



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN  
FAYDALI FRENLEME SİSTEMİNİN  
BATARYA ÜZERİNDEKİ OLUMSUZ  
ETKİLERİNİN AZALTILMASI

Mehmet ŞEN

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2024  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

..... tarafından hazırlanan “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Faydalı Frenleme Sisteminin Batarya Üzerindeki Olumsuz Etkilerinin Azaltılması” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Danışman

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

Bu doktora tez çalışmasında Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER ikinci danışman olarak görev yapmıştır.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mehmet ŞEN

Tarih:

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FAYDALI FRENLEME SİSTEMİNİN BATARYA ÜZERİNDEKİ OLUMSUZ ETKİLERİNİN AZALTILMASI

Mehmet ŞEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

2024, 165 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

Prof. Dr. Bayram AKDEMİR

Prof. Dr. İsmail SARITAŞ

Doç. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ile artan yakıt fiyatları nedeniyle dünya, çevre dostu olan elektrikli araç (EA) kullanımına yönelmeye başlamıştır. EA'larda enerjinin verimli bir şekilde depolanması ve kullanılması önemlidir. Bu bağlamda EA'larda faydalı frenleme sisteminden elde edilen geri kazanım, enerji verimliliği için önemli rol oynamaktadır. EA'larda faydalı frenleme, kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryayı yeniden şarj eder ve enerji tüketimine fayda sağlar. Ancak bu sistemin batarya ömrü üzerindeki etkisi önemlidir; faydalı frenleme sırasında yüksek şarj C oranları bataryanın bozulmasına neden olur. Bu tez çalışması, faydalı frenleme sisteminin verimli ve güvenli bir şekilde depolanması için bulanık mantık tabanlı süperkapasitör ve bataryadan oluşan hibrit depolama tekniğini sunmaktadır. Çalışmada öncelikle bulanık mantık kontrolü için EA'da kullanılacak bataryanın kısıtlılıkları belirlenmiştir. Ardından bulanık mantık sistemi oluşturularak ADVISOR ve Siemens Simcenter Flomaster programlarında NEDC sürüş çevriminde testler yapılmıştır. Bataryanın faydalı frenlemeden sürekli şarj olarak ömrünün azalmasını önlemek için öncelikli depolama süperkapasitör olmuştur. Araç ortalama enerji tüketiminden daha fazla enerji harcadığı durumlarda ise süperkapasitörden destek alınarak hem enerji tüketimi azaltılmış hem de süperkapasitör enerjisi boşaltılarak, faydalı frenlemeden gelecek enerji için hazırlık yapılmıştır. Bu sayede faydalı frenleme sırasında bataryaya aktarılan yüksek akım değerleri, süperkapasitör aracılığıyla etkili bir şekilde sınırlandırılmıştır. Hibrit depolama sistemli EA'ta batarya üzerinde oluşan akım değerleri ADVISOR programında %29,1 Simcenter Flomaster programında ise %28,7 oranında azalmıştır. Böylece hibrit depolamalı sistemde batarya %46,84 oranında daha az ısı üretmiştir. Simülasyon testlerinin ardından, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerle hibrit depolamalı sistemin batarya üzerindeki iyileştirici etkileri somut bir şekilde gösterilmiştir. Özellikle faydalı frenleme esnasında hibrit depolamalı sistemin batarya ömrü ve kapasitesine olan olumlu etkilerini daha net gözlemlenmek amacıyla, Aspilsan marka 18650 silindirik Li-iyon (NMC) bataryalar üzerinde yaşlandırma testleri yapılmıştır. Bu kapsamda, 25 °C'de 1C oranında 500 çevrim şarj ve deşarj edilerek yapılan testler sonucunda bataryanın kapasitesinde %16,77'lik bir kayıp gözlemlenmiş ve test sonucunda kapasitesi 2402 mAh olarak ölçülmüştür. Ardından, bataryaların sağlık durumunu değerlendirmek için Metrohm Vionic cihazında NEDC sürüş çevrimi modellenerek deney düzeneği oluşturulmuş ve deneyler farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde hem batarya depolamalı hem de hibrit depolamalı

sistemler için kapasite ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, hibrit depolamalı sistemin batarya kapasitesinde %3,09 oranında bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu iyileşme, EA kullanıcılarının bataryalarını daha kararlı bir performans sergilemesine ve uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, batarya sağlığındaki bu iyileşme, düzenli bakım ve servis maliyetlerini de azaltmaktadır. Bu bağlamda hibrit depolamalı sistemin avantajlarını daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla yapılan yaşlandırma testlerinde, hibrit depolamalı sistemin batarya ömrünü 103 çevrim daha uzattığı tespit edilmiştir. Bu, hibrit depolamalı bir EA bataryasının ortalama 30.000 km daha fazla kullanılabilir olduğu anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, faydalı frenleme esnasındaki oluşan enerjinin bulanık mantık denetleyicisi ile kontrol edilerek hibrit depolamalı sisteme aktarılması, batarya kapasitesinde ve performansında belirgin iyileşmeler sağlayarak, kullanıcıların batarya ömrünü uzatmakta ve bakım maliyetlerini azaltmakta etkili olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** batarya, bulanık mantık, elektrikli araçlar, faydalı frenleme, hibrit enerji depolama, süperkapasitör



## **ABSTRACT**

### **Ph.D THESIS**

# **REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF THE REGENERATIVE BRAKING SYSTEM USED IN ELECTRIC VEHICLES ON THE BATTERY**

**Mehmet ŞEN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN ELECTRIC ELECTRONICS ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Muciz ÖZCAN**

