for lithium-ion battery, *Appl. Energy*.
- [10] **X. Dang, L. Yan, H. Jiang, X. Wu ve H. Sun**, (2017). Open-circuit voltage-based state of charge estimation of lithium-ion power battery by combining controlled auto-regressive and moving average modeling with feedforward-feedback compensation method, *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, cilt 90, s. 27-36.
- [11] **Y. Tian, D. Li, J. Tian ve B. Xia**, (2017). State of charge estimation of lithium-ion batteries using an optimal adaptive gain nonlinear observer, *Electrochim. Acta*, cilt 225, s. 225–234.
- [12] **J. Du, Z. Liu, Y. Wang ve C. Wen**, (2016). An adaptive sliding mode observer for lithium-ion battery state of charge and state of health estimation in electric vehicles, *Control Eng. Pract.*, Cilt 1 / 254, s. 81–90.
- [13] **J. Remmlinger, M. Buchholz, M. Meiler, P. Bernreuter ve K. Dietmayer**, (2011). State-of-health monitoring of lithium-ion batteries in electric vehicles by on-board internal resistance estimation, *J. Power Sources*, Cilt 196, s. 5357–5363.

- [14] **B. Xia, Z. Sun, R. Zhang ve Z. Lao**, (2017). A Cubature Particle Filter Algorithm to Estimate the State of the Charge of Lithium-Ion Batteries Based on a Second-Order Equivalent Circuit Model, *Energies*, Cilt 10, s. 457.
- [15] **M. A. S. Robyn Jackey**, (2013). Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell, *SAE International*, Cilt 1547, s. 3.
- [16] **R. A. S. Bangaru**, (2013). Modeling and simulation of lithium-ion battery with hysteresis for industrial applications, *ICEEETS*, s. 3.
- [17] **L. Lam**, (2011). A Practical Circuitbased State of Health Estimation of Li-ion Battery Cells in Electric Vehicles, *Master of Science Thesis*.
- [18] **P. B. Long Lam**, (2013). Practical capacity fading model for li-ion battery cells in electric vehicles, *IEEE Transactions*, Cilt 28, s. 7, 14, 15.
- [19] **A. D. Sébastien Grolleau**, (2013). Calendar aging of commercial graphite/LiFePO<sub>4</sub> cell - Predicting capacity fade under time dependent storage conditions, *Journal of Power Sources*.
- [20] **A. Delbari**, (2006). *Design and Implementation of a Lithium-ion Cell Tester Capable of Obtaining High Frequency Characteristics*, McMaster University.
- [21] **M. Westbrook**, (2005). The Electric Car Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars, *The Institute of Electrical Engineers*.
- [22] **K. Hoyer**, (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars, *Utilities Policy*, Cilt 16, s. 63-71.
- [23] **Url-1** <<https://www.ticbeat.com/tecnologias/asi-funciona-una-bateria-externa-de-litio/>>, TICBeat, erişim tarihi 5 Ağustos 2019.
- [24] **H. Rivera-Barrera**, (2017). SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges, *MDPI*, Cilt 1/26, s. 9.
- [25] **J. Meng**, (2018). Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles, *Applied Sciences*, Cilt 659, s. 7.
- [26] **X. Tang, Y. Wang ve Z. Chen**, (2015). A method for state-of-charge estimation of LiFePO<sub>4</sub> batteries based on a dual-circuit state observer,» *J. Power Sources*, Cilt 296, s. 23–29.
- [27] **S. Li ve B. Ke**, (2011). Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches., *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, ABD.
- [28] **N. Watrin, R. Roche, H. Ostermann, B. Blunier ve A. Miraoui**, (2012). Multiphysical lithium-based battery model for use in state-of-charge determination, *IEEE Trans. Veh. Technol*, Cilt 61, s. 3420–3429.
- [29] **J. Forman, S. Bashash, J. Stein ve H. Fathy**, (2011). Reduction of an Electrochemistry-Based Li-Ion Battery Model via Quasi-Linearization and Padé Approximation, *J. Electrochem. Soc.*, Cilt A93, s. 158.
- [30] **X. Yang, L. Chen, X. Xu, W. Wang, Q. Xu, Y. Lin ve Z. Zhou**, (2017). Parameter Identification of Electrochemical Model for Vehicular Lithium-Ion Battery Based on Particle Swarm Optimization, *Energies*, Cilt 1811, s. 10.
- [31] **P. L. Barcellone**, (2017). Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques, *energies*, s. 2-24.

- [32] **T. Huria**, (2012). High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells, *IEEE*, s. 5.
- [33] **Url-2** <<https://voltage.com/7s5p-25.2v-16.75ah-li-ion-18650-battery-pack-panasonic-b-cuboid>>, Battery Pack with Panasonic B Cells, 16.75Ah, 24.37A, 25.2V, Cuboid Shape, erişim tarihi: 19 Temmuz 2019.
- [34] **Richard M.**, (2018). The SEI Layer Inside Lithium Batteries Explained, *UPS Battery Center*.
- [35] **E. M. Jun Li**, (2001). The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, cilt 102, 302-309.
- [36] **W. Z. H. X. e. a. Zhang L**, (2015). A comparative study of equivalent circuit models of ultracapacitors for electric vehicles, *Journal of Power Sources*, Cilt 274, s. 899–906.
- [37] **D. Worwood, Q. Kellner, M. Wojtala, W. Widanage, R. McGlen, D. Greenwood ve J. Marco**, (2017). A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications, *J. Power Sources*, Cilt 346, s. 151–166.
- [38] **J. Gazzari**, (2017). Lithium Battery Model, Simscape Language and Simulink Design Optimization, *Simulink*
- [39] **O. Sharma**, (2016). Analysis and Parameter Estimation of Li-ion Batteries, Simulations for Electric Vehicles, *IEEE Network*.
- [40] **P. Germano, Y. Perriard**, (2016). Battery Charger for Electric Vehicle Based on a Wireless Power Transmission, *Proceedings of the 13th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*.



## **EKLER**

**EK A:** MATLAB/Simulink® modelleri.







## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Hakan İNCESU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : SAMSUN / 16.11.1993  
**E-posta** : hknncs@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Programı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- EMO 11. Bitirme Tasarım Proje Ödülleri 1.liği (2016)
- Entegre Kontrol Sistemleri (2016-2018)
- AKKA (2018-Devam ediyor)