

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİTYUM-İYON TABANLI PİLLERİN**  
**ELEKTRİKSEL EŞDEĞER MODELİNİN**  
**ÇIKARTILMASI**

**MURAT CEYLAN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**

**2013**

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİTYUM-İYON TABANLI PİLLERİN**  
**ELEKTRİKSEL EŞDEĞER MODELİNİN**  
**ÇIKARTILMASI**

**MURAT CEYLAN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. ABDULKADİR BALIKÇI**

**GEBZE**  
**2013**



**GEBZE YÜKSEK  
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
.....17.06.2013..... tarih ve 2013./32... sayılı kararıyla oluşturulan  
jüri tarafından 02 / 09 / 2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat CEYLAN  
'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi  
olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

ÜYE

: DOÇ. DR. M. HAKAN HOCAOĞLU

ÜYE

: DOÇ. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

### ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Lityum-İyon temelli bataryalar yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleriyle özellikle elektrikli araçlarda diğer batarya tiplerine nazaran yoğunlukla tercih edilen batarya çeşitleridir. Araçlarda kullanılan bataryalara ait durum parametreleri olarak tanımlanan şarj durumu ve sağlık durumu gibi büyüklüklerin isabetli olarak belirlenebilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle doğru sonuç veren batarya modellerinin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada Lityum-İyon temelli bir batarya için elektriksel eşdeğer devre modeli oluşturulmuş, laboratuvar ortamında yapılan ölçümlerle modelin tutarlılığı gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lityum-İyon Batarya Modeli, Şarj Durumu, Sağlık Durumu.

## **SUMMARY**

Lithium-Ion batteries are preferred, especially in electric vehicle applications, over other types of batteries thanks to their high power and energy density. It is very important to be able to determine state parameters such as state of charge and state of charge during operation. Therefore an accurate model is necessary.

In this work, an equivalent electrical circuit model was developed and the consistency of the model was shown in comparison to laboratory measurements.

**Key Words: Lithium-Ion Battery Model, State-of-Charge, State-of-Health.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek seminerler gerekse tezimin hazırlanması aşamasında yardımını, sabrını, desteğini, ilgisini ve tavsiyelerini asla esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, beni teşvik eden tüm saygıdeğer Elektronik Mühendisliği Bölümü hocalarıma, her konuda destek olan saygıdeğer arkadaşlarım ve meslektaşlarım Arş.Gör. Ceyhun Sezenoğlu, Arş.Gör. Türev Sarıkurt, Arş.Gör. Onur Öztürk, Arş.Gör. Ahmet Köksoy, Arş.Gör. Mehmet Burak Özakin, Arş.Gör. Kadir Durgut, Arş.Gör.Dr. Özgür Karacasu, Arş.Gör. Mehmet Türker Takcı, Umut Öndin, Hasan Celal Malkoç, Mehmet Karadeniz, Arş.Gör. Sevda Vatansever, Arş.Gör. Okyanus Tulgar, Arş.Gör. Metin Acar, Arş.Gör. Serkan Barak, Arş.Gör. Aybike Şeker, Arş.Gör. Emrah Sever'e, ve son olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayarak bugüne gelmemi sağlayan aileme; Yıldız-Abdullah-Arzu Ceylan'a sonsuz teşekkürlerimi ve hürmetlerimi sunarım.

Bu tez, bana çalışmalarım sırasında her zaman yardımcı olan ve erken yaşta aramızdan ayrılan Ercan Demir'in hatırasına adanmıştır.

# İÇİNDEKİLER

|                                                       | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                  | iv                  |
| SUMMARY                                               | v                   |
| TEŞEKKÜR                                              | vi                  |
| İÇİNDEKİLER                                           | vii                 |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                        | ix                  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                       | x                   |
| TABLolar DİZİNİ                                       | xii                 |
| <br>                                                  |                     |
| 1. GİRİŞ                                              | 1                   |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                  | 2                   |
| 1.2. Bataryalar                                       | 2                   |
| 1.3. Lityum-İyon Pillerin Yapısı ve Çalışma Prensibi  | 3                   |
| 1.4. Avantaj ve Dezavantajları                        | 3                   |
| 2. BATARYANIN MODELLENMESİ                            | 5                   |
| 2.1. Batarya Modelleri                                | 5                   |
| 2.1.1. Fiziksel (Elektrokimyasal) Batarya Modelleri   | 5                   |
| 2.1.2. İstatistiksel ve Olasılıksal Batarya Modelleri | 6                   |
| 2.1.3. Elektriksel Eşdeğer Devre Batarya Modelleri    | 6                   |
| 2.1.4. Analitik Batarya Modelleri                     | 7                   |
| 2.1.5. Önerilen Model                                 | 7                   |
| 3. TEST SİSTEMİ VE DENEYLER                           | 10                  |
| 3.1. Test Sistemi                                     | 10                  |
| 3.2. Sabit Akım Altında Yaşlandırma Deneyleri         | 19                  |
| 3.3. Değişken Akım Deneyleri                          | 22                  |
| 4. MODEL PARAMETRELERİ                                | 26                  |
| 4.1. Model Parametrelerinin Elde Edilmesi             | 26                  |
| 5. BENZETİM (SİMÜLASYON)                              | 31                  |
| 5.1. MATLAB/Simulink Modeli                           | 31                  |
| 5.2. Benzetim Sonucu ve Karşılaştırmalar              | 36                  |
| 6. ŞARJ DURUMU (SOC) BELİRLENMESİ                     | 38                  |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 6.1. MATLAB/Simulink Modeli              | 38 |
| 6.2. Benzetim Sonucu ve Karşılaştırmalar | 40 |
| 7. SONUÇLAR ve YORUMLAR                  | 41 |
| KAYNAKLAR                                | 42 |
| ÖZGEÇMİŞ                                 | 45 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler ve Açıklamalar

#### Kisaltmalar

|          |                                                                                  |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $\tau$   | : Zaman Sabiti                                                                   |
| C        | : Kapasite (Capacity/Capability)                                                 |
| CC       | : Sabit Akım (Constant Current)                                                  |
| CV       | : Sabit Gerilim (Constant Voltage)                                               |
| DoD      | : Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)                                          |
| EIS      | : Elektrokimyasal Empedans Spektroskopi (Electrochemical Impedance Spectroscopy) |
| SoC      | : Şarj Durumu (State of Charge)                                                  |
| SoH      | : Sağlık Durumu (State of Health)                                                |
| $V_{OC}$ | : Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage)                                     |
| $V_t$    | : Terminal Gerilimi (Terminal Voltage)                                           |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1.1: Elektrokimyasal bir hücrenin şematik gösterimi.                   | 2                   |
| 1.2: Farklı tipteki pillerin karşılaştırılması.                        | 4                   |
| 2.1: Basit eşdeğer devre modeli.                                       | 8                   |
| 2.2: Thevenin eşdeğer devre modeli.                                    | 8                   |
| 3.1: Kurulan test düzeneğinin blok şeması.                             | 12                  |
| 3.2: Test düzeneği.                                                    | 12                  |
| 3.3: Kontrol kartı devre şeması.                                       | 13                  |
| 3.4: Kontrol kartı baskı devre çizimi.                                 | 14                  |
| 3.5: Testler için tasarlanan kontrol kartının iç yapısı.               | 14                  |
| 3.6: Kontrol kartı ve giriş-çıkış birimi bağlantıları.                 | 15                  |
| 3.7: Giriş-çıkış birimi, kontrol kartı ve kontaktörler.                | 15                  |
| 3.8: Testlerde kullanılan yazılıma ait algoritma.                      | 16                  |
| 3.9: Test sistemi yazılımının arayüzü.                                 | 18                  |
| 3.10: 300-700 çevrim arasında yaşlanmış bataryanın şarj gerilimleri.   | 20                  |
| 3.11: 300-700 çevrim arasında yaşlanmış bataryanın deşarj gerilimleri. | 20                  |
| 3.12: 300-700 çevrim arasında yaşlanmış bataryanın şarj akımları.      | 21                  |
| 3.13: Sabit şarj darbe testi sonuçları.                                | 22                  |
| 3.14: Artan şarj darbe testi sonuçları.                                | 23                  |
| 3.15: Sabit deşarj darbe testi sonuçları.                              | 23                  |
| 3.16: Artan deşarj darbe testi sonuçları.                              | 24                  |
| 3.17: Şarj-deşarj darbe testi sonuçları.                               | 24                  |
| 3.18: ECE15 sürüş çevrimi (akım dönüşümü).                             | 25                  |
| 3.19: ECE15 akım profilinin 700. çevrimdeki bir bataryaya uygulanması. | 25                  |
| 4.1: EIS ölçümüne bağlı Nyquist eğrileri.                              | 26                  |
| 4.2: Zaman domeninde ölçülen akım ve gerilim değerleri.                | 27                  |
| 4.3: Bataryaya ait deşarj grafiği.                                     | 27                  |
| 4.4: SoC- $V_{OC}$ ölçümü.                                             | 29                  |
| 4.5: $V_{OC}$ -SoC grafiği.                                            | 30                  |

|                                                                               | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 5.1: Benzetim için kurulan sistem.                                            | 31                  |
| 5.2: Katalog verilerine göre fabrikada yapılan yaşlandırma test sonucu.       | 32                  |
| 5.3: Farklı çevrim sayılarındaki batarya gerilimlerinin zamana göre değişimi. | 33                  |
| 5.4: Batarya kapasitesinin çevrim sayısına göre değişimi.                     | 33                  |
| 5.5: Katalog verilerine göre sıcaklığa bağlı kapasite değişimi.               | 34                  |
| 5.6: SOH ve SOC blokları.                                                     | 34                  |
| 5.7: Model blok ayrıntılı iç yapı.                                            | 35                  |
| 5.8: Sabit akım benzetim sonucu.                                              | 36                  |
| 5.9: ECE15 benzetim sonucu.                                                   | 36                  |
| 6.1: SoC belirlenmesi.                                                        | 38                  |
| 6.2: $V_{OC}$ hesaplama.                                                      | 39                  |
| 6.3: SoC karşılaştırma.                                                       | 40                  |

# TABLÖLAR DİZİNİ

## **Tablo No:**

## **Sayfa**

3.1: KOKAM SLBP parametreleri.

10

# 1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfusa bağlı olarak tüketilen enerji miktarı artarken, mevcut fosil yakıt rezervlerinin miktarı gittikçe azalmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanılan araçlar için alternatif kaynaklara yönelmek kaçınılmazdır. Bunun yanında içten yanmalı motor kullanan taşıtların karbondioksit salınım miktarının fazla olması ve bu konuda getirilmeye çalışılan yasal kısıtlamalar nedeniyle elektrik tahrikli araçların kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir. Bu konuda da enerji depolanması amacıyla bataryalar ilgi görmektedir. Hem yenilenebilir enerji sistemlerinde hem de elektrikli taşıtlarda yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle lityum-iyon polimer tip batarya hücrelerinin kullanımı artmaktadır. Lityum-iyon bataryalar havacılık ve uzay endüstrisinden elektrikli araçlara, her türlü taşınabilir cihazlardan cep telefonlarına, acil durum aydınlatma sistemlerinden medikal cihazlara kadar çok geniş bir alanda kullanıma geçmiştir.

Batarya sistemlerinde çalışmaların en önemli bölümlerinden birisi bataryaların tutarlı bir şekilde modellenebilmesidir. Sağlıklı bir batarya modeli sistem parametrelerinin tespiti ve incelenmesinde ayrıca batarya durum parametreleri olarak da adlandırılan bataryaların şarj ve sağlık durumlarının kestiriminde kolaylık ve isabet sağlayacaktır. Bataryaları modellemek oldukça karmaşık ve zordur. Bunun nedeni bataryaların şarj ve deşarj olurken sergiledikleri doğrusal olmayan davranıştır. 19. Yüzyılın sonunda kurşun-asit bataryalar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda tanımlanan Peukert kanununa göre bataryadan ne kadar yüksek akım çekilirse bataryanın enerjisinin tükenme oranı daha fazla azalmaktadır. Bu kanun oransal kapasite etkisi olarak da adlandırılmaktadır [1], [2].

Bir batarya modeli tasarlanırken ve tasarlanmış bir modelin diğer modellerle karşılaştırılması için kullanılan ölçütler [3] şunlardır:

- *İsabet*: Model yoluyla belirlenen verilerin deney sonuçlarıyla uyumluluğu.
- *Hesaplama karmaşıklığı*: Modelde kullanılan işlemlerin uzunluğu, benzetim süresi.
- *Analitik içyapı ve kurulum için harcanan çaba*: Modelin gerektirdiği parametre sayısı ve başka bilim dallarından beklediği katkı, modeli tanımlayan eşitliklerin performans kestiriminde uzun süreli fayda sağlayabilmesi.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İeriği

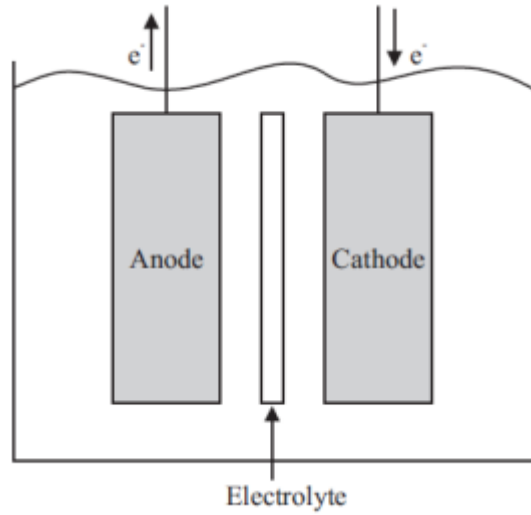
Bu çalışmada amaç olarak mümkün olduğunca isabetli, aynı zamanda kurulumu basit ve çok fazla hesaplama karmaşıklığı içermeyen bir model oluşturulması benimsenmiş ve hem elektriksel eşdeğer devre, hem de analitik model bileşenleri içeren bir model tasarlanarak benzetimleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen modelin benzetim sonuçları laboratuvar ortamında Kokam SLPB 11Ah batarya ile yapılan deneylerle karşılaştırılmış ve geliştirilen modelin tutarlılığı gösterilmiştir.

## 1.2. Bataryalar

Genel olarak bir batarya bir veya daha fazla elektrokimyasal hücrenin, seri veya paralel bağlanmasıyla oluşmaktadır.

şekil 1.1’de elektrokimyasal bir hücrenin şematik gösterimi görülmektedir. Bir hücre anot, katot ve bu iki elektrotu ayıran elektrolitten oluşmaktadır [2].



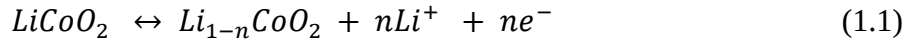
şekil 1.1: Elektrokimyasal bir hücrenin şematik gösterimi.

En basit ifade ile, elektrolit içindeki iyonlar şarj/deşarj işlemine göre farklı yönlerde hareket ederek yk transferini gerçekleştirirler ve böylece elektrotlara bağlı terminaller üzerinden akım geçerek devre tamamlanmış olur.

### 1.3. Lityum-İyon Pillerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Lityum piller ilk kez M.S. Whittingham tarafından 1970'lerin sonlarında önerilmiştir [28]. Daha sonra John Goodenough, Koichi Mizushima, Rachid Yazami, Michael M. Thackeray ve Akira Yoshino gibi araştırmacıların katkılarıyla teknoloji ilerlemiş ve şarj edilebilir tipte lityum-iyon piller piyasaya sürülmeye başlanmıştır. Günümüzde de hem hafifletilmesi hem de kapasitelerinin artırılması için yoğun bir araştırma faaliyeti söz konusudur. Elektrolit yapısında farklı tipte polimer esaslı malzemeler kullanılarak Lityum-Polimer bataryalar üretilebilmiştir.