**2024, 165 Pages**

**Jury**

**Prof.Dr.Muciz ÖZCAN**

**Prof. Dr. Ahmet SAMANCI**

**Prof. Dr. Bayram AKDEMİR**

**Prof. Dr. İsmail SARITAŞ**

**Assoc. Prof. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN**

Fossil fuels are running out quickly, and the cost of fuel is increasing, so people are starting to switch to more ecologically friendly electric vehicles (EVs). It is important to store and utilize energy efficiently in EVs. In this context, the recovery from the regenerative braking system in EVs plays an important role for energy efficiency. Regenerative braking in EVs recharges the battery by converting kinetic energy into electrical energy and benefits energy consumption. However, the impact of this system on battery life is significant; high charge C-rates during regenerative braking lead to battery degradation. This thesis presents a fuzzy logic based hybrid storage technique consisting of a supercapacitor and a battery for efficient and safe storage of the regenerative braking system. First, the constraints of the battery to be used in the EV for fuzzy logic control are determined. Then, the fuzzy logic system was created and tested in ADVISOR and Siemens Simcenter Flomaster programs in NEDC driving cycle. The primary storage was supercapacitor to prevent the battery from decreasing its lifetime by continuously charging from useful braking. In cases where the vehicle consumes more energy than the average energy consumption, support from the supercapacitor is used to both reduce energy consumption and prepare for the energy coming from useful braking by discharging the supercapacitor energy. In this way, the high current values transferred to the battery during regenerative braking are effectively limited by the supercapacitor. In the EV with hybrid storage system, the current values on the battery decreased by 29.1% in the ADVISOR program and 28.7% in the Simcenter Flomaster program. Thus, the battery generated 46.84% less heat in the hybrid storage system. Following the simulation tests, experiments were conducted in the laboratory environment to show the improvement effects of the hybrid storage system on the battery in a tangible way. In order to more clearly observe the positive effects of the hybrid storage system on battery life and capacity, especially during regenerative braking, aging tests were performed on Aspilsan brand 18650 cylindrical Li-ion (NMC) batteries. In this context, a 16.77% loss in the capacity of the battery was observed as a result of the tests performed by charging and discharging 500 cycles at 1C at 25 °C and its capacity was measured as 2402 mAh as a result of the test. Then, in order to evaluate the health status of the batteries, an experimental setup was created by modeling the NEDC driving cycle in the Metrohm Vionic device and the experiments were carried out at different ambient temperatures. In these experiments, capacity measurements were performed for both battery storage and hybrid storage systems. The results show that the hybrid storage

system provides a 3.09% improvement in battery capacity. This improvement contributes to a more stable performance and longer battery life for EV users. Moreover, this improvement in battery health reduces regular maintenance and service costs. In this context, aging tests conducted to more clearly demonstrate the advantages of the hybrid storage system have shown that the hybrid storage system extends the battery life by 103 cycles. This means that an EV battery with hybrid storage can be used for an average of 30,000 km more. In conclusion, transferring the energy generated during regenerative braking to the hybrid storage system by controlling it with a fuzzy logic controller has been effective in extending the battery life and reducing maintenance costs for users by providing significant improvements in battery capacity and performance.

**Keywords:** battery, electric vehicles, fuzzy logic, hybrid energy storage, regenerative braking, supercapacitor



## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve seferber ettikleri tüm imkânlardan ötürü değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Muciz ÖZCAN'a ve Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER'e,

Tez izleme komitemde yer alarak yaptıkları değerlendirmeler ile önemli katkılar sunan değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet SAMANCI, Doç. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN'e,

Tez savunma sınavımda yer alarak tezimi inceleyen ve değerli vakitlerini ayıran değerli hocalarım Prof. Dr. İsmail SARITAŞ'a ve Prof. Dr. Bayram AKDEMİR'e,

Tezin laboratuvar çalışmaları süresince yardımlarını esirgemeyen Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi akademik ve idari personeline,

Doktora sürecimiz boyunca her konuda bana anlayış gösteren ve birbirimizi her daim desteklediğimiz ASBUZEM'deki değerli iş arkadaşlarıma,

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, desteklerini her an arkamda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Mehmet ŞEN  
KONYA-2024

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>xii</b>
<b>TABLolar LİSTESİ .....</b>	<b>xv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Araştırması.....	2
1.2. Tezin Amacı.....	5
1.3. Tezin Yapısı.....	6
<b>2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FRENLEME SİSTEMLERİ .....</b>	<b>8</b>
2.1. Standart Otomotiv Fren Sistemi .....	8
2.1.1. Fren pedalı .....	8
2.1.2. Fren servosu.....	8
2.1.3. Ana silindir .....	13
2.1.4. Fren oranlama valfi.....	14
2.2. Faydalı Frenleme .....	16
2.2.1. Paralel faydalı frenleme .....	18
2.2.2. Seri faydalı frenleme.....	18
2.3. Dinamik Frenleme .....	19
2.4. Ters Akımla Frenleme .....	21
2.5. İdeal ve Güvenli Frenleme.....	22
2.6. Konforlu Frenleme.....	26
2.7. Elektrikli Araçlarda Fren Pedal Hissiyatı .....	27
<b>3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TEKNOLOJİSİ.....</b>	<b>29</b>
3.1. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri.....	29
3.1.1. Ticari sistemler .....	29
3.1.1.1. Kurşun asit bataryalar .....	29
3.1.1.2. Nikel kadmiyum bataryalar .....	30
3.1.1.3. Nikel metal hidrit bataryalar .....	31
3.1.1.4. Lityum iyon bataryalar.....	31
3.1.2. Geleceğin sistemleri.....	33
3.1.2.1. Katı elektrolit bataryalar .....	34
3.1.2.2. Metal-hava bataryalar .....	35
3.1.2.3. Lityum sülfür bataryalar .....	36
3.1.3. Süperkapasitörler .....	36
3.2. Li-iyon Esaslı Bataryaların Çalışma Prensibi .....	38
3.2.1. Anot aktif malzemesi .....	39
3.2.2. Katot aktif malzemesi .....	41
3.2.3. Elektrolit .....	43

3.2.4. Seperatör .....	45
3.3. Li-iyon Bataryalarda Performans ve Güvenlik .....	46
3.3.1. Li-iyon bataryaların şarj ve deşarj edilmesi.....	46
3.3.2. Bataryalarda durum belirleme .....	48
3.3.3. Li-iyon batarya performansını etkileyen etmenler.....	51
3.3.3.1. Derin deşarj etkisi .....	51
3.3.3.2. Akım ve deşarj C-oranı etkisi .....	52
3.3.3.3. Sıcaklık etkisi.....	54
3.3.4. Li-iyon batarya arızaları.....	55
3.3.4.1. Gerilim etkisi .....	56
3.3.4.2. Sıcaklık etkisi.....	58
3.3.4.3. Katot kimyası .....	59
<b>4. BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMİ.....</b>	<b>61</b>
4.1. Bulanık Mantık .....	61
4.1.1. Bulanık mantık sisteminin avantajları ve dezavantajları .....	61
4.1.2. Bulanık mantık modelleme tipleri .....	63
4.1.2.1 Mamdani tipi bulanık modelleme .....	63
4.1.2.2. Sugeno tipi bulanık modelleme .....	64
4.1.2.3. Tsukamoto tipi bulanık modelleme .....	65
4.1.3. Sinirsel bulanık ağlar .....	65
4.2. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) .....	68
4.2.1. ANFIS mimarisi.....	68
4.2.2. Üyelik fonksiyonları .....	70
4.2.2.1. Üçgen üyelik fonksiyonu .....	71
4.2.2.2. Yamuk üyelik fonksiyonu.....	72
4.2.2.3. Gauss üyelik fonksiyonu.....	73
4.2.2.4. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu .....	74
4.2.2.5. Cauchy üyelik fonksiyonu .....	75
4.2.2.6. Sinüzoid üyelik fonksiyonu .....	76
4.2.2.7. Sigmoid üyelik fonksiyonu .....	77
4.2.3. Tahmin doğruluğu.....	78
4.3. Deneysel Sonuçlar ile Kısıtlılıkların Belirlenmesi .....	78
4.3.1. Sıcaklık .....	79
4.3.2. Batarya şarj akımı .....	82
4.3.3. Batarya doluluk oranı.....	90
4.3.4. Süperkapasitör doluluk oranı .....	90
4.4. Bulanık Mantık Sisteminin Tasarlanması.....	90
4.4.1. Verilerin hazırlanması.....	90
4.4.2. Modelin oluşturulması .....	91
4.4.3. Çıktı ve sonuçlar .....	94
<b>5. ELEKTRİKLİ ARACIN BENZETİM ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>96</b>
5.1. ADVISOR Simülasyon Ortamı .....	96
5.1.1. Elektrikli araç konfigürasyonu.....	96
5.1.2. Simülasyon ortamında yapılan testler .....	98
5.2. Siemens Simcenter Flomaster Simülasyon Ortamı .....	101
5.2.1. Elektrikli araç konfigürasyonu.....	102
5.2.2. Simülasyon ortamında yapılan testler .....	103

5.3. Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	108
<b>6. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>110</b>
6.1. Metrohm Vionic Cihazı .....	110
6.2. Li-iyon Batarya Yaşlandırma Testi.....	114
6.2.1. Batarya yaşlandırma modeli .....	114
6.2.2. Batarya performansının izlenmesi .....	115
6.2.3. Batarya yaşlanması için tahmin modeli geliştirme .....	118
6.3. Batarya Depolamalı Sistemin Testi .....	122
6.4. Hibrit Depolamalı Sistemin Testi .....	126
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>131</b>
7.1. Bilimsel Sonuçlar ve Ticari Katkıları .....	131
7.2. Araştırmacılara Yönelik Öneriler .....	134
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>136</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>148</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Fren servosunun genel görünümü .....	9
Şekil 2.2. Frene basılmadığında fren servosunun çalışması .....	10
Şekil 2.3. Frene basıldığında fren servosunun çalışması .....	11
Şekil 2.4. Frenler tutulduğunda fren servosunun çalışması .....	12
Şekil 2.5. Frenler bırakıldığında fren servosunun çalışması .....	13
Şekil 2.6. Ana silindirin genel görünümü .....	14
Şekil 2.7. Ön fren arızasında oranlama valfinin hareketi .....	15
Şekil 2.8. Paralel faydalı frenleme sistemi stratejisi .....	18
Şekil 2.9. Seri faydalı frenleme sistemi stratejisi .....	19
Şekil 2.10. a) normal çalışma anı b) direnç üzerinden dinamik frenleme .....	21
Şekil 2.11. a) normal çalışma anı b) direnç üzerinden ters akımla frenleme .....	22
Şekil 2.12. a) sert ve b) yumuşak yol yüzeylerinde lastik sapması ve yuvarlanma direnci .....	23
Şekil 2.13. Kayma ve temas katsayıları arasındaki ilişki .....	25
Şekil 2.14. Farklı durumlar için frenleme ivmeleri .....	26
Şekil 3.1. Li-iyon batarya ve katı elektrolit bataryaların çalışma prensibi gösterimleri	34
Şekil 3.2. Süperkapasitörün temel çalışma yapısı .....	37
Şekil 3.3. Çoklu döngülerden sonra anodun yapısal deformasyonu .....	40
Şekil 3.4. Anot malzemesi tercih kriterleri .....	41
Şekil 3.5. Katot malzemesi tercih kriterleri .....	43
Şekil 3.6. Li-iyon bataryalara sabit akım ve sabit gerilimde şarj uygulanması durumunda gerilim ve akım değişimi .....	47
Şekil 3.7. 17500 Li-iyon bir bataryanın sabit akım deşarj ve kesikli deşarj işlemlerindeki değişimi .....	48
Şekil 3.8. Şarj durum tahmini için kalman filtre algoritması .....	49
Şekil 3.9. Li-iyon bir bataryanın çeşitli deşarj derinliklerinde kapasite tutma yüzdesi ..	52
Şekil 3.10. Li-iyon bataryanın çeşitli sıcaklıkta deşarj gerilimi ve kapasitesi .....	54
Şekil 3.11. Li-iyon bataryalarda şarj kesme geriliminin kapasite ve çevrim sayısına etkisi .....	57
Şekil 3.12. Li-iyon bataryaların çalışma aralığı .....	57
Şekil 3.13. Sıcaklık artması ile Li-iyon bataryalarda meydana gelen olay ve sonuçları	59
Şekil 3.14. Li-iyon bataryaların katot malzeme sıcaklık dayanımları .....	60
Şekil 4.1. Bulanık sistemin genel yapısı .....	64
Şekil 4.2. İleri beslemeli sinir ağı yapısı .....	67
Şekil 4.3. Geri beslemeli sinir ağı yapısı .....	67
Şekil 4.4. ANFIS genel mimarisi .....	69
Şekil 4.5. Üçgen üyelik fonksiyonu .....	72
Şekil 4.6. Yamuk üyelik fonksiyonu .....	73
Şekil 4.7. Gauss üyelik fonksiyonu için bir karşılaştırma .....	74
Şekil 4.8. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu .....	75
Şekil 4.9. Cauchy üyelik fonksiyonu .....	76
Şekil 4.10. A, B ve C sinüzoid üyelik fonksiyonları .....	77
Şekil 4.11. Artan ve azalan sigmoid üyelik fonksiyonları .....	77
Şekil 4.12. Aspilsan 18650 NMC batarya .....	79
Şekil 4.13. 10 °C’de batarya kapasite deneyi yapılan su sirkülasyonlu soğutma banyosu .....	80
Şekil 4.14. Etüv ile farklı sıcaklıklarda yapılan batarya kapasite deneyleri .....	80

Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklarda 1C oranında batarya kapasite testi grafiği .....	81
Şekil 4.16. Farklı C değerlerinde 43 °C yapılan deşarj test düzeneği .....	82
Şekil 4.17. 25 °C’de farklı C oranlarında yapılan batarya kapasite testi.....	83
Şekil 4.18. 43 °C sıcaklıkta farklı C oranlarında deşarj bataryaların sıcaklıkları .....	84
Şekil 4.19. Batarya sıcaklığı ile ilgili üyelik fonksiyonları .....	92
Şekil 4.20. ANFIS kural tablosu.....	93
Şekil 4.21. ANFIS kural çıktı değerleri.....	93
Şekil 4.22. Modelde girdi değişkenleri arasındaki üç boyutlu ilişki .....	94
Şekil 5.1. ADVISOR programı araç veri giriş ekranı.....	97
Şekil 5.2. Elektrikli aracın blok diyagramı.....	97
Şekil 5.3. Hibrit depolamalı elektrikli aracın blok diyagramı .....	98
Şekil 5.4. NEDC sürüş çevrimi .....	99
Şekil 5.5. NEDC sürüş çevriminde kullanılan aracın hız yüzdeleri.....	99
Şekil 5.6. ADVISOR programında NEDC sürüş çevriminde oluşan akım değerleri... 100	
Şekil 5.7. NEDC sürüş çevriminde batarya SoC değişimi .....	101
Şekil 5.8. Simcenter Flomaster programında batarya parametre tanımlama ekranı..... 102	
Şekil 5.9. Simcenter Flomaster programında modellenen hibrit depolamalı EA kontrol blok diyagramı .....	103
Şekil 5.10. Simcenter Flomaster programında batarya sıcaklık ve şarj durumuna bağlı olarak iç direnç değişimi.....	104
Şekil 5.11. Simcenter Flomaster programında NEDC sürüş çevriminde oluşan akım değerleri .....	105
Şekil 5.12. NEDC sürüş çevriminde batarya SoC değişimi .....	105
Şekil 5.13. Bataryanın farklı SoC değerlerinde değişimi .....	106
Şekil 5.14. Farklı sıcaklık değerlerinde elde edilen batarya SoC.....	106
Şekil 5.15. NEDC sürüş çevrimin bataryanın ısı üretimi (kW).....	107
Şekil 5.16. Hibrit depolamalı sistemin batarya üzerinde oluşturduğu akım değerlerinin karşılaştırması .....	108
Şekil 6.1. Metrohm Vionic blok diyagramı (Metrohm, 2024) .....	111
Şekil 6.2. Metrohm Vionic dinamik arayüzü (Metrohm, 2024).....	112
Şekil 6.3. Metrohm Vionic kablo bağlantıları (Metrohm, 2024).....	112
Şekil 6.4. Metrohm Vionic tampon ve ayırıcı kutularının çıkış kabloları (Metrohm, 2024) .....	113
Şekil 6.5. Metrohm Intello yazılımının genel görünümü (Metrohm, 2024).....	113
Şekil 6.6. Metrohm Intello yazılımında oluşturulan batarya yaşlandırma prosedürü .. 115	
Şekil 6.7. Aspilsan 18650 Li-iyon bataryanın şarj eğrisi .....	116
Şekil 6.8. Aspilsan 18650 Li-iyon bataryanın deşarj eğrisi.....	116
Şekil 6.9. Yaşlandırma testi sonucunda bataryanın kapasite değişimi .....	117
Şekil 6.10. Bataryanın şarj ve deşarj esnasında gerilim değişimi .....	119
Şekil 6.11. Exponential GPR’de alınan sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırması 121	
Şekil 6.12. Exponential GPR’de alınan sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırması 121	
Şekil 6.13. Gerçek ve tahmini değerler arasında oluşan hata farkı .....	122
Şekil 6.14. Batarya depolamalı sistemin deney düzeneği .....	123
Şekil 6.15. Batarya ve hibrit depolamalı sistemin test prosedürü .....	124
Şekil 6.16. EA bataryasının sürüş esnasındaki akım ve gerilimi.....	124
Şekil 6.17. EA bataryasına depolanan faydalı frenleme enerjisinin akım değerleri..... 125	
Şekil 6.18. Batarya depolamalı EA’ın 100. çevrim sonunda batarya şarj grafiği .....	125
Şekil 6.19. Hibrit depolamalı EA bataryasının sürüş esnasındaki akım ve gerilimi .... 126	
Şekil 6.20. Hibrit depolamalı EA bataryasına depolanan faydalı frenleme enerjisinin akım değerleri .....	127