Lityum-iyon pillerin çalışma prensibi de genel elektrokimyasal hücre yapısı ile açıklanabilir. Örnek olarak kobalt alaşımlı bir lityum-iyon pilin pozitif elektrotundaki kimyasal tepkime şu şekilde gerçekleşir:



Negatif elektrot tepkimesi ise şu şekildedir:



### 1.4. Avantaj ve Dezavantajları

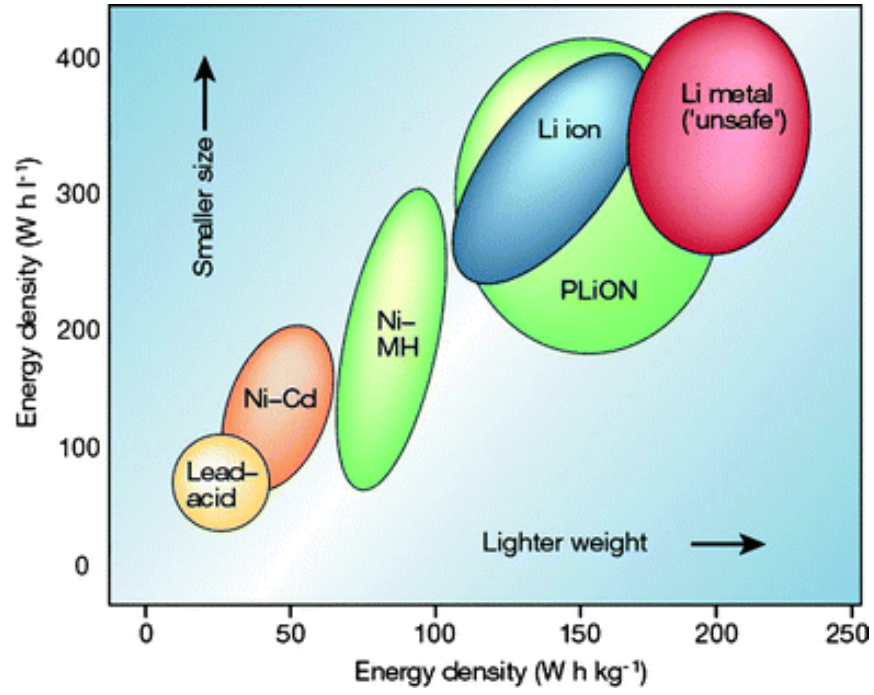
Lityum-iyon bataryalar, taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar için ağırlık ve hacim açısından en uygun çözümü sunmaktadır. Günümüzdeki teknolojiyle birim hücre başına en yüksek gerilim ve birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğu (Watt.saat/kg), diğer bir deyişle en yüksek özgül enerji, lityum-iyon bataryalar tarafından sağlanabilmektedir. Farklı kimyasal yapıya sahip bataryaların enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılması [24] Şekil 2.2'de verilmiştir.

Ayrıca hafıza etkisi probleminde etkilenmedikleri için verimlidirler ve şarj/deşarj işleminin yarıda kesilmesi olumsuz bir durum oluşturmaz.

Ancak lityum çok çabuk tepkimeye girebilen bir madde olduğu için, lityum içeren pillerin yanma ve patlama riski bulunmaktadır. Yeni elektrot tasarımları [24] geliştirilmekte ve elektrolit için kullanılan malzemeler sürekli olarak iyileştirilmekte, gün geçtikçe daha güvenli piller piyasaya sürülmektedir.

Şarj işlemi sırasında Sabit Voltaj-Sabit Gerilim (CC-CV) yöntemi kullanılmalı ve batarya gerilimi belli bir değere ulaştıktan sonra bu gerilim sabit tutularak şarj akımı azaltılmalıdır. Aksi takdirde aşırı doldurulan bir pil patlayabilir.

Deşarj işlemi sırasında da belirli bir kesme gerilimine ulaşıldığında deşarj durdurulmalıdır. Bu kesme geriliminin altında deşarj edilmeye çalışılan bataryalarda hasar meydana gelir.



Şekil 1.2: Farklı tipteki pillerin karşılaştırılması.

## 2. BATARYANIN MODELLENMESİ

Bu bölümde literatür taraması sırasında karşılaşılan modellere yer verilmiş ve tezin konusunu oluşturan eşdeğer devre modeli açıklanmıştır.

### 2.1. Batarya Modelleri

Literatürdeki çalışmalarda batarya modelleri ağırlıkla dört başlık altında toplanmaktadır. Bunlar fiziksel (elektrokimyasal), istatistiksel, analitik ve elektriksel eşdeğer devre modelleridir [2],[3],[4]. Bunların dışında istatistiksel modellemeye benzeyen fakat istatistiksel olarak elde edilen sayısal verilerin doğrudan işlenmesi yerine olasılıksal metotlarla kullanılması şeklinde tanıtılmış olasılıksal-stokastik modelleme yöntemi de ayrı bir başlık altında gösterilmektedir [4].

#### 2.1.1. Fiziksel (Elektrokimyasal) Batarya Modelleri

Fiziksel modeller bataryaların iç kimyasal işlemlerini temel almaktadır. Bu modellerde bataryanın içindeki bu işlemler detaylıca verilmektedir. Bu modeller en hassas batarya modelleri olmakla birlikte detaylı olduğu için çok karmaşık ve yapılandırması oldukça zordur. [5]'de lityum iyon hücreler için elektrokimyasal bir model geliştirilmiştir. Bu model altı çift doğrusal olmayan diferansiyel denklem içermektedir. Bu denklemlerin çözümü zamana bağlı gerilim ve akımın fonksiyonunu vermektedir ve elektrolit ve elektrot fazlarındaki potansiyelleri, elektrolit içindeki tuz yoğunluğunu, reaksiyon oranı ve akım yoğunluğunu zaman ve konuma bağlı fonksiyonlar olarak vermektedir. Dualfoil adındaki bir Fortran programı bu modeli kullanarak lityum bataryayı simule etmektedir [7]. Program kullanıcının verdiği yük profiline bağlı olarak bataryanın tüm özelliklerinin zamana bağlı nasıl değiştiğini vermektedir. Ayrıca yük profili ile birlikte kullanıcı modelleyeceği bataryanın elektrot kalınlığı, elektrolitin mevcut tuz yoğunluğu ve sıcaklık kapasitesi gibi 50'nin üzerinde parametreyi de belirlemesi gerekmektedir. Diğer yandan programın isabeti oldukça yüksektir. Bu nedenle program sıklıkla, deneysel sonuçlar yerine, diğer modeller ile karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır [4], [7]. Bu modellerin avantajları çok isabetli ve gürbüz olmalarıdır. Dezavantajları ise batarya hakkında

detaylı bilgiler gerektirdiği için yapılandırılmasının zorluğu ve çok sayıdaki diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirdiği için hesapların uzun zaman almasıdır.

### **2.1.2. İstatistiksel ve Olasılıksal Batarya Modelleri**

İstatistiksel modellerde model oluşturulurken kullanılacak parametreleri temel fiziksel veriler ve kanunlardan türetmek yerine veri örnek setlerinden anlamlı yapılar çıkarmak temeline dayanır [8]. Bu modeller kompakt ve hızlıdır ancak fiziksel modeller kadar isabetli değildir.

Olasılıksal modelleme de istatistiksel modellemeye benzer bir şekilde veri yorumlama temellidir. Bu yöntemde bataryanın davranışları özel bir fiziksel işlem değil parametreleri istatistiksel sonuçlara dayanan olasılıksal bir işlem olarak tanımlanır [9]. Bu modeller istatistiksel modellere göre daha isabetlidir ancak yöntemin temeli ileri benzetim tekniklerine dayanır ve karmaşıktır.

### **2.1.3. Elektriksel Eşdeğer Devre Batarya Modelleri**

Bataryaları eşdeğer devreler olarak modellemek oldukça başarılı sonuçlar verir. Bu tip modellerde model üzerinden matematiksel hesaplamalar yapma imkânı bulunmaktadır. Bu nedenle şarj-deşarj veya empedans eğrileri için eşdeğer devreler modellenmiş ve analiz edilmiştir. Eşdeğer devre modelleri elektrik araçlarında parametre kestirimi yapmak için kullanılmıştır [10], [11], [12]. Bu metotlarda genelde istatistiksel veriler kullanılarak parametreler basit bir devrenin değişkenleri olarak sisteme oturtulur. Bu konuda yaygın olarak kullanılan iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda bataryanın iç direnci gibi direnç olarak modellenmiş bazı parametreler empedans spektrometresi kullanılarak belirlenir [13], diğerinde ise farklı bir modelleme yapıp bu parametreler Ohm kanunu kullanılarak çekilir [14]. Bataryaların iç direncini etkileyen en önemli faktörün sıcaklık olduğu göz önünde bulundurularak iç direnci sıcaklığa ait bir fonksiyon olarak tanımlayan bir batarya modeli de açıklanmıştır [11]. Ayrıca bataryaların nasıl ısındığı modellenmiş, soğutulduğu zaman nasıl davranacağını benzetimleri yapılmıştır [10]. Bu metotla elde edilecek olan model modüler olarak farklı sistem bileşenleri ile birlikte benzetimi yapılabilir. Modelin isabetli olması için elde edilen şemanın detaylı olması

gerekmektedir. Bu da modelin karmaşılaşmasına neden olur. Bu durumda sayısal çözüm için bir devre analizi yazılımına ihtiyaç duyulur.

#### 2.1.4. Analitik Batarya Modelleri

Bu tip modellemede fiziksel ve istatistiksel yaklaşımlar bir araya getirilmiştir. Yapı oldukça basitleştirilmiş bir fiziksel batarya modelinde daha az sayıda parametrenin deney sonuçlarıyla elde edilmesine dayanır. Başka bir deyişle sistemin matematiksel formu fiziksel eşitsizliklerden elde edilirken parametreler “kara kutu” deneyleri sonucunda elde edilir [15]. Basitleştirilmiş fiziksel yapıdan dolayı göreceli olarak isabetli ve gürbüz, parametrelerin istatistiksel olarak belirlenmesinden dolayı hızlı ve kompaktır.

[16]’de ise iki analitik model sunulmuştur. Bunlardan birisi yayılma (diffusion) temelli bir modeldir. Diğer ise ayrı bir başlık altında da tanıtılabilecek ilk olarak [17]’de ortaya atılmış olan Kinetik Batarya Modelidir. Bu model batarya parametrelerini belirlemektense doğrudan kalan şarjı belirlemek üzerine kurulmuştur. Batarya Hazır Şarj Kuyusu (Available Charge Well) ve Sınır Şarj Kuyusu (Bound Charge Well) olarak iki kuyu şeklinde modellenmiştir. Buna göre sistemde yük varsa Hazır Şarj Kuyusu boşalmakta yük devreden çıkarıldığında Sınır Şarj Kuyusu, Hazır Şarj kuyusunu doldurmaktadır. Böylece kurtarma etkisi (recovery effect) de modellenmiş olmaktadır [17], [18]. Kurtarma etkisi deşarj işlemi durdurulan bir bataryanın enerji seviyesinin kendiliğinden bir miktar artmasıdır [2].

#### 2.1.5. Önerilen Model

Bu çalışmada bir elektriksel eşdeğer devre batarya modeli tasarlanmış, modelde ihtiyaç duyulan açık devre gerilimi  $V_{oc}$  değeri bataryanın şarj durumundan da faydalanılarak matematiksel bir fonksiyon olarak belirlenmiştir. Bu nedenle model hibrit batarya modeli olarak adlandırılabilir. Önerilen model açık devre gerilimi  $V_{oc}$ ’den faydalanarak terminal gerilimi  $V_t$ ’nin belirlenmesine dayanmaktadır.  $V_{oc}$  bataryanın herhangi bir yüke bağlı olmadığı durumdaki gerilimi,  $V_t$  ise bataryanın terminallerinden ölçülen gerilimi tanımlanmaktadır. Önerilen modelde  $V_{oc}$  bataryanın şarj durumuna (SoC) bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. SoC

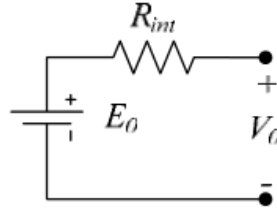
bataryada kullanılabilecek durumdaki yük miktarının (Q) bataryadaki maksimum sayıdaki yük miktarına (C) oranı şeklinde tanımlanmaktadır [19].

$$SoC = \frac{Q}{C} \%100 = \frac{C - Q_d}{C} \%100 \quad (2.1)$$

Burada  $Q_d$  kullanılan yük miktarını, C ise en başta mevcut olan yük miktarını göstermektedir. Şarj durumu başka bir bakış açısıyla (2.2) eşitliği kullanılarak deşarj derinliği (DoD) cinsinden de ifade edilebilir.

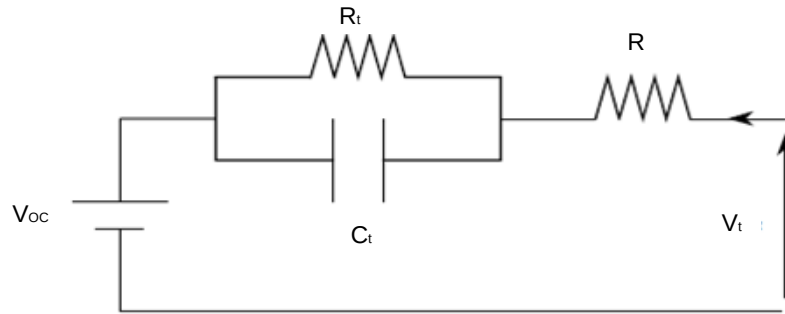
$$DoD = 1 - SoC \quad (2.2)$$

Simülasyon programlarında kullanabilmek üzere seçilmesi düşünülen ilk model bataryanın elektrokimyasal içyapısını tek bir iç direnç ile gösteren basit eşdeğer devre [26] modelidir.



Şekil 2.1: Basit eşdeğer devre modeli.

Fakat yapılan literatür çalışmasında bu modelin geçici rejim durumlarında iyi sonuç vermediği görüldüğü için, değişken akım uygulamalarında daha isabetli sonuçlar elde edebilmek amacıyla, iç dirence seri bağlı R, C yapısı eklenerek oluşturulan ve daha iyi sonuç veren Thevenin eşdeğer devre modeli benimsenmiştir.



Şekil 2.2: Thevenin eşdeğer devre modeli.

Bu modelde birbirine paralel  $R_t$ ,  $C_t$  çiftinin sayısı ne kadar artarsa model o kadar doğru sonuç vermekte, fakat karmaşıklık ve benzetim süresi oldukça artmaktadır.

Bu nedenle mümkün olduğunca basit bir model oluşturmak için tek  $R_t$ ,  $C_t$  yapısı kullanılmıştır. Eşdeğer devre modelinde yer alan  $R$ , pilden akım çekildiğinde oluşan gerilim düşümünün ana bileşeni olan iç direnci temsil etmektedir. Paralel  $R_t$ ,  $C_t$  yapısı ise pilin elektrokimyasal iç yapısının ani akım değişimleri sırasındaki yanıtını elektriksel eşdeğer devre modeline ekleyebilmek için gerekli olan zaman sabitini belirleyebilmek için gereklidir. Böylece paralel plakalar tarafından oluşturulan sığa ve plakaların elektrolit ile temasından meydana gelen doğrusal olmayan direnç etkileri de modele eklenmiş olmaktadır.  $V_{oc}$  pil herhangi bir yüke bağlı değilken ve denge durumunda ölçülen açık devre gerilimini, diğer bir deyişle boşta çalışma gerilimini belirtir.  $V_t$  ise çalışma sırasındaki terminal gerilimini temsil eder.

$V_{oc}$  açık devre gerilim değeri batarya yük altındayken ölçülemez. Önerilen modelde  $V_{oc}$  açık devre geriliminin bataryanın şarj durumuna bağlı bir matematiksel fonksiyon olarak belirlenmesi amaçlanmış ve kontrollü gerilim kaynağı haline getirilmiştir. Bu sayede Kalman filtresi gibi karmaşık ve yoğun hesaplama gücü gerektiren bir yöntemle gerek kalmadan basit bir cebirsel hesaplama ile tatmin edici doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir.

Kullanılan modelin devre denklemi aşağıdaki gibidir.

$$V_{oc} = V_t + (R_i + R_t)I - R_t I e^{(-\frac{t}{RtC})} \quad (2.3)$$

Model başarılı olarak oluşturulduktan sonra, yük altında çalışan gerçek bir sistemde ölçülen terminal gerilimi kullanılarak ters hesaplama yapıp geri dönüş sağlanarak  $V_{oc}$  açık devre gerilimi hesaplanabilmektedir. Böylece yük altında çalışan bir sistemde ölçülmesi mümkün olmayan  $V_{oc}$  açık devre gerilim değerleri elde edilebilmekte ve bu bilgi kullanılarak açık devre gerilimine bağlı SoC şarj durumu yüksek isabetle belirlenebilmektedir.

### 3. TEST SİSTEMİ VE DENEYLER

Bu bölümde bataryaların şarj/deşarj edilmesi için kurulan test sistemine ve yapılan farklı deneylere yer verilmiştir.

#### 3.1. Test Sistemi

Bu çalışmada 11 Ah nominal kapasiteye sahip Kokam SLPB lityum-polimer bataryalar kullanılmıştır. Kullanılan bataryanın parametreleri Tablo 3.1’de görülmektedir [22].

Tablo 3.1: KOKAM SLPB parametreleri.

| <i>Parametre</i>              | <i>Değer</i> |
|-------------------------------|--------------|
| Anma kapasitesi               | 11 Ah        |
| Anma gerilimi                 | 3.7 V        |
| Şarj üst sınır gerilimi       | 4.2 V        |
| Deşarj alt sınır gerilimi     | 2.7 V        |
| En yüksek sürekli şarj akımı  | 33 A         |
| En yüksek süreklideşarj akımı | 88 A         |
| Ömür                          | 1400 çevrim  |

Bataryadan veri toplanabilmesi için yaşlandırma testi uygulanmıştır. Bataryanın katalogunda bir bataryanın maksimum çevrim sayısına (1400 çevrim) ulaşabilmesi için tanıtılmış prosedüre göre:

- Batarya 1 C sabit akım ile şarj edilir. batarya geriliminin 4.2 V'a ulaşmasının ardından batarya 0.05 C ile 5 saat daha şarj edilir.
- Batarya 1 C sabit akım altında 3 V'a kadardeşarj edilir.