<b>Şekil 6.21.</b> Hibrit depolamalı EA'ın 100. çevrim sonunda batarya şarj grafiği .....	127
<b>Şekil 6.22.</b> Batarya depolamalı sistem testinin sonundaki şarj grafiği .....	128
<b>Şekil 6.23.</b> Batarya depolamalı sistem testinin sonundakideşarj grafiği .....	129
<b>Şekil 6.24.</b> Hibrit depolamalı sistem testinin sonundaki şarj grafiği.....	129
<b>Şekil 6.25.</b> Hibrit depolamalı sistem testinin sonundakideşarj grafiği .....	130



## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 3.1.</b> Ticari bataryaların parametreleri .....	33
<b>Tablo 3.2.</b> Bazı çözücülerin fiziksel özellikleri .....	33
<b>Tablo 3.3.</b> Metal-hava bataryaların tasarım gereksinimleri .....	35
<b>Tablo 3.4.</b> Bazı anot malzemelerinin performans değerlendirmesi .....	40
<b>Tablo 3.5.</b> Ticari bataryalarda kullanılan katot malzeme özelliklerinin karşılaştırması	42
<b>Tablo 3.6.</b> Ar-Ge aşamasındaki katot malzeme özelliklerinin karşılaştırması.....	43
<b>Tablo 3.7.</b> Bazı çözücülerin fiziksel özellikleri .....	44
<b>Tablo 3.8.</b> Elektrolitlerde kullanılan bazı tuzların fiziksel özellikleri .....	45
<b>Tablo 3.9.</b> Lityum iyon bataryaların tasarım gereksinimleri.....	46
<b>Tablo 3.10.</b> Son yıllarda gerçekleşen bazı Li-iyon batarya arızaları.....	55
<b>Tablo 4.1.</b> EA'ın batarya ve motor parametre değerleri .....	84
<b>Tablo 4.2.</b> Farklı yüklerde faydalı frenlemeden kazanılan enerji .....	88
<b>Tablo 4.3.</b> Maxwell marka BCAP0350 model süperkapasitörün parametre değerleri ..	89
<b>Tablo 4.4.</b> Bulanık mantık veri seti.....	91
<b>Tablo 4.5.</b> Bulanık mantık kontrol sistemi üyelik fonksiyonu değerleri.....	92
<b>Tablo 4.6.</b> Modelin performans değerlendirmesi .....	95
<b>Tablo 6.1.</b> Batarya iç direnç değişimi .....	117
<b>Tablo 6.2.</b> Batarya yaşlandırma testinde elde edilen veriler .....	119
<b>Tablo 6.3.</b> Matlab RLA'da eğitilen modellerin karşılaştırması .....	120

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$P_{tk}$	: Araç tekerlerindeki güç ( <i>Watt</i> )
$w_{tk}$	: Tekerlek hızı ( <i>l/s</i> )
$r_{tk}$	: Tekerlek momenti ( <i>N.m</i> )
$\eta_{ak}$	: Araç aktarma bölümlerindeki verim
$P_{EM}$	: Elektrik makinesinin gücü ( <i>Watt</i> )
$E_a$	: Frenleme esnasında endüklenen gerilim ( <i>V</i> )
$V_{bt}$	: Bataryanın frenleme anındaki uç gerilim ( <i>V</i> )
$I_{fr}$	: Fren akımı ( <i>A</i> )
$R_{bt}$	: Bataryanın iç direnci ( <i>ohm</i> )
$R_{pp}$	: Elektrik makinesinin direnci ( <i>ohm</i> )
$R_{SC}$	: Yarı iletken malzemelerin direnci ( <i>ohm</i> )
$T$	: Frenleme momenti ( <i>N.m</i> )
$k_t$	: Endüvi akımı ile moment arasındaki oran
$R_{fr}$	: Bataryanın iç direnci ( <i>ohm</i> )
$F_{maks}$	: Maksimum kuvvet ( <i>N</i> )
$P_n$	: Tekerlek yükü ( <i>J/m</i> )
$\mu$	: Yol temas katsayısı
$F_{fren}$	: Araç tekerlerindeki frenleme kuvveti ( <i>N</i> )
$F_{yük}$	: Tekerlek üzerindeki araç yükü ( <i>N</i> )
$T_{fren}$	: Araç üzerindeki frenleme momenti ( <i>N.m</i> )
$r_{tekerlek}$	: Araç tekerlek yarıçapı ( <i>m</i> )
$M$	: Araç kütlesi ( <i>kg</i> )
$j$	: Frenleme ivmesi ( <i>m/s<sup>2</sup></i> )
$V_t$	: Süperkapasitör uç gerilimi ( <i>V</i> )
$V_C$	: Süperkapasitör gerilimi ( <i>V</i> )
$R_L$	: Dielektrik kaçak direnci ( <i>ohm</i> )
$R_S$	: Seri direnci ( <i>ohm</i> )
$u_k$	: Sistem girişindeki değişkenler (akım, iç direnç, sıcaklık)
$x_k$	: Kestirilmiş şarj durumu
$x_{k+1}$	: Sistem çıkışındaki açık devre gerilimi ( <i>V</i> )
$y_{k+1}$	: Dışarıdan alınan ölçüm değeri
$w_k$	: İşlem gürültüsü
$v_k$	: Ölçüm hatası
$k$	: Peukert sabiti
$C_p$	: Şarj edilen akıma bağlı elde edilen kapasite ( <i>mAh</i> )
$C$	: Nominal akımla deşarja bağlı elde edilen kapasite ( <i>mAh</i> )
$H$	: Nominal akımla deşarja bağlı elde edilen deşarj süresi ( <i>saat</i> )
$f_i$	: Bulanık mantık giriş değişkeni
$f_k$	: Bulanık mantık çıkış değişkeni
$\mu_{f_i}^{CR}$	: Her çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonlarının ağırlık derecesi
$\mu_{f_k}^{x_i}$	: Çıkış değişkenindeki bulanık kümelerin üyelik fonksiyon değeri
$n_{M/G}$	: Motor-generatör verim oranı
$V$	: Hız ( <i>km/h</i> )
$r_r$	: Aktarma oranı
$n_t$	: Aktarma verimi