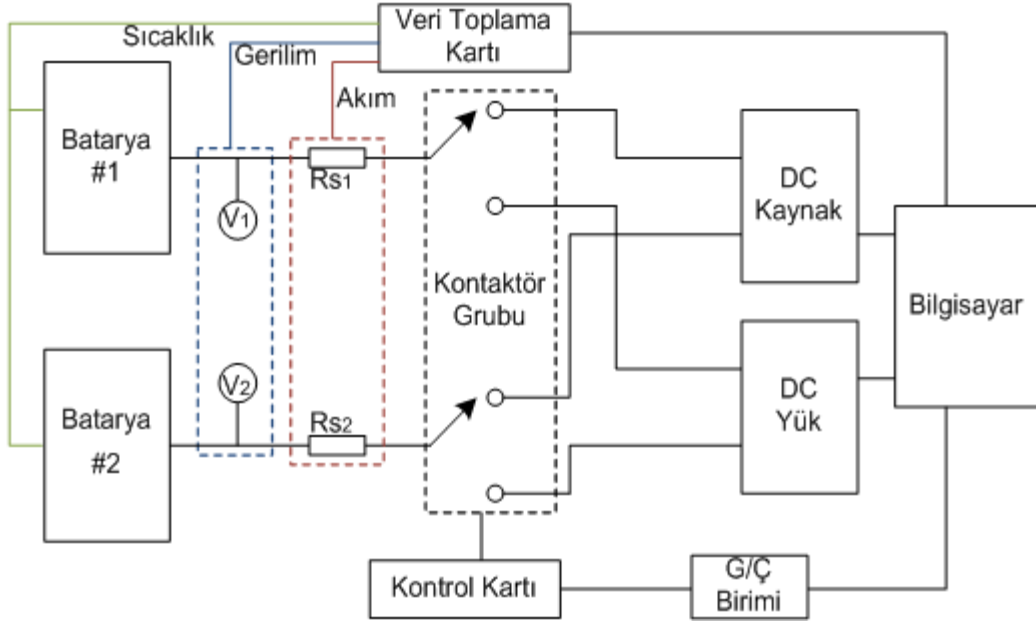
- Şarj ve deşarj arasında 10 dakika beklenmektedir.

Test koşullarını mümkün olduğu kadar gerçek kullanım sırasında bataryanın maruz kalacağı zorlu şartlara benzer duruma getirmek amaçlanmıştır. Bu nedenle katalogda belirtilen prosedürlere yakın olarak yeni bir şarj-deşarj prosedürüne karar verilmiş ve bataryalar üzerinde test edilmiştir:

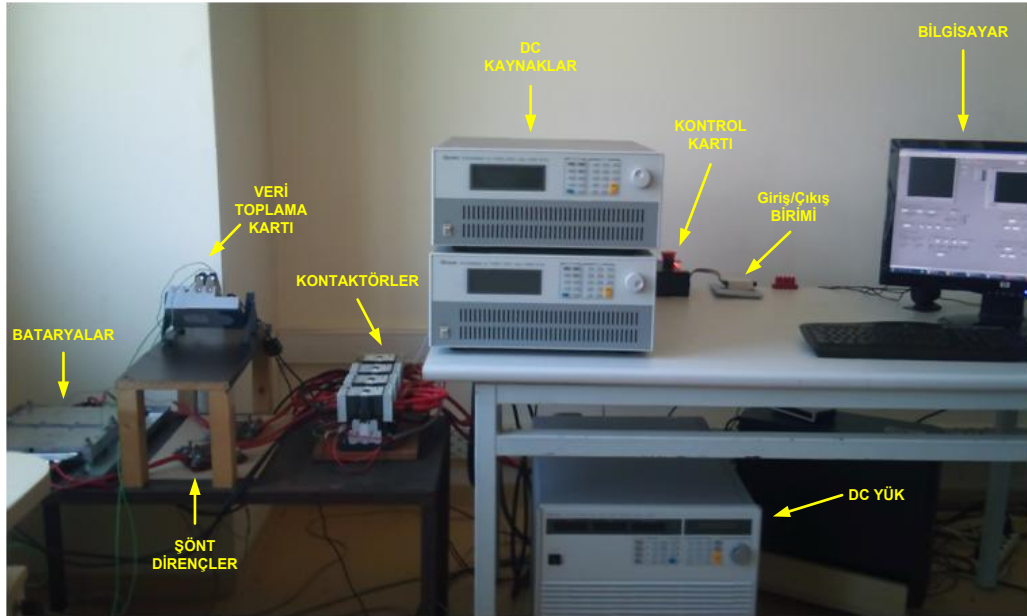
- 1 C (11A) sabit akımla şarj durumunda batarya gerilimi 4.2 V değerine ulaştıktan sonra sabit gerilime geçilmekte ve şarj akımı azalmaktadır. Bu değişime bağlı olarak şarj akımının 20 dakika boyunca 0.05 A'in altında olduğu durumda şarj kesilmektedir.
- Deşarj durumunda tamamen dolu olan bataryanın gerilimi 1C (11A) sabit akım altında kesintisiz olarak 4.2 V'dan 2.7 V'a düşürülmektedir.
- Ayrıca bataryanın katalogunda verilen bilgiler doğrultusunda şarj ve deşarj işlemleri arasında 5'er dakika beklenmektedir.

Bu süreç yaklaşık 4 saat sürmektedir. Yaşlandırma prosedürünü hızlandırmak açısından aynı anda bir batarya şarj edilirken diğerinin deşarj edilebileceği bir test düzeneği oluşturulmuş. Ayrıca bu düzenek sayesinde bataryalar üzerinde yaşlandırma testlerinin yanı sıra, kapasite testleri ve farklı yük profillerinde de testler yapılabilmektedir.

Test sisteminde bataryalar, kaynak ve yüke ek olarak kontaktörler, bu kontaktörleri kontrol etmek için tasarlanan, NI USB 9006 Giriş-Çıkış birimine bağlı bir röle kontrol kartı, akım ölçmek için kullanılan şönt dirençler, sıcaklık ölçümünde kullanılan termokupllar ve akım, gerilim ve sıcaklık büyüklüklerini bilgisayara aktaran NI 9206 ve NI 9213 veri toplama kartları kullanılmıştır. Batarya gerilim ölçümü doğrudan NI 9206 veri toplama kartıyla yapılmaktayken, sıcaklık ölçümü K-tipi termokupl üzerindeki gerilime göre sıcaklık değerini veren NI 9213 yapılmıştır. Batarya akım ölçümü ise, tam skala akım değeri 60mV'a karşılık gelen şönt direnç üzerinde ölçülen gerilim düşümünün akım karşılığı hesaplanarak yapılmıştır. Test-ölçüm düzeneğinin blok şeması ve kurulmuş hali Şekil 3.1'de ve Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Kurulan test düzeneğinin blok şeması.

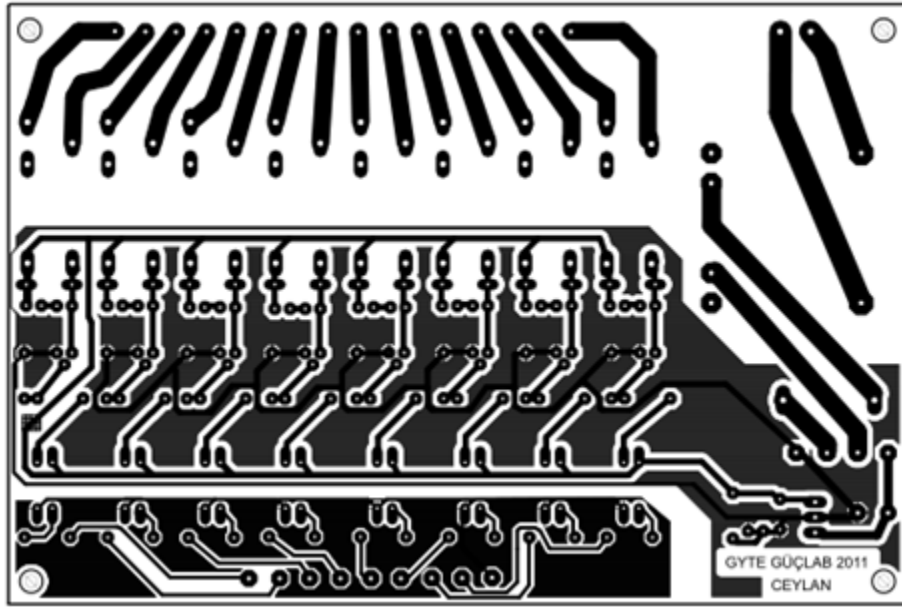


Şekil 3.2: Test düzeneği.

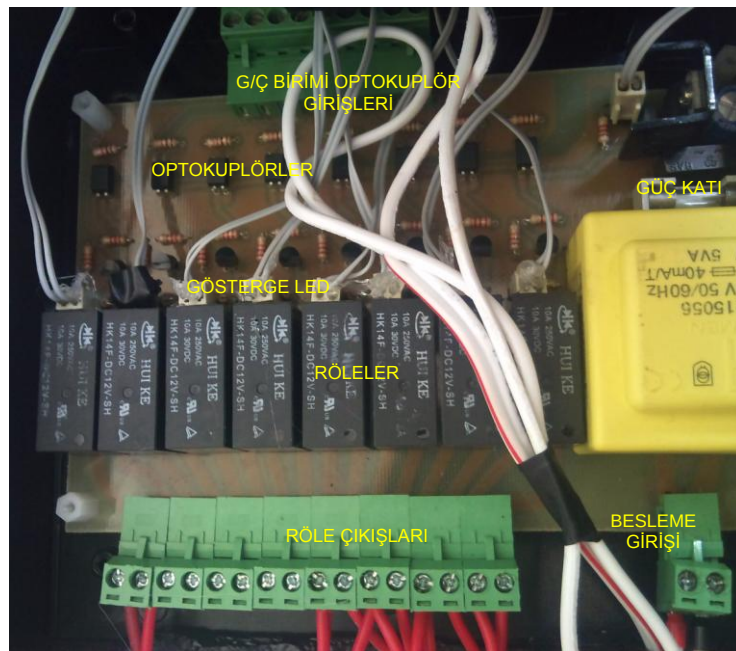
Sistem çok uzun süreye ihtiyaç duyulan yaşlandırma testlerini hızlandırabilmek amacıyla, bataryalardan birisi şarj edilirken diğerinin deşarj edilmesi temeline dayanmaktadır. Şarj-deşarj akımı transistör tipi anahtarlama elemanlarıyla kontrol edilemeyecek kadar büyüktür. Bu nedenlerle anahtarlama için yüksek akımları iletebilen kontaktörler tercih edilmiştir. Sistemde her bir batarya için bir adet kaynağa ve bir adet yüke bağlı olmak üzere toplam dört adet kontaktör

[illegible]

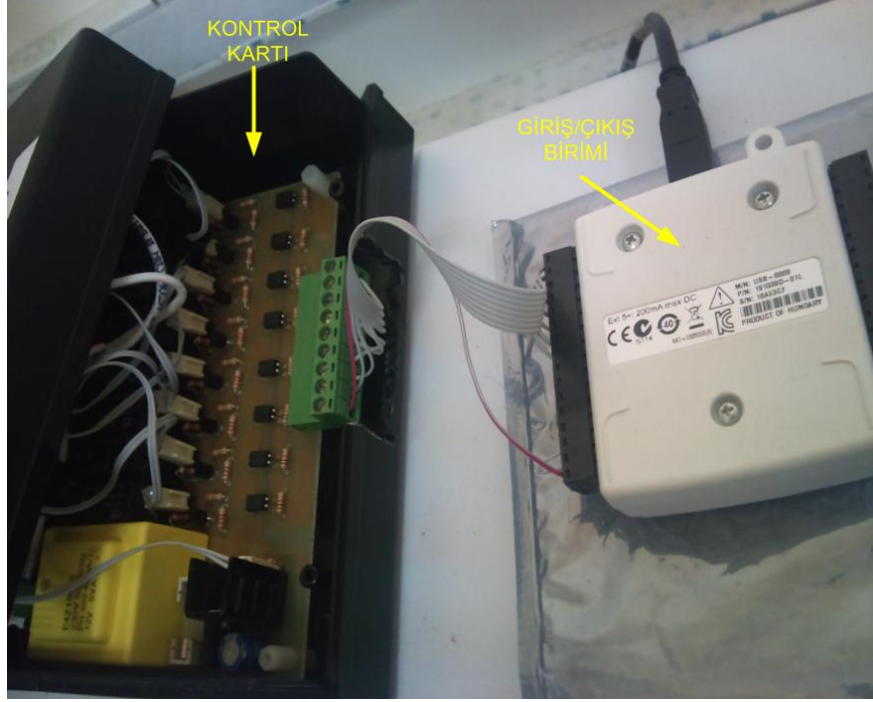
13



Şekil 3.4: Kontrol kartı baskı devre çizimi.

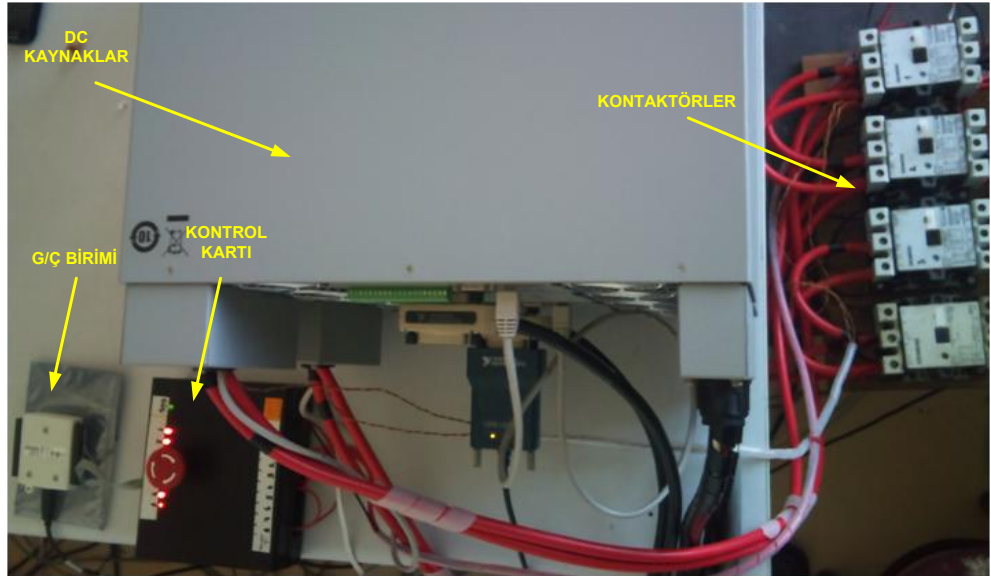


Şekil 3.5: Testler için tasarlanan kontrol kartının iç yapısı.



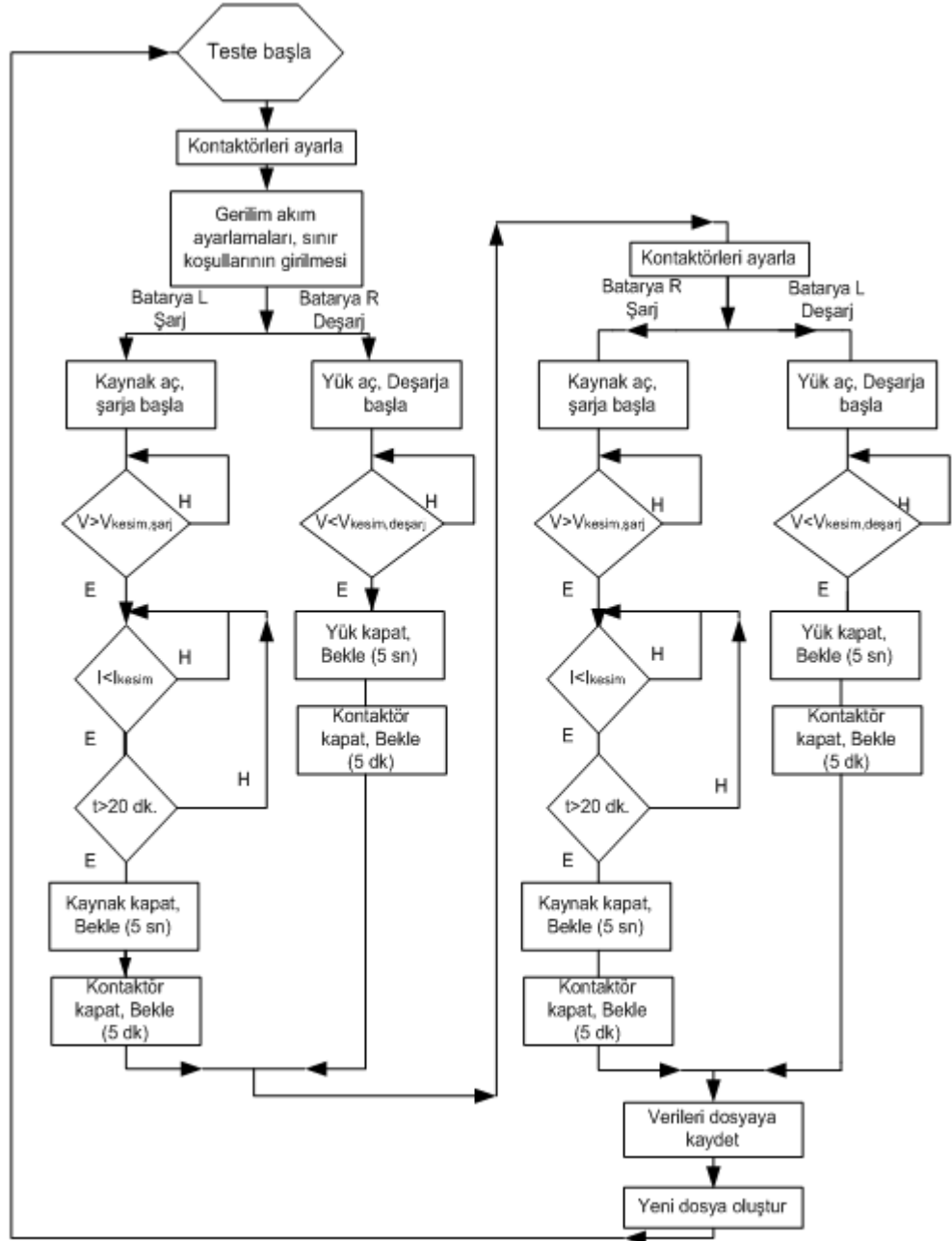
Şekil 3.6: Kontrol kartı ve giriş-çıkış birimi bağlantıları.