$n_f$	: Aks verimi
$a$	: Değişken ivme ( $m/s^2$ )
$k$	: Faydalı frenleme katsayısı
$f_b$	: Frenleme sürtünme katsayısı
$m_v$	: Araç toplam ağırlık ( $kg$ )
$r_t$	: Lastik yanak kalınlığı ( $m$ )
$r_w$	: Jant yarıçapı ( $m$ )
$m_w$	: Jant ağırlığı ( $kg$ )
$m_t$	: Lastik ağırlığı ( $kg$ )
$I_{M/G}$	: Motor-generatör atalet momenti ( $kg.m^2$ )
$C_D$	: Sürüklenme katsayısı
$A$	: Araç ön yüzey alanı ( $m^2$ )
$C_{rr}$	: Yuvarlanma katsayısı
$m_f$	: Ön aks üzerindeki ağırlık katsayısı
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )
$p$	: Hava yoğunluğu ( $kg.m^3$ )
$P_{b,giriş}$	: Hibrit depolama sistemine aktarılan güç ( $kW$ )

### Kısaltmalar

<b>ADVISOR</b>	: Matlab Advanced Vehicle Simulator
<b>ANFIS</b>	: Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi
<b>Ar-Ge</b>	: Araştırma ve Geliştirme
<b>BİTAM</b>	: Bilim Ve Teknoloji Araştırma Ve Uygulama Merkezi
<b>CC</b>	: Sabit Akım
<b>CF</b>	: Akım Takibi
<b>CV</b>	: Sabit Gerilim
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>EA</b>	: Elektrikli Araç
<b>EHB</b>	: Elektro-Hidrolik Fren
<b>EMB</b>	: Elektro-Mekanik Fren
<b>GPR</b>	: Gauss Süreç Regresyonu
<b>HEA</b>	: Hibrit Elektrikli Araçlar
<b>KD</b>	: Kesikli Deşarj
<b>LCO</b>	: Lityum-Kobalt-Oksit
<b>LFP</b>	: Lityum-Demir-Fosfat
<b>Li-hava</b>	: Lityum Hava
<b>Li-iyon</b>	: Lityum İyon
<b>Li-S</b>	: Lityum Sülfür
<b>LMO</b>	: Lityum-Manganez-Oksit
<b>LTO</b>	: Lityum-Titanat
<b>NCA</b>	: Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum
<b>NEDC</b>	: New European Driving Cycle
<b>NMC</b>	: Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt
<b>NREL</b>	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
<b>PA</b>	: Güç Yükseltici
<b>RLA</b>	: Regresyon Öğrenici Uygulaması
<b>SoC</b>	: Batarya Şarj Durumu
<b>SVM</b>	: Destek Vektör Makineleri

<b>UDDS</b>	: Urban Dynamometer Driving Schedule
<b>VF</b>	: Gelirim Takibi
<b>VF2</b>	: İkincil Gerilim Takip
<b>WLTC</b>	: Worldwide Harmonised Light Vehicle
<b>YSA</b>	: Yapay Sınır Ağı



## 1. GİRİŞ

EA'lar 1990'lı yılların başında araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) merkezlerinden prototip atölyelere doğru olan yolcuğunu tamamlanmıştır. Bundan yaklaşık on yıl önce 2013 yılında seri üretim için EA'lar üretim bandına alınmıştır (Alaee ve ark., 2023). Günümüzde, araç üretiminde hibrit elektrikli araçlar (HEA) ve EA'lar araç üretiminin çoğunluğu oluşturmaktadır (Liao ve ark., 2017; Ehsani ve ark., 2021). HEA'lar, konvansiyonel araçlardaki donanımların yanı sıra yenilikçi özellikleri ile kullanıcılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Bunun nedeni HEA'lar, sabit şarj sistemlerine ihtiyaç duymaksızın konvansiyonel araçlarla benzer ya da daha fazla menzil mesafesine sahip olabilmeleridir. EA'ların kullanımında yaygınlaşmasının önünde engel olan menzil mesafesini artırmak ve daha fazla menzile sahip olan EA üretimi için batarya ağırlığını azaltma ve kapasitesini artırma çalışmaları her geçen gün hız kazanmaktadır (Armenta-Déu ve Boucheix, 2023). Batarya teknolojisinde elde edilecek teknolojik gelişmelere bağlı olarak önümüzdeki yıllarda EA'ların alışlagelmiş konvansiyonel araçlardan çok daha uzun menzile sahip olacağı beklenmektedir.