Şekil 3.7' de giriş-çıkış birimi, kontrol kartı ve kontaktörlerin bağlantıları görülmektedir. Bu yapıda yazılım tarafından giriş-çıkış birimi üzerinden iletilen sinyal ile kontrol kartı yardımıyla kontaktörler açılıp kapanarak kaynak gerilimi bataryalara iletilmekte ve şarj işlemi gerçekleştirilmekte, veya yük cihazının bataryalarla bağlantısı sağlanarak deşarj işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.7: Giriş-çıkış birimi, kontrol kartı ve kontaktörler.

Test sistemi bir Labview yazılımı ile çalışmaktadır. Yazılımın algoritmasına ait akış şeması Şekil 3.8’de görülmektedir. Sistem çalışmaya başlamadan önce şarj ve deşarj edilecek bataryalar belirlenerek kontaktörler ile ayrılır. Kaynak şarj olacak batarya için, yük ise deşarj olacak batarya için yazılım tarafından çalıştırılır. Bu işlem sona erdiğinde kontaklar yeniden şarj ve deşarj edilecek bataryaları kaynak ve yük bağlantısını sağlar ve bu adımlar aynı sırayla tekrarlanır.



Şekil 3.8: Testlerde kullanılan yazılıma ait algoritma.

Sürecin başlangıcında bazı parametrelerin kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir, daha sonra program istenilen çevrim sayısı kadar, herhangi bir acil durum veya hata ile karşılaşmadığı sürece kesintisiz olarak çalışmaya devam eder. Tercih edilen test profiline göre en başta girilmesi gereken parametreler şunlardır:

- bataryalar için maksimum şarj gerilimi
- maksimum şarj akımı
- şarj süresindeki kesim akımı
- şarjın sonlanması için gereken akımın değeri
- batarya akımının şarjın sonlanma değerinde sabitlenmesi için gereken süre
- deşarj esnasında çekilecek maksimum yük akımı
- deşarj süresindeki kesim gerilimi

Labview yazılımıyla hazırlanan arayüz Şekil 3.9'da görülmektedir. Arayüzde kullanıcı tarafından girilecek parametrelere ait girdiler, şarj olan ve deşarj olan her iki bataryaya ait akım ve gerilim değişimlerini yansıtan göstergeler, sıcaklık göstergeleri ve aşırı sıcaklık durumunda aktif alarm göstergeleri bulunmaktadır

Testlerde özellikle dikkat edilen husus şudur. Kaynak veya yük kapatıldıktan sonra kontaktörlerin anahtarlama hızları düşük olduğu için, kısa devreden kaynaklı olası problemlerin önüne geçebilmek için beş saniye beklenir ve ardından kontaktörler kapanır. Şarj süreci tamamlandıktan sonra deşarja başlamak için veya deşarj tamamlandıktan sonra şarja başlayabilmek için ise bataryaların kimyasal yapılarından dolayı meydana gelebilecek problemlerin önüne geçebilmek açısından 5 dakika beklenmektedir.



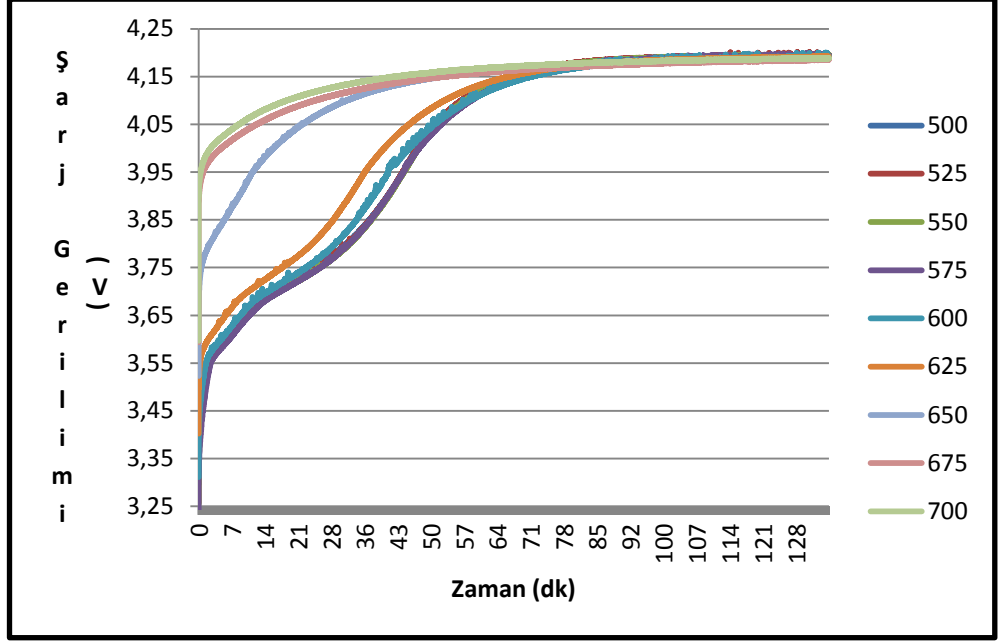
Şekil 3.9. Sabit Akım Altında Yaşlandırma Deneyleri

Testlerde maksimum şarj gerilimi 4.2 V, maksimum şarj akımı 11 A belirlenmiş, şarjın sonlanması için batarya akımının değerinin 1 A'ın altına düştüğü ve 0.05 A'lık bir bandın içerisinde sabit kalması gerekli görülmüştür. Deşarj için ise maksimum yük akımı 11 A, deşarjın sonlanması için gereken kesim gerilimi ise 2.7 V olarak belirlenmiştir.

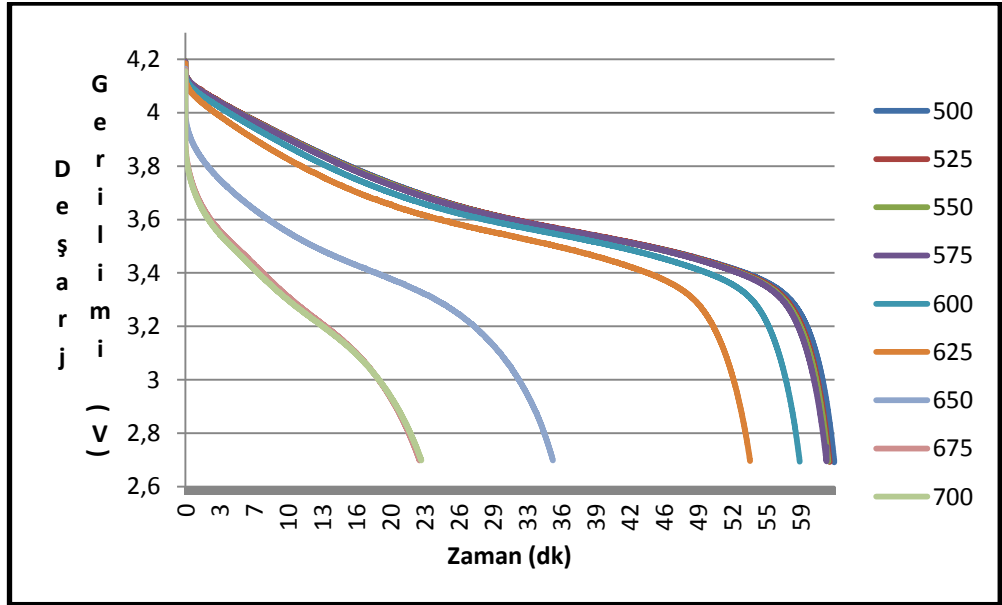
Yazılımın akışı kabaca şarj ve deşarj prosesi olarak ikiye ayrılabilir. Şarj prosesinde boş batarya, CC-CV (sabit akım-sabit gerilim) yöntemiyle şarj edilir. Bu yöntemde batarya gerilimi belirli bir seviyeye kadar sabit akım altında artar. Gerilim belirli seviyeye ulaştıktan sonra ise gerilim sabit tutulur ve akım kademeli olarak azaltılarak şarj işlemine bir süre daha devam edilir. Akımın belirli bir limitin altında, belirli bir bandın içerisinde belirli bir süre kalması durumunda şarj sonlandırılır. Testlerde önce batarya 4.2 V'a kadar şarj edilmektedir. Batarya gerilimi 4.2 V değerine ulaştıktan sonra batarya akımı yazılım yardımıyla kaynak tarafından azaltılmaya başlanır. Kurulan algoritmaya göre şarj sürecinin sonlandırılması için batarya akımının 1 A'ın altına düştüğü andan itibaren 20 dakika boyunca 0.05 A'lık bir bandın içinde kalması gerekmektedir.

Deşarj prosesinde ise CC (sabit akım) yöntemi kullanılır. Bu yöntemde bataryadan, batarya gerilimi belirli bir sınırın altına inene kadar DC yük kullanılarak sabit akım çekilir. Yapılan deneyde batarya gerilimi 2.7 V değerine düşene kadar 11 A'lık (1 C) akım çekilmektedir.

Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de yaşlandırma test sonuçlarına ait örnekler verilmiştir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de farklı çevrimler arasında periyodik olarak alınmış şarj ve deşarj gerilimi eğrileri görülmektedir.

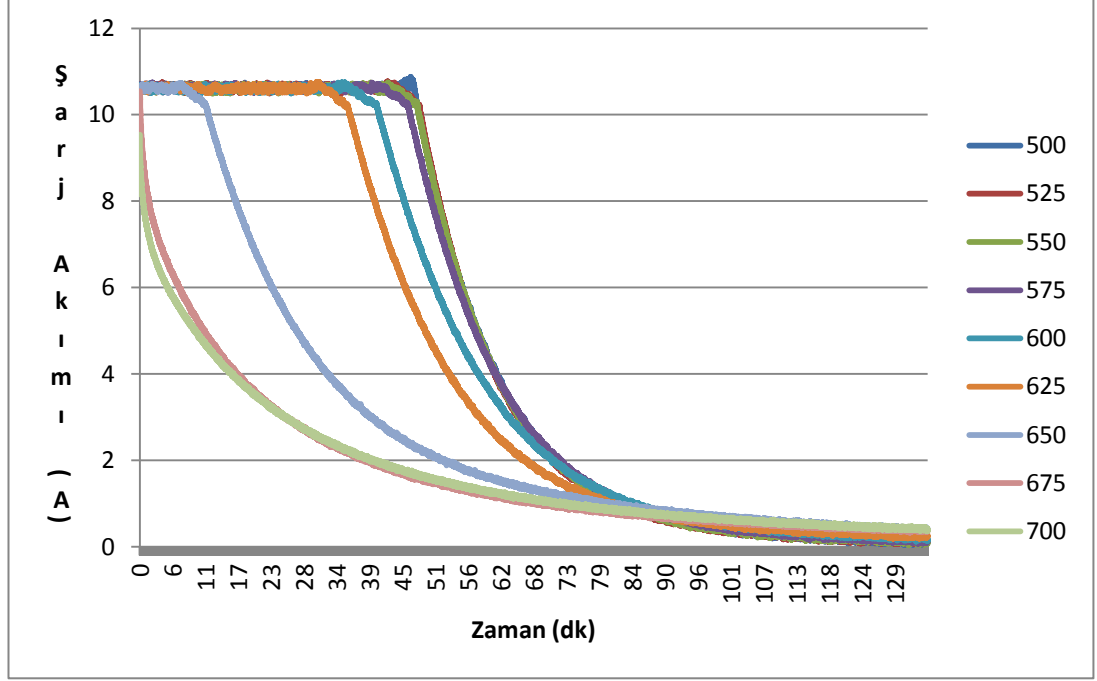


Şekil 3.10: 300-700 çevrim arasında yaşlanmış bataryanın şarj gerilimleri.



Şekil 3.11: 300-700 çevrim arasında yaşlanmış bataryanın deşarj gerilimleri.

Şekil 3.12'de ise bataryayı şarj ederken uygulanan akımın yaşlanmaya bağlı olarak değişimi görülmektedir.



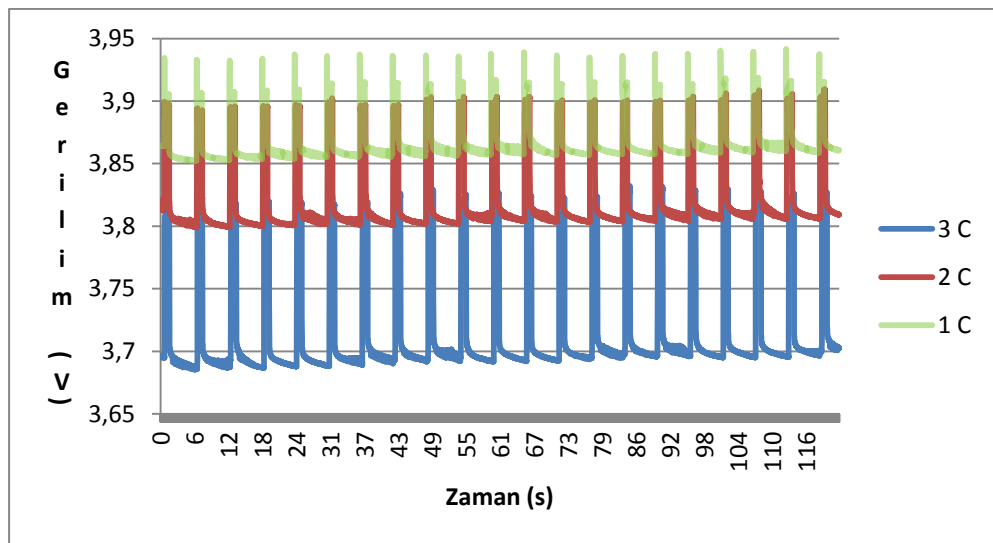
Şekil 3.12: 300-700 çevrim arasında yaşlandırılmış bataryanın şarj akımları.

### 3.3. Değişken Akım Deneyleri

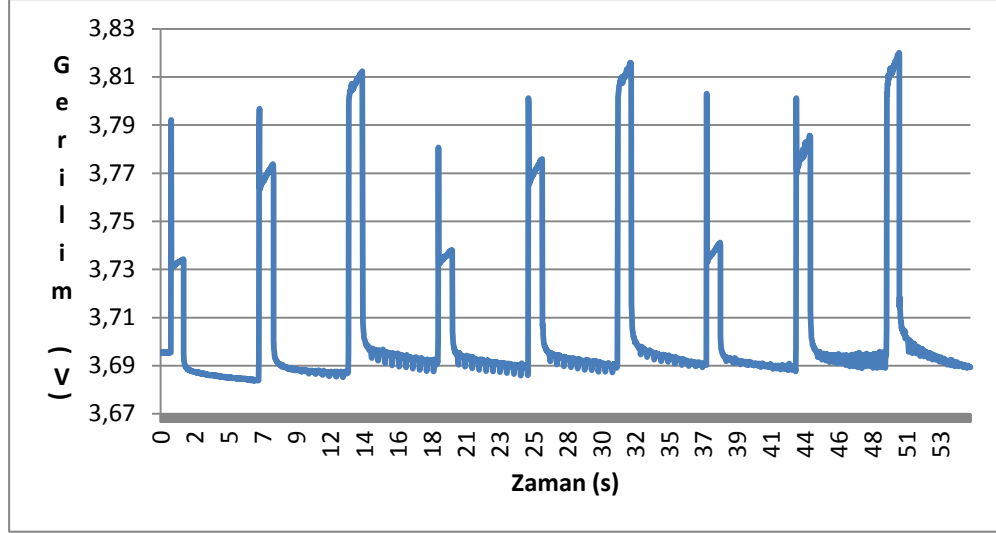
Elektrikli araçların kullanımı sırasında bataryalardan yalnızca sabit akım çekilmesi öngörülemez. Bu nedenle bataryaya hem ani akım ihtiyacı durumlarını test eden akım darbeleri hem de ECE15 standardında sürüş çevrimleri uygulanmıştır.

Araç kullanımı sırasında ani güç değişimlerinin bataryaya etkisinin benzetimi amacıyla yapılan darbe testleri sonucunda yaşlanan bataryanın verdiği tepkiler değerlendirilerek yaşlanmanın batarya karakteristiği üzerindeki etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Darbe testleri aynı test düzeneğinde yine Labview programı kullanılarak geliştirilmiş farklı bir yazılım yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yazılımın algoritması genel olarak bataryaya 1 saniye şarj ve deşarj uygulanması ardından bataryanın belirli bir süre boşa bekletilmesi şeklindedir.

Darbe testleri 3 farklı prosedürde uygulanmıştır. Bunlar şarj darbe testleri, deşarj darbe testleri ve şarj-deşarj darbe testleridir. Şarj darbe testleri de iki farklı şekilde yapılmıştır. Bunların birincisi bataryaya sabit 1 C, 2 C ve 3 C'lik akım uygulayarak gerçekleştirilmekte olan sabit şarj darbe testidir. İkincisi ise artan akım şarj darbe testidir. Bu testte bataryaya 1 C'den 3 C'ye kademeli olarak artan akım uygulanmaktadır. Sabit şarj testleri 20 tekrar, artan şarj test 3 tekrar halinde yapılmıştır. Şekil 3.13'te sabit şarj testine ait gerilim grafikleri Şekil 3.14'te ise artan şarj testine ait gerilim grafiği verilmiştir.

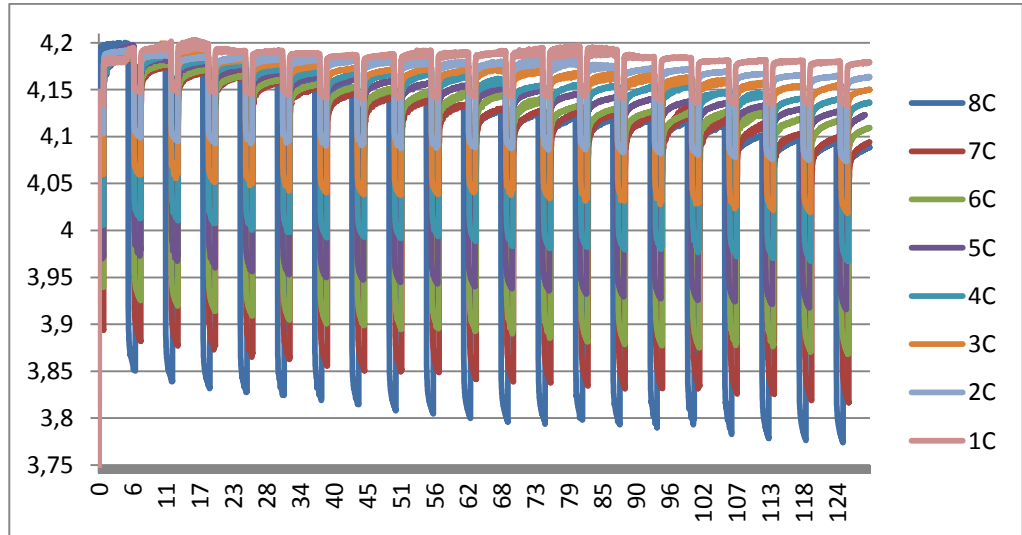


Şekil 3.13: Sabit şarj darbe testi sonuçları.

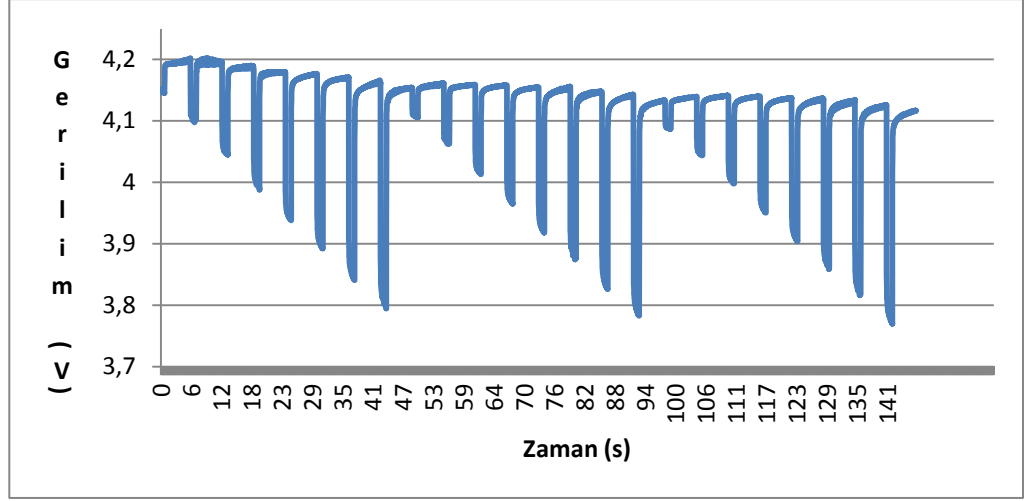


Şekil 3.14: Artan şarj darbe testi sonuçları.

Deşarj testleri de iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunların birincisi bataryadan sabit 1C, 2C, 3C, 4C, 5C, 6 C, 7 C ve 8 C'lik akım çekilerek gerçekleştirilmekte olan sabit deşarj darbe testidir. İkincisi ise artan deşarj testidir. Bu testte bataryadan kademeli olarak 1 C'den 8 C'ye kadar akım çekilmektedir. Sabit deşarj testleri 20 tekrar, artan deşarj testleri 3 tekrar halinde yapılmıştır. Şekil 3.15'ta sabit deşarj testine ait gerilim grafikleri 3.16'da ise artan deşarj darbe testine ait gerilim grafiği verilmiştir.

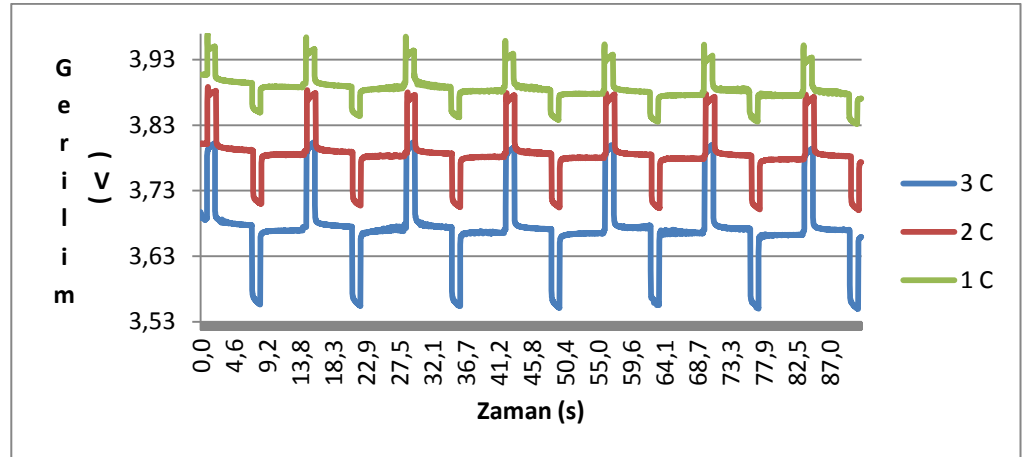


Şekil 3.15: Sabit deşarj darbe testi.



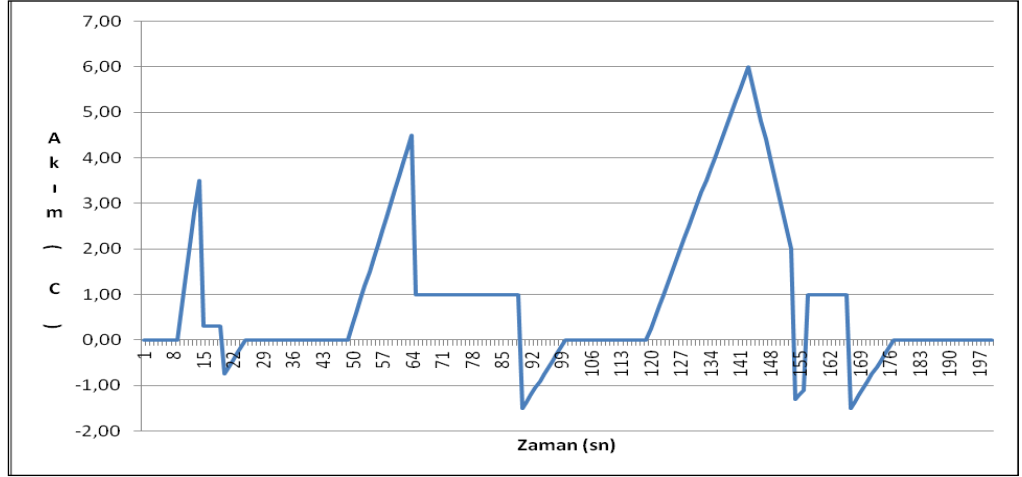
Şekil 3.16: Artan deşarj darbe testi sonuçları.

Uygulanan darbe testlerinin sonuncusu ise şarj-deşarj testleridir. Bu testlerde batarya 1 saniye şarj edilmekte, 5 saniye boşta bekletilmekte, ardından 1 saniye deşarj edilmekte ve tekrar boşta bekletilmektedir. Şarj-deşarj testleri 1 C, 2C ve 3C de tekrarlanmış ve elde edilen grafikler Şekil 3.17'de verilmiştir.



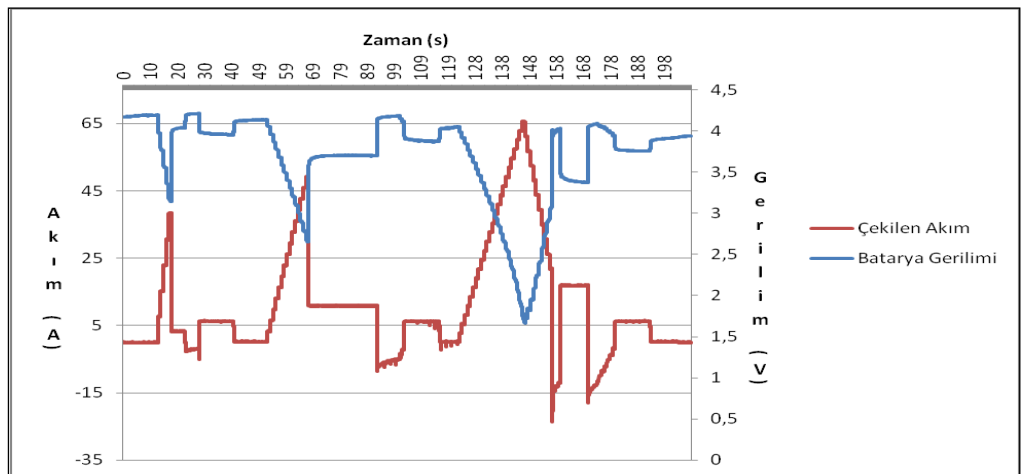
Şekil 3.17: Şarj-Deşarj darbe testi sonuçları.

Bataryalar ile gerçekleştirilen bir diğer önemli test ise ECE15 sürüş çevrimi testleridir. ECE15, sürüş sırasındaki yakıt tüketimi benzetimleri için oluşturulmuş, farklı akım değerleri içeren standart bir sürüş çevrimidir. Bu kapsamda öncelikle sürüş çevrimi matematiksel olarak modellenmiş ve fonksiyonel bir şekle getirilmiştir. ECE 15 sürüş çevriminin matematiksel modelinin çıkış grafiği Şekil 3.18'de görülmektedir.



Şekil 3.18: ECE 15 sürüş çevrimi (akım dönüşümü).

Şekil 3.19'da 700. çevrimdeki bataryanın ECE 15 sürüş çevrimi ile test edilmesi sonucu oluşan çıkışa dair grafik görülmektedir. Burada uygulanan yük akımına bağlı olarak bataryanın terminal gerilimindeki değişim açıkça görülebilmektedir.



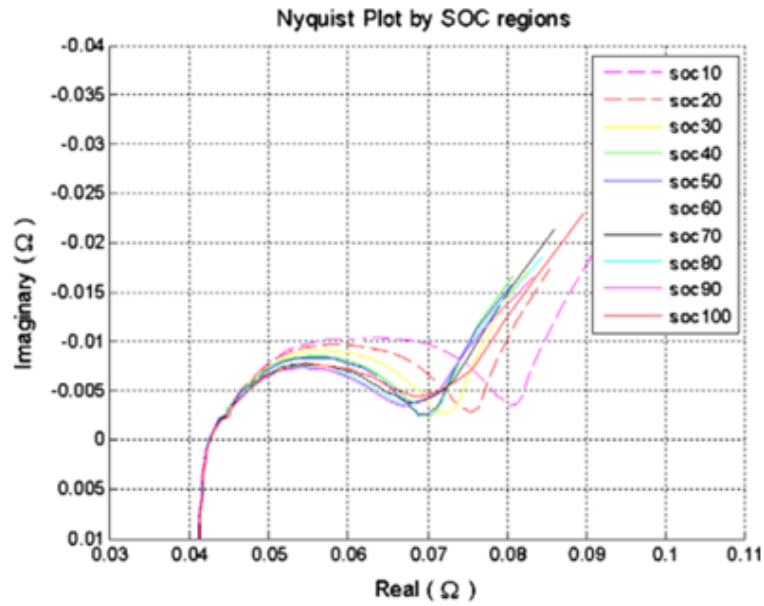
Şekil 3.19: ECE 15 akım profilinin 700 çevrimdeki bir bataryaya uygulanması.

## 4. MODEL PARAMETRELERİ

Bu bölümde tezin ana konusunu teşkil eden batarya modeli ve model için kullanılacak parametrelerin nasıl elde edildiği açıklanmıştır.

### 4.1. Model Parametrelerinin Elde Edilmesi

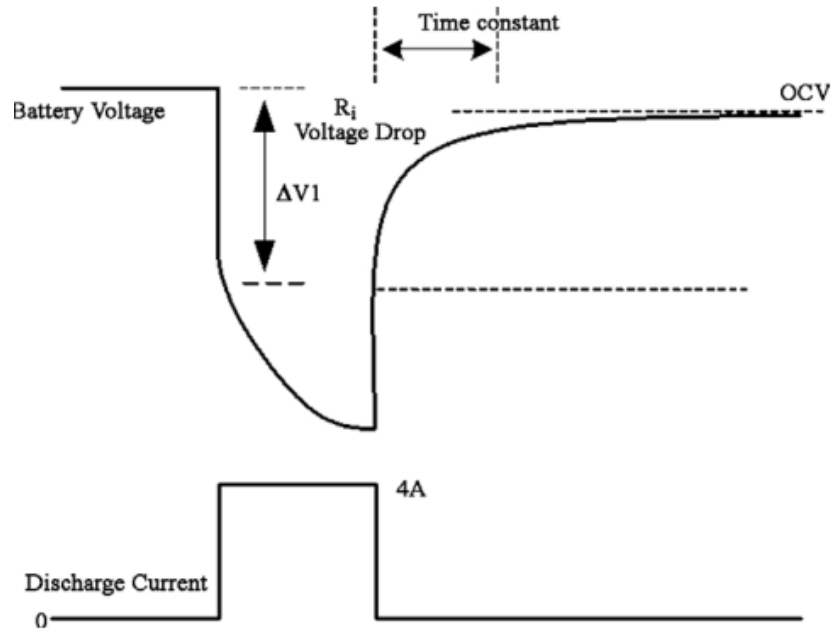
Bir çok araştırmacı batarya modelinin oluşturulması ve parametrelerin çıkartılması üzerinde çalışmıştır. Modelleme genel olarak zaman domeni ve frekans domeni yaklaşımı olarak ikiye ayrılır. Frekans domeninde elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri sonucunda elde edilen Nyquist eğrileri kullanılarak model oluşturulabilir. Şekil 4.1'de bu yöntem kullanılarak farklı şarj değerleri için ölçüm sonuçlarına ilişkin bir örnek verilmiştir [30].



Şekil 4.1: EIS ölçümüne bağlı Nyquist eğrileri.