Günümüzde EA'ların üretimi hızla artan bir ivmeye sahiptir. Dünya genelinde toplam EA sayısı 2010'da 200.000'den az iken, seri üretimin artması ile son 10 yıl içinde bu değer yaklaşık 55 kat artış göstermiş ve 11 milyon seviyelerine ulaşmıştır (IEA, 2023). EA'ların yollara çıkmasıyla birlikte otomotiv sektöründe de büyük değişimleri beraberinde getirmiştir. Meydana gelen bu değişim ve yenilikler aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- EA'lar elektrik tahrikli gelişmiş elektrik motoru ve elektrik enerji kaynağına sahiptir.
- EA'larda enerji dönüşümü esnasında içten yanmalı araçlara göre daha az aktarma kayıpları meydana gelir.
- EA'lar sıfır emisyon konsepti ve yüksek verimle kullanım imkanı sunmaktadır.
- EA'lar akıllı sistemlere entegre edilerek modern taşımacılığın temellerinin oluşmasını sağlamıştır.

EA’larda büyüme hızının artırılması ülkemizde paydaş olduğu 2015 Paris İklim Anlaşması ve 2021 COP26 konferansı ile hedeflenen net-sıfır emisyonu ulaşabilmesi için bir gerekliliktir (Demir, 2022). Net-sıfır emisyon hedefine ulaşılabilmesi için 2050 yılına kadar karayolu taşımacılığının tamamı EA’lar ile sağlanmalıdır. Bu dönüşümün sağlanabilmesi için EA üretimindeki hızlı gelişmenin elektrik dağıtım şebekelerinde ve şarj istasyonlarında da sağlanması gerekmektedir.

EA’ların yaygınlaşmasındaki en büyük zorluk düşük maliyetli ve yüksek menzilli batarya sistemlerinin geliştirilmesinde yatmaktadır. Düşük maliyetli bataryaların üretimi EA’ları yollarda daha fazla görmemizi sağlayacağı için batarya üreticileri tesislerine ciddi yatırımlar yapmaktadırlar. EA’larda kullanılan bataryaların yüksek güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğuna sahip olması istenir. Ancak EA’lar henüz hedeflenen enerji yoğunluğuna ulaşamamıştır. Bataryalardan kaynaklanan bu sorunu aşmak için ilk yapılması gereken çalışma, EA’larda enerjinin en verimli şekilde kullanılması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu amaca uygun olarak yapılan bilimsel çalışmalar ile faydalı frenleme ile EA’larda %20 ile %30 arasında menzil artırımını yapılabileceği görülmüştür (Ruan ve ark., 2016). Ancak bu durumun sebebi olarak görebileceğimiz hızlı şarj ve sık sık şarj gibi elektriksel durumlar araç bataryası üzerinde olumsuz etkilere sebep olarak batarya paketinin veya batarya hücrelerinin bozulmasına sebebiyet vermektedir. EA’lardaki menzil artırımının yanı sıra batarya yaşlanmasının da önlenmesi ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından oldukça önem arz etmektedir.

### **1.1. Literatür Araştırması**

Yang ve arkadaşları (2017), tamamen elektrikli bir araçta maksimum enerji geri kazanımını elde etmek için yeni bir strateji geliştirmişlerdir. Bu stratejide, bataryaya gelen akımın minimum düzeyde tutulması amaçlanırken, geri kazanımlı frenleme oranının maksimum düzeyde tutulması hedeflenmiştir. Prototip araca bir hidrolik enerji depolama sistemi dahil edilerek, yeni bir elektro-hidrolik sistem tasarlanmıştır. Çalışmanın simülasyon sonuçlarına göre, enerji geri kazanım oranı bir miktar azalmıştır. Ancak minimum akım stratejisi kullanarak daha yumuşak ve dalgasız bir şarj akımı elde edilmiştir.

Jiang ve arkadaşları (2021), EA'larda enerji geri verimliliği artırmak için rejeneratif frenleme kullanılmak üzere bir optimizasyon algoritması önermişlerdir. Ön ve arka aksların fren kuvvetini ilgili kısıtlar ile optimum dağıtacak şekilde tasarlanmıştır. Ardından, MATLAB/Simulink yazılımı ile fren kontrol stratejisinin bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve tasarlanan rejeneratif fren kontrol stratejisinin etkinliğini doğrulamak için Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) ve New European Driving Cycle (NEDC) çevrim koşulları üzerinde simülasyon testleri yapılmıştır. Geliştirilen strateji ile, frenleme stabilitesi korunurken fren enerjisi geri kazanım verimliliği %51,9'dan daha fazla iyileştirildiği tespit edilmiştir.

Jingang ve arkadaşları (2009), fren enerjisi üreten EA'ların matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Batarya ve motorun şarj ve deşarj özelliklerini analiz ederek, basit bir rejeneratif frenleme stratejisi önerilmiştir. Strateji, motor torkundan yararlanır ve maksimum enerji geri kazanımı sağlayabilir. Önerilen strateji, batarya sağlığını ve enerji verimliliğini önemli ölçüde iyileştirdiği ortaya çıkmıştır.

Yueying ve arkadaşları (2020), anahtarlamalı relüktans motor tarafından sürülen önden tahrikli EA'ların frenleme performansını ve rejeneratif enerjisini iyileştirmek için, tahrik sisteminin çok amaçlı optimizasyonuna dayalı bir rejeneratif fren kontrol stratejisi önermişlerdir. Fren enerjisi ve güvenliği ortaklaşa dikkate alınarak bir fren kuvveti dağıtım stratejisi geliştirilmiş ve düşük / yüksek hız durumuna göre tahrik sistemi modeli oluşturulmuştur. Çok amaçlı optimizasyonuna dayalı rejeneratif fren kontrol stratejisinin, geri kazanım enerjisini azaltmadan aracın frenleme konforunu etkili bir şekilde artırabildiğini ve batarya ömrünü iyileştirebildiği görülmüştür.