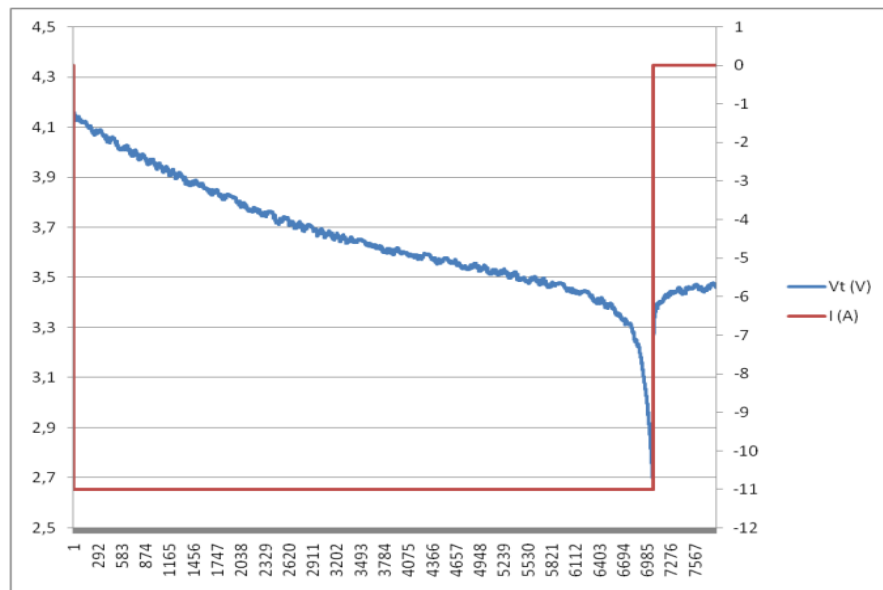
Bu yöntemi kullanabilmek için hassas ölçüm yapabilen ve düzgün olarak kalibre edilmiş EIS cihazına ihtiyaç vardır.

Diğer yandan zaman domeni yönteminde ise Şekil 4.2'de görüldüğü üzere bataryadan deneysel olarak alınan gerilim ve akım değerlerinden yararlanılır [30]. Yük devreye ilk girdiği anda oluşan gerilim düşümü ve yük devreden çıktıktan sonra batarya dengeye ulaşınca geçen süre kullanılarak parametreler belirlenebilir.



Şekil 4.2: Zaman domeninde ölçülen akım ve gerilim değerleri.

Seçilen elektriksel eşdeğer devre batarya modelinin oluşturulabilmesi için parametrenin belirlenebilmesi amacıyla zaman domeni yöntemi benimsenerek deneysel ölçümlerden toplanan gerilim ve akım değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla batarya ilk önce sabit akım-sabit voltaj (CC-CV) yöntemiyle tam olarak şarj edilmiştir. Daha sonra sabit anma akımı (11A) altında deşarj işlemi tamamlanmıştır. Bu işleme ait verilerle çizilen deşarj grafiği şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3: Bataryaya ait deşarj grafiği.

Yükün devreye ilk girdiği anda oluşan anlık gerilim düşümü  $R$  iç direncinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle  $R$  iç direnci yükün devreye girdiği anda oluşan gerilim düşümünün akıma oranıyla (2) eşitliğindeki gibi bulunabilir.

$$R = \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (4.1)$$

Burada  $V_0$ ,  $t_0$  anındaki pil tamamen dolu durumdayken ölçülen terminal gerilimini,  $V_1$ ,  $t_1$  anındaki, yük devreye girdikten hemen sonra yani gerilim düşümü gerçekleştiği ilk anda ölçülen gerilim,  $I$  ise çekilen sabit deşarj akımıdır. Bu değerin belirlenmesi için deneysel olarak elde edilen deşarj grafiğinden yararlanılabilmektedir.

$R_t$  ve  $C_t$  değerleri ise batarya dengeye ulaşınca kadar geçen süre göz önünde tutularak belirlenen bir zaman sabiti yardımıyla bulunabilir. Yük devreden çıktıktan sonra bataryanın dengeye ulaştığı sürecin modellenmesi ile  $R_t$  ve  $C_t$  değerleri, dolayısıyla elektrot ve elektrolit arasında oluşan difüzyon süreci ve yük transferi de modele eklenmiş olmaktadır.  $\tau$  zaman sabitinden faydalanarak  $R_t$  ve  $C_t$  şu eşitlikler kullanılarak elde edilebilir:

$$\tau = R_t C_t \quad (4.2)$$

$$R_t = \frac{V_{OC} - V_t'}{I} \quad (4.3)$$

Burada  $V_t'$  deşarj işlemi bittikten hemen sonra, kurtarma etkisi başlamadan önce ölçülen terminal gerilimidir.  $V_{OC}$  ise kurtarma etkisi geçip sistem dengeye ulaştıktan sonra ölçülen açık devre gerilimidir [22].

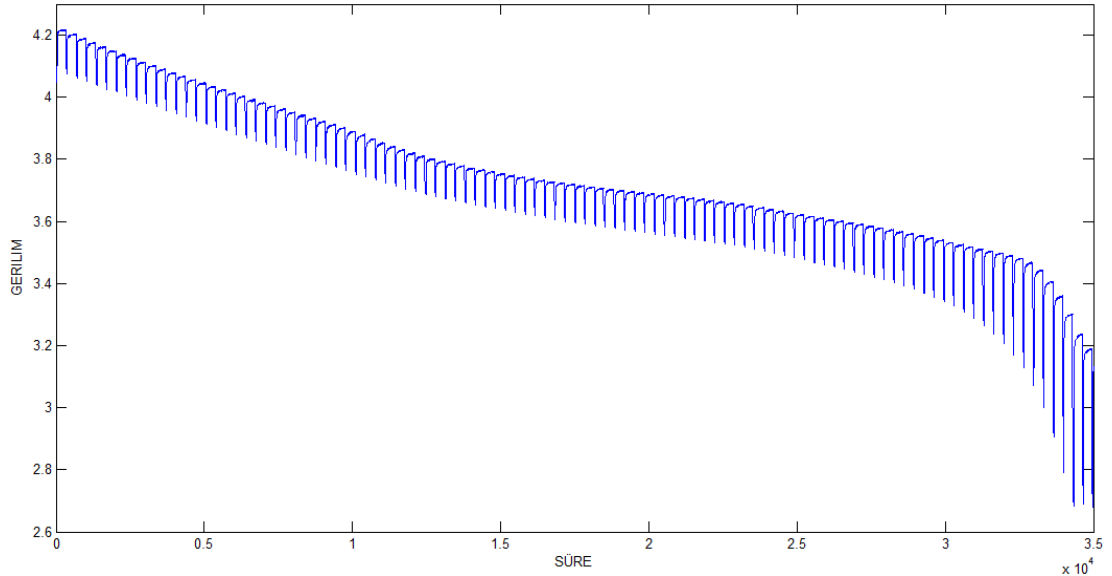
Parametreler (4.1), (4.2) ve (4.3) eşitlikleri ve Şekil 4.3'ten faydalanılarak  $R = 0.0033 \Omega$ ,  $R_t = 0.015 \Omega$  ve  $C_t = 555 F$  olarak belirlenmiştir.

Böylece elektriksel eşdeğer devre bileşenlerinin değerleri elde edilebilmiştir. Ancak modeldeki  $V_{OC}$ , batarya açık devre gerilimini temsil eden değişken gerilim kaynağının da belirlenmesi gerekmektedir.

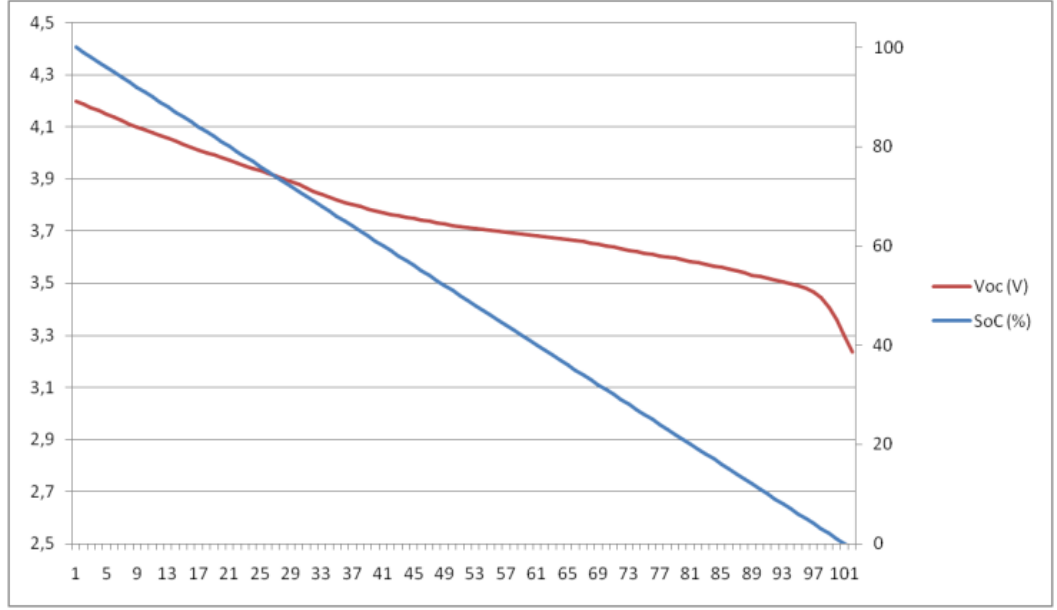
Li-İyon bataryalarda  $SoC-V_{OC}$  bağıntısı doğrusal değildir. Bu bağıntıyı daha sağlıklı olarak belirleyebilmek için pek çok araştırma yapılmaya devam etmektedir, genel olarak Kalman filtresi yaklaşımı ön plandadır.

Önerilen modelin en büyük özelliği ise, şarj durumuna bağlı olarak değişen açık devre gerilimini matematiksel olarak hesaplayan fonksiyonun benzetim sırasında eşdeğer devre modeliyle birlikte bir bütün olarak çalışmasıdır. Böylece batarya yük altında çalışırken bile sadece akım ve terminal gerilimi değerleri kullanılarak açık devre gerilimi hesaplanabilmekte ve şarj durumu  $SoC$  belirlenebilmektedir.

Bu amaç kapsamında  $SoC-V_{OC}$  bağıntısını elde edebilmek için zaman kontrollü adım deşarj testi gerçekleştirilmiştir. İlk önce sabit akım-sabit voltaj yöntemiyle tamamen şarj edilmiştir. Daha sonraki aşamada %1 kapasite kullanımına karşılık gelen 36 saniye boyunca sabit anma akımı (11A) değerinde darbe uygulanmış, ardından batarya gerilimi dengeye ulaşıncaya kadar beklenilerek  $V_{OC}$  değeri ölçülüp kaydedilmiştir. Bu işlem batarya tamamen deşarj olana kadar aynı sıra takip edilerek tekrarlanmıştır. Böylece her  $SoC$  adımına karşılık gelen bir  $V_{OC}$  değeri elde edilmiştir. Şekil 4.5'te yüzde birlik adımlar halindeki deney ölçüm sonucu, Şekil 4.6'da  $V_{OC} - SoC$  değerlerinin bu süreçteki değişimlerini gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 4.4:  $SoC-V_{OC}$  ölçümü.



Şekil 4.5:  $V_{OC}$ -SoC grafiği.

Buradan elde edilen ölçüm verileri üzerinde eğri uydurma algoritması kullanılarak  $V_{OC}$  tek değişkenli bir üstel fonksiyon şeklinde oluşturulmuştur. Bu şekilde elde edilen  $V_{OC}$  formülü ise şöyledir:

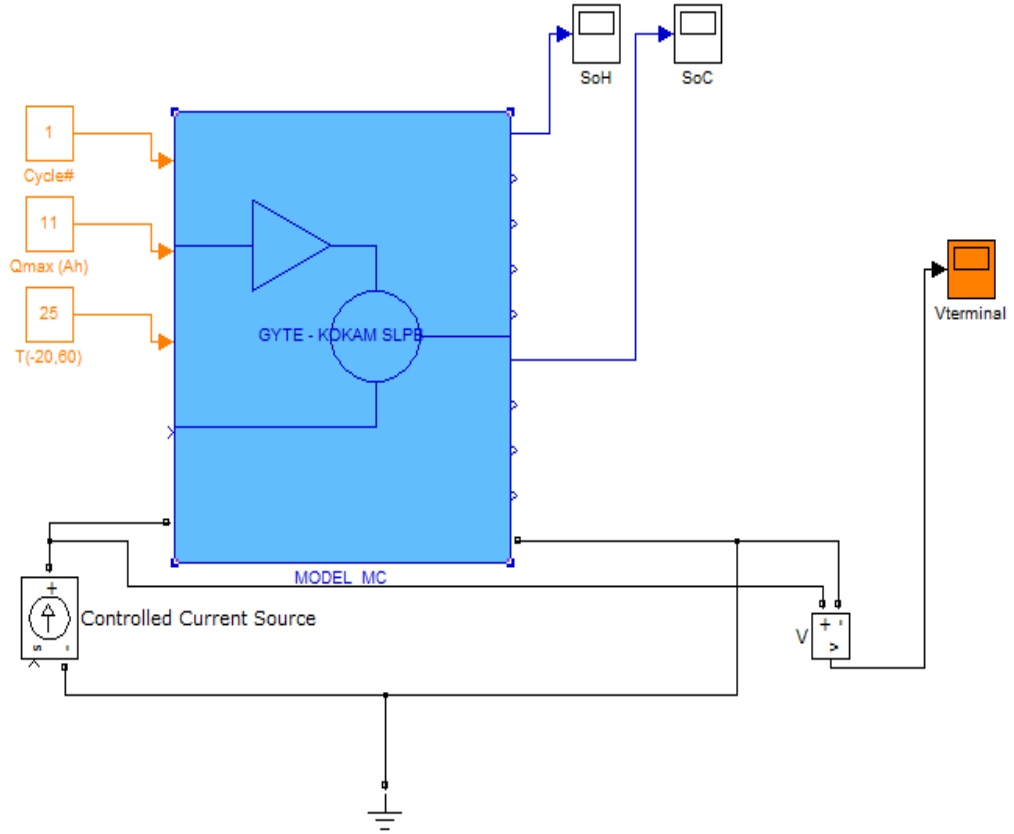
$$V_{OC}(SoC) = -1.035e^{(-35SoC)} + 0.315SoC^3 - 0.075SoC^2 + 0.495SoC + 3.575 \quad (4.4)$$

## 5. BENZETİM (SİMÜLASYON)

Bu bölümde, oluşturulan modelin benzetimi için hazırlanan MATLAB/SimuLink modeli açıklanmakta ve benzetim sonuçları aktarılmaktadır.

### 5.1. MATLAB/Simulink Modeli

Son aşama olarak oluşturulan eşdeğer devre modelinin gerçek bataryadan elde edilen sonuçlarla ne kadar örtüştüğünü belirlemek için Simulink ortamında benzetim gerçekleştirilmiştir. Simulink ortamında hazırlanan model Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

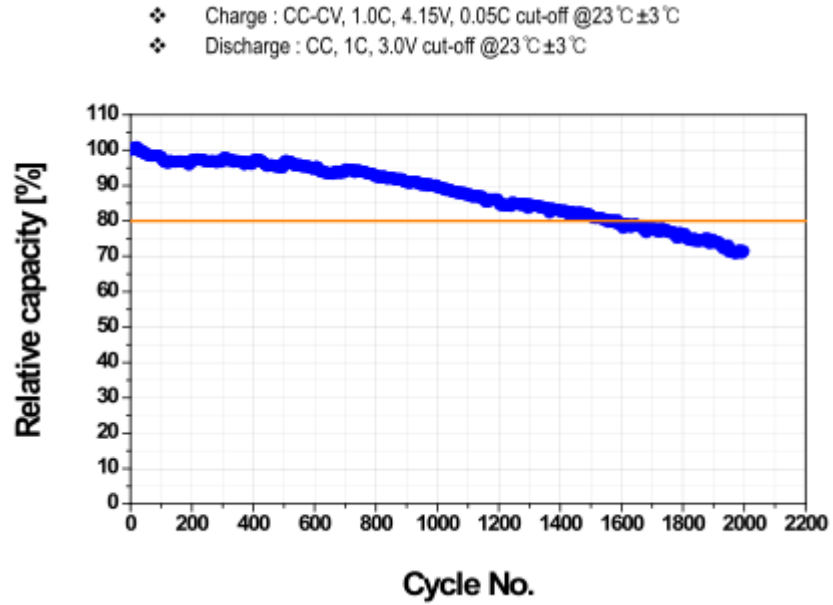


Şekil 5.1: Benzetim için kurulan sistem.

Bu simülatöre kullanıcı tarafından nominal kapasite, çevrim sayısı ve ortam sıcaklığı bilgileri girilerek farklı bataryaların farklı çalışma koşullarındaki benzetimi sağlanabilmektedir.

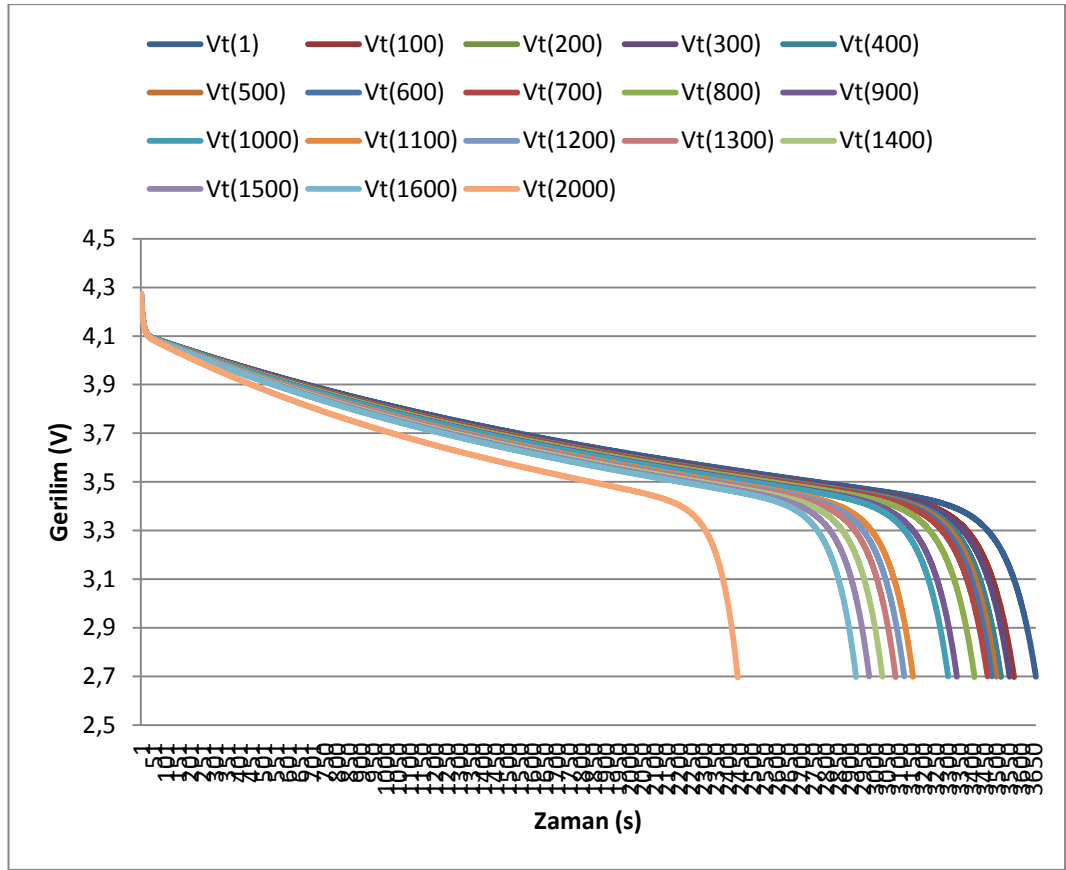
İlk aşamada SoH fonksiyonu kullanıcı tarafından girilen sıcaklık ve çevrim sayısından yararlanarak kullanılabilecek kapasiteyi belirler. Sağlık durumu SoH belirlenmesi başlı başına çok karmaşık bir araştırma konusudur ve aslında bu tezin

kapsamı dışında tutulmuştur. Çünkü sağlık durumu sadece çevrim sayısına bağlı bir fonksiyon olmaktan ziyade bataryanın iç dinamikleri, ortam sıcaklığı gibi farklı parametrelere de bağlıdır. Bunun yanında kapasitenin belirlenmesi için uygulanan testte kullanılan parametreler de önemlidir. Örneğin her çevrimdeki kapasite testi Peukert kanunu gereği aynı sabit akım değerinde ve 1 C'de yapılmaktadır. Çünkü anma akımının dışındaki yüklenmelerde kapasite olması gereken değerden düşük veya yüksek çıkmaktadır [1,2,3]. Bu nedenle mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için hem ölçüm sonuçları hem de üretici tarafından sağlanan katalog [22] grafikleri kullanılarak sıcaklığa ve çevrim sayısına bağlı bir SoH değeri elde edilmesi yöntemi benimsenmiştir. Bu grafikten elde edilen veriler bir tabloya kaydedilmiş ve doğrusal interpolasyon yöntemiyle herhangi bir çevrim sayısındaki bataryaya ait SoH değeri elde edilebilmiştir.



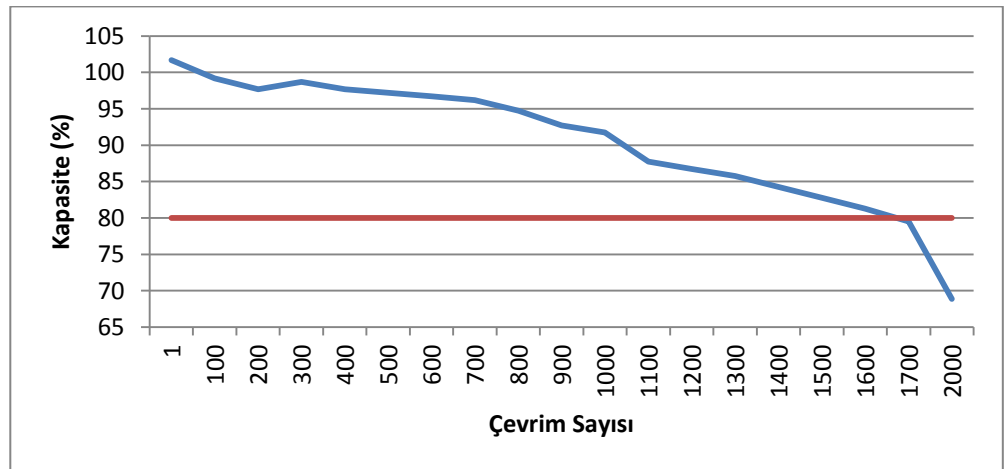
Şekil 5.2: Katalog verilerine göre fabrikada yapılan yaşlandırma test sonucu.

Batarya kataloglarındaki SoH tabloları yeterince net değildir. Bu nedenle geliştirilmiş olan simülatörle KOKAM SLPB bataryaların farklı SoH düzeylerindeki benzetimleri yapılmış ve bir SoH-Kapasite değişim grafiği elde edilmiştir. Bu benzetimler 25 °C sıcaklıkta ve bataryaların % 100 doluluk oranına sahip olduğu varsayılan durumlar için yapılmıştır. Sabit 1 C'lik (11 A) akım çekildiği durumda batarya gerilimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.3'teki gibidir.



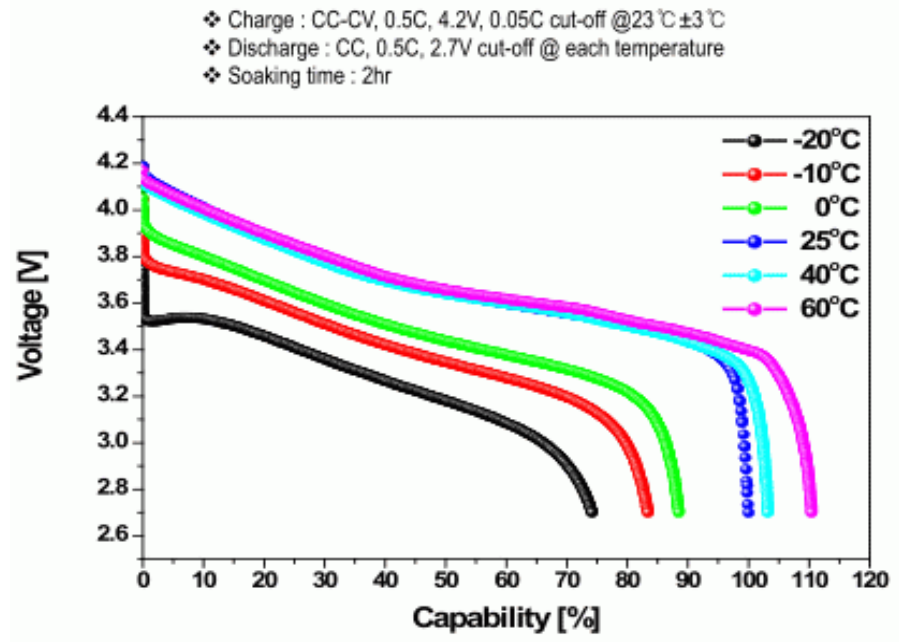
Şekil 5.3: Farklı çevrim sayılarındaki bataryaların gerilimlerinin zamana göre değişimi.

Şekil 5.4'te ise batarya kapasitesinin çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.4: Batarya kapasitesinin çevrim sayısına göre değişimi.

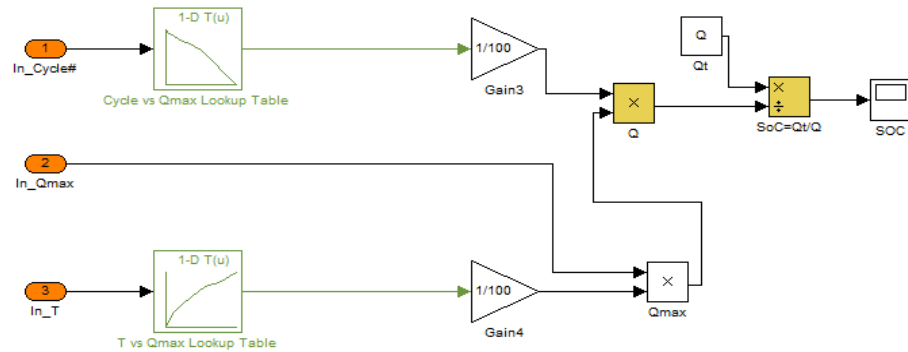
Buna ek olarak hem ölçüm değerleri hem de katalog verileri kullanılarak sıcaklığa bağlı kapasite değişimi de modele eklenmiştir. Böylece bataryanın farklı ortam sıcaklıklarındaki davranışı benzetim kapsamına alınabilmektedir.



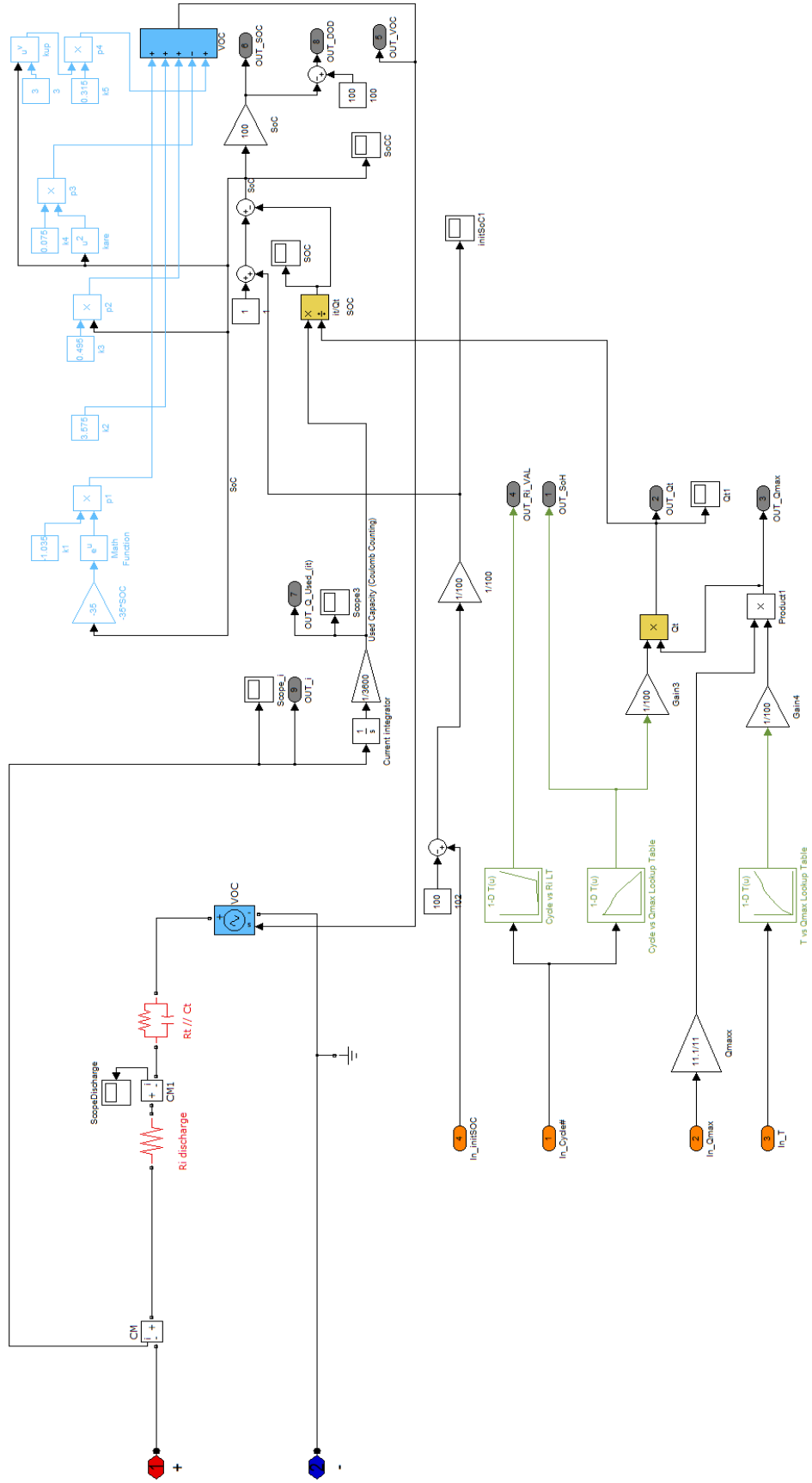
Şekil 5.5: Sıcaklığa bağlı kapasite değişimi.

SoC bloğu bu bilgileri ve çekilen akımı kullanarak bataryanın şarj durumunu, yani SoC yüzdesini belirler. Son olarak ise (4.4) eşitliğini içeren  $V_{OC}$  fonksiyonu kullanılarak azalan SoC değerine bağlı  $V_{OC}$  değerleri üretilmiş ve böylece modeldeki bağımlı gerilim kaynağının kontrol edilmesi sağlanarak batarya modeli tamamlanmıştır.

SoH ve SoC blokları ile detaylı model blok yapısı Şekil 5.6 ve 5.7'te verilmiştir.



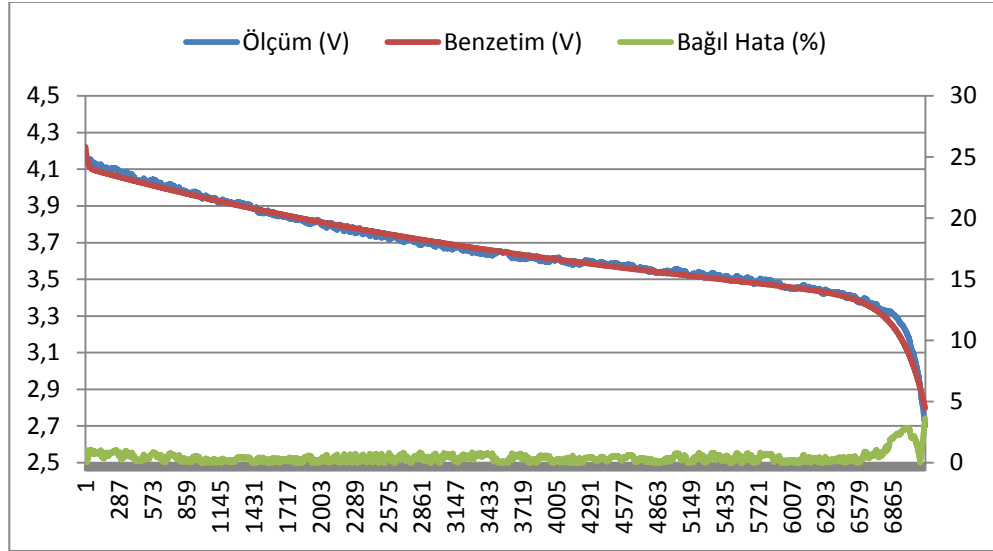
Şekil 5.6: SOH ve SOC blokları.



Şekil 5.7: Model blok ayrıntılı iç yapı.

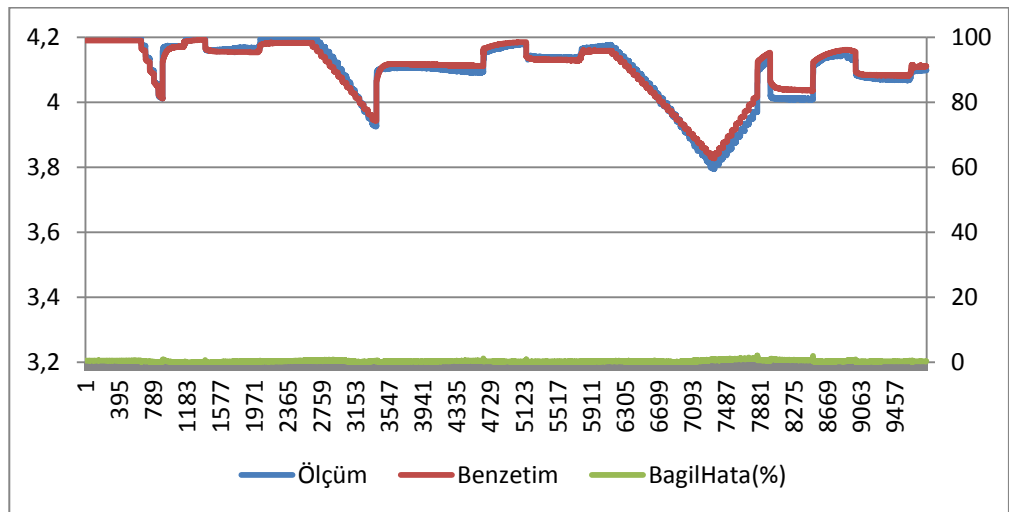
## 5.2. Benzetim Sonucu ve Karşılaştırmalar

Oluşturulan model farklı çalışma koşullarında denenmiş ve benzetim çıktıları gerçek ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sabit 1C'lik anma akımı (11A) altında elde edilen  $V_t$  terminal gerilimi ölçüm ve benzetim sonuç grafikleri Şekil 5.8 teki gibidir.



Şekil 5.8: Sabit akım benzetim sonucu.

ECE15 sürüş çevrimi, 100 çevrim yaşlandırılmış bir pile uygulandıktan sonra elde edilen  $V_t$  ölçüm değerleri ve benzetim sonuç grafikleri Şekil 5.9'daki gibidir.



Şekil 5.9: ECE 15 benzetim sonucu.

Karşılaştırma sonucunda görüldüğü üzere benzetim çıktıları ve deney sonuçları birbiriyle örtüşmüştür.

Sabit akım altında ortalama hata %0.422 seviyesinde kalırken, görülen maksimum hata % 3 düzeyindedir.

Değişken akım altında maksimum %6, ortalama %0.7 düzeyinde hata oluşmuştur.

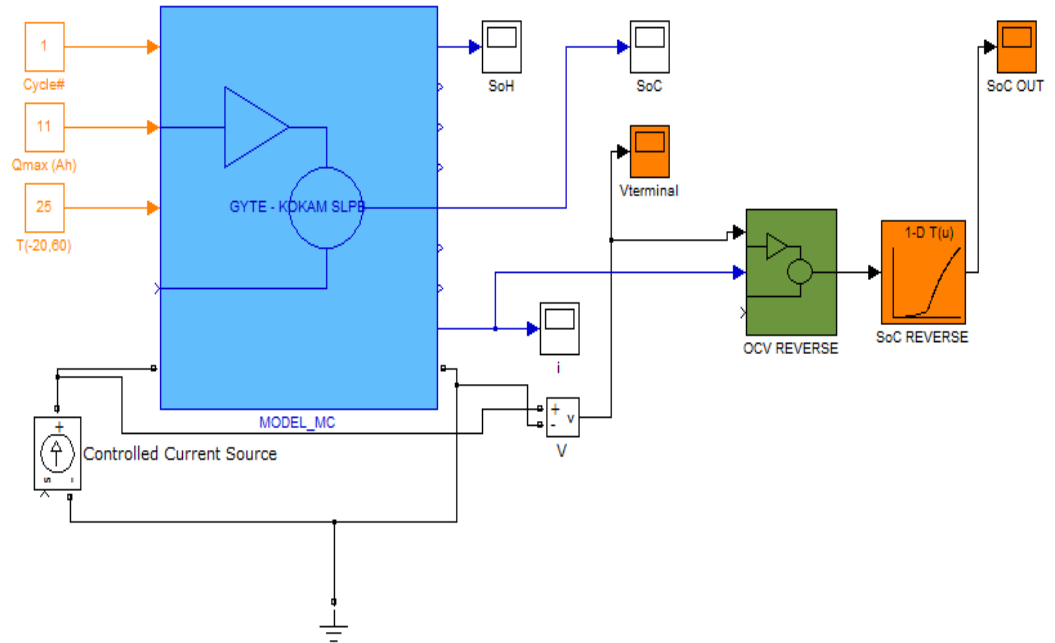
## 6. ŞARJ DURUMU (SOC) BELİRLENMESİ

Son bölümde oluşturulan model ve eşdeğer devre denklemi yardımıyla,  $V_t$  terminal gerilimi ve akım ölçümü kullanılarak yük altında çalışan sistemdeki  $V_{OC}$  açık devre geriliminin elde edilmesi ve bataryaya ait SoC şarj durumu belirlenmesi anlatılmıştır.

### 6.1. MATLAB/Simulink Modeli

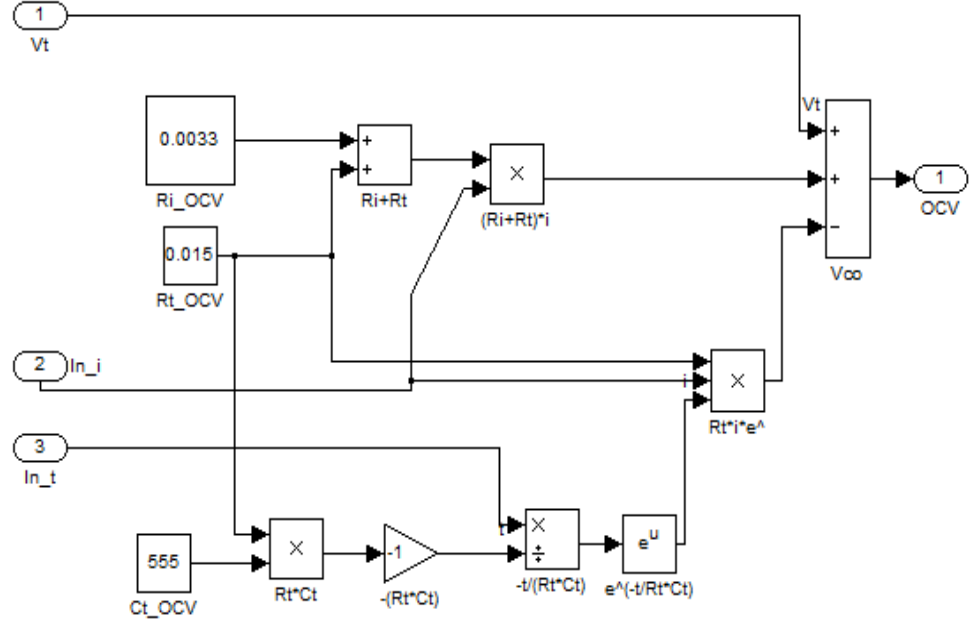
Batarya model parametreleri, (5.1) ve eşdeğer devre denklemi (3.3) yardımıyla, yük altındaki çalışan sistemde ölçülen  $V_t$  terminal gerilimi ve akım değerleri kullanılarak hesap yapılabilir ve  $V_{OC}$  açık devre gerilimi bu yöntemle geri dönülerek hesaplanabilir.

Bu amaçla daha önceki adımda hazırlanan modele ek olarak yeni bir blok eklenmiştir. Bu blok sayesinde  $V_{OC}$  için geri dönüş hesaplaması mümkün olmaktadır.



Şekil 6.1: SoC belirlenmesi.

Geri dönüş hesaplamaları için kullanılan blok yapısı Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu blok (2.3) eşitliğini kullanarak çıkış olarak  $V_{OC}$  açık devre gerilimini hesaplamaktadır.



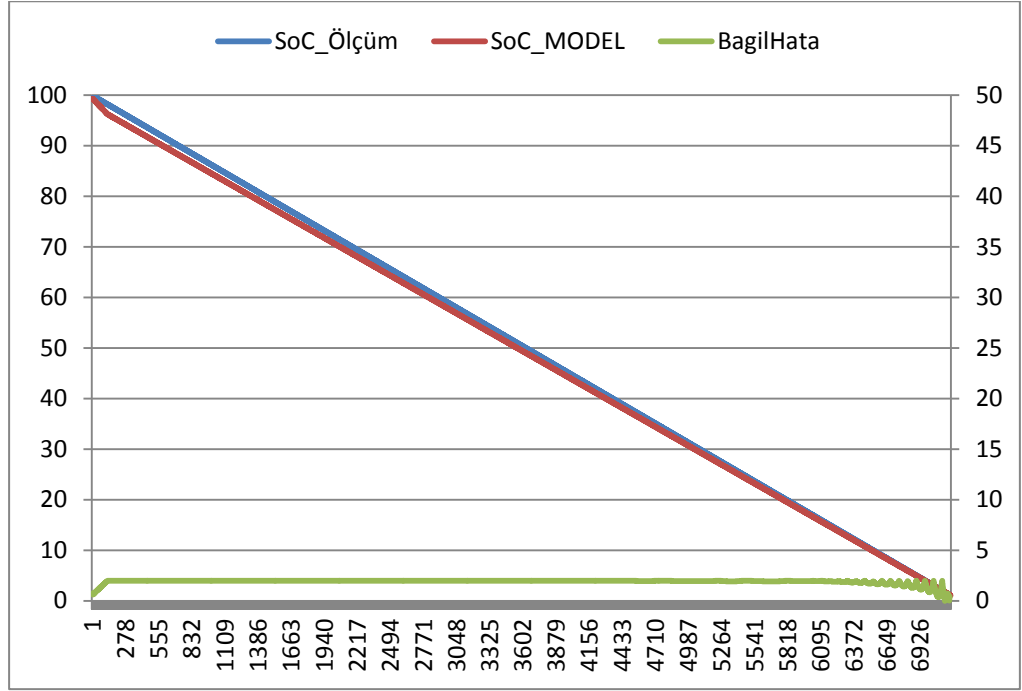
Şekil 6.2:  $V_{OC}$  hesaplama.

İkinci adımda ise "Batarya Parametrelerinin Belirlenmesi" başlığı altında açıklanan yöntemle elde edilen, daha önce ölçülüp tabloya kaydedilen  $V_{OC}$  açık devre gerilimi değerlerinden yararlanılmıştır. Tabloya kayıtlı olan  $V_{OC}$  açık devre gerilimi değerlerine karşılık gelen SoC şarj durumu değerleri doğrusal interpolasyon yöntemiyle belirlenmiştir.

Bu sayede hem simülasyon ortamında, hem de gerçek çalışma koşulları altında, sistemin çalışması sırasında batarya yüke bağlı iken, herhangi bir andaki  $V_{OC}$  açık devre gerilimi ve buna bağlı SoC şarj durumu belirlenebilmektedir.

## 6.2. Benzetim Sonucu ve Karşılaştırmalar

Bir önceki adımdaki yapı kullanılarak sabit anma akımı (11A) altında tam deşarj simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen SoC şarj durumu değerleri ve gerçek SoC şarj durumu değerleri kullanılarak çizilen grafik Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3: SoC karşılaştırma.

Grafikten de görülebileceği üzere, oluşturulan devre modeli SoC şarj durumu belirlenmesinde de isabetli sonuçlar verebilmektedir.

Ortalama hata %1.9 , en büyük hata ise %2 seviyesinde kalmaktadır.

## 7. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Elektrikli araçlar geleceğin ulaşım araçları olarak görülmektedirler ancak bataryalardan kaynaklı bazı kısıtlamalar bu alandaki teknolojik gelişimin hızını yavaşlatmaktadır.

Elektrikli araç çalışmalarında benzetim çok önemli olduğu gibi benzetimlerde kullanılmak üzere bataryaların isabetli olarak modellenmesi de oldukça önemlidir.

Bu çalışmada literatürde var olan batarya modelleri incelenmiş, elektrikli bir aracın güç katı ve motor sürücü benzetimlerinde kullanılabilecek, ortam sıcaklığı ve bataryanın çevrim ömrüne bağlı olarak sağlık durumunu (SoH) hesaba katan, ayrıca bataryanın herhangi bir andaki şarj durumunu (SoC) belirleyebilen bir batarya modeli geliştirilmiştir. Bu modelin MATLAB/SimuLink programı yardımıyla farklı çalışma koşulları altında benzetimi yapılmıştır. Eş zamanlı olarak gerçek bataryalarla da bir grup deney yapılmış, benzetim çıktıları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Benzetim çıktıları ve deney sonuçları birbiriyle örtüşmüştür. Sabit akım altında ortalama hata %0.422 seviyesinde kalırken görülen maksimum hata %3 düzeyindedir. Değişken akım altında maksimum %6, ortalama %0.7 düzeyinde hata oluşmuştur. Şarj durumu SoC belirlenmesinde ise ortalama hata %1.9 , en büyük hata ise %2 seviyesinde kalmaktadır. Modelin gerçek uygulamalarda oldukça tutarlı sonuç verebileceği kanıtlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda hata oranının daha da azaltılması amacıyla modelin geliştirilmesi için uğraşılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Peukert W., (1897), "Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren", Elektrotechnische Zeitschrift, 20, 20-21.
- [2] Doerffel D., Sharkh S. A., (2006), "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries", Journal of Power Sources, 155, 395-400.
- [3] Jongerden M., Haverkort B., (2008) "Battery Modeling", UT Publications.
- [4] Rao R., Vrudhula S., Rakhmatov D. N., (2003), "Battery modeling for energy aware system design", Computer, 36, 77-87.
- [5] Rakhmatov D., (2009), "Battery voltage modeling for portable systems", ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems , 14, 29.
- [6] Doyle M., Fuller T. F., Newman J., (1993), "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell", Journal of the Electrochemical Society, 140, 1526-1533.
- [7] Newman J., (1999), "FORTRAN programs for simulation of electrochemical systems, Dualfoil Program for Lithium Battery Simulation".
- [8] Rakhmatov D., Vrudhula S., Wallach D. A., (2003), "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer", IEEE Transactions on VLSI Systems, 11, 1019-1030.
- [9] Krintz C., Wen Y., Wolski R., (2004), "Application-level prediction of battery dissipation", International Symposium on Low Power Electronics and Design, 224-229, Newport, CA, USA, 9-11 August.
- [10] Rao V., Singhal G., Kumar A., Navet N., (2005), "Battery model for embedded systems", International Conference in VLSI Design, 105-110, Taj Bengal, India, 3-7 January.
- [11] Mi C., Li B., Buck D., Ota N., (2007), "Advanced electro-thermal modeling of lithium-ion battery system for hybrid electric vehicle applications", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 107-111, Arlington, TX, USA, 9-12 September.
- [12] Sen C., Kar N. C., (2009), "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 207-212, Dearborn, MI, USA, 7-11 September.

- [13] Verbrugge M. W., Conell R. S., (2002), "Electrochemical and thermal characterization of battery modules commensurate with electric vehicle integration", *Journal of the Electrochemical Society*, 149, 45-53.
- [14] Chen S., Tseng K., Choi S., (2009), "Modeling of lithium-ion battery for energy storage system simulation", *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1-4, Wuhan, China, 28-31 March.
- [15] Dubarry M., Liaw B. Y., (2007), "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries", *Journal of Power Sources*, 174, 856-860.
- [16] Rong P., Pedram M., (2006), "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries", *IEEE Transactions on VLSI Systems*, 14, 441-451.
- [17] Jongerden M. R., Haverkort B. R., (2009), "Which battery model to use?", *Software, IET*, 3, 6, 445-457.
- [18] Manwell J. F., McGowan J. G., (1993), "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems", *Solar Energy*, 50, 399-405.
- [19] Manwell J. F., McGowan J. G., (1994), "Extension of the kinetic battery model for wind/hybrid power systems", *Proceedings of EWEC*, 284-289.
- [20] Waag W., Kabitz S., Sauer D. U., (2009), "State of Charge/Health", *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier.
- [21] Chen M., Rincon-Mora G. A., (2006), "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21, 504-511.
- [22] "KOKAM Co. Ltd. SLPB (Superior Lithium Polymer Battery) Technical Specification, SLPB55205130H".
- [23] Miyamoto H., Morimoto M., Morita K., (2007), "On-line SOC Estimation of Battery for Wireless Tram Car", *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 1624-1627, Bangkok, Thailand, 27-30 November.
- [24] Dawei L., Guozhong C., (2010), "Engineering Nanostructured Electrodes and Fabrication of Film Electrodes for Efficient Lithium Ion Intercalation", *Energy Environ. Sci.*, 3, 1218-1237.
- [25] Trembley O., Dessaint L., Dekkiche A., (2007), "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 107-111, Arlington, TX, USA, 9-12 September.
- [26] González-Longat F., (2006), "Circuit Based Battery Models: A Review", *Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica Eléctrica, Electrónica y Computación*, Puerto La Cruz, Venezuela, 3-7 April.

- [27] Hussein A. A., Batarseh I., (2011) "An Overview of Generic Battery Models", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1-6, San Diego, CA, USA, 24-29 July.
- [28] Kroeze R. C., Krein P. T., (2007), "Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations", Power Electronics Specialists Conference, 1336-1342, Rhodes, Greece, 15-19 June.
- [29] Whittingham, M. S., (1976), "Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry". Science, 192 (4244), 1126–1127.
- [30] Seongjun L., Jonghoon K., Jaemon L., Cho B.H., (2008), "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge", Journal of Power Sources, 185, 1367–1373.

## ÖZGEÇMİŞ

Murat Ceylan, lisans eğitimini Yeditepe Üniversitesi'nde tamamlayarak Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun olmuştur. Daha sonra Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2012 yılından beri aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.