Raman ve arkadaşları (2020), EA'larda batarya ve süperkapasitörleri hibrit bir şekilde kullanılması önermişler ve süperkapasitörleri aracın tek bir enerji depolama bölmesine sabitlemek yerine tüm konumlarına dağıtmışlardır. Dağıtılmış bir formatta enerji depolaması yapabilen bu sistem yenilikçi tasarımlara imkân sağlarken aracın ağırlık merkezini yukarı çekmesi olumsuz bir yönüdür. Ayrıca kaza anında yenilikçi konumundan dolayı süperkapasitörler güvenlik sorunu oluşturmaktadır.

Sayed ve arkadaşları (2022), EA'larda çoklu enerji depolama sisteminin batarya ömrünü ve menzili etkileyeceğini savunmuştur. Çoklu enerji depolama sistemi için bir

kontrol yöntemi geliştirmişler ve simülasyon sonuçlarını geleneksel sistem ile kıyaslamışlardır. Önerilen optimize edilmiş bu enerji yönetimi stratejisi, sistemin genel performansını iyileştirebileceğini ve güç tüketimini azaltabileceğini savunmuşlardır.

Hussain ve arkadaşları (2019), bu çalışmada HEA için uyarlanabilir alçak geçiren filtre ve uyarlanabilir şarj kontrolörü kullanan bir enerji yönetim sistemi gerçekleştirilmiştir. Şarj kontrolörü, süperkapasitörün güvenli kullanımını sağlayan ve aşırı şarjdan koruyan uyarlanabilir bir PI kontrol cihazından oluşmaktadır. Batarya ve süperkapasitör arasında optimum güç paylaşımı için bulanık mantık tabanlı bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Yükün tepe gücü süperkapasitöre aktarılarak, batarya üzerindeki stres azaltılmıştır. Önerilen yöntemi doğrulamak için üç standart sürüş döngüsü kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin bataryanın stresini, sıcaklığını ve güç kayıplarını azalttığını ortaya koymaktadır.

Song ve arkadaşları (2017), MATLAB/Simscap yazılımında termal etkiyi dikkate alan bir paralel bağlı hücre paketi modeli oluşturmuştur. Paralel bağlı hücre enerji yönetim stratejisi, devredeki hücre sayısını yük talebine göre otomatik olarak ayarlar ve karşılık gelen batarya doluluk sırasındaki ilk anahtarı açar. Bu yöntem, tek bir paralel dizide kolayca kullanılabilir. Paralel bağlı hücre paketi modeli özellikle yaşlanan hücreler için tasarlanmıştır ve hücre yaşlanmalarında denge sağlanmıştır.

Angundjaja ve arkadaşları (2021), EA'larda batarya gücünün boşalmasını ve dalgalanmayı azaltmak için bir güç yönetimi stratejisi önermişlerdir. Önerilen strateji, gelecekteki veri tahminini ve güç dağıtımını gerçekleştirmek için iki kontrol seviyesinden oluşan hiyerarşik kontrol yapısına dayanmaktadır. Yapay sinir ağları ile, bir araç ağı senaryosunu oluşturarak güç talebi tahminini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra, tahmin edilen güç talebi kontrol yapısındaki bulanık mantık kontrolörüne referans girdi olarak verilmiştir. Bulanık mantık denetleyici, batarya ile süperkapasitör arasındaki güç oranını temsil eden süperkapasitör boşaltma katsayısını üreterek hibrit enerji depolama sisteminin güç dağılımını kontrol etmektedir. Simülasyon sonucunda, batarya büyüklüğünün ve batarya gücü dalgalanmasının önerilen stratejiyi kullanarak sırasıyla %46,1 ve %52,3 oranında azaldığını göstermektedir.

Hu ve arkadaşları (2018), bu çalışmada uyarlanabilir kural tabanlı denetleyici (ana denetleyici) ve bulanık mantık denetleyiciden (yardımcı denetleyici) oluşan, trafik bilgilerini dikkate alan kapsamlı bir denetleyici önermişlerdir. Hibrit enerji depolama sisteminde güç tahsisini analiz ederek, genel bir denetleyici elde etmişlerdir. Ardından, uyarlanabilir kural tabanlı denetleyicinin gerçek zamanlı performansını daha da artırmak için, trafik durumu ve yol eğiminden oluşan trafik bilgileri dikkate almışlar ve araç hızının gelecekteki durumunu tahmin etmek için bir K-ortalama kümeleme algoritması ile trafik durumunu birleştiren yeni bir yöntem önermişlerdir. Son olarak, geleneksel kural tabanlı denetleyici, uyarlanabilir kural tabanlı denetleyici ve kapsamlı denetleyici arasında karşılaştırmalı simülasyonlar gerçekleştirmişler ve sonuçlar, önerilen uyarlanabilir kural tabanlı denetleyicinin batarya ömrü kaybını %3,76 oranında azalttığını göstermektedir.

Çetin ve arkadaşları (2021), bu çalışmada bataryanın deşarj süresini uzatarak EA'nın menzilini artırmak için bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Kontrol sistemi tasarlanırken bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca Monte-Carlo simülasyonu ve Gauss Dağılımı yöntemi kullanılarak 100 adet senaryo üretilmiş ve sistemin işleyiş doğruluğu incelenmiştir.

Prasanth ve arkadaşları (2023), EA'lara, daha uzun mesafe sağlamak için maksimum frenleme enerjisinden yararlanarak makine öğrenimi tabanlı yöntemler önermişlerdir. Yöntemler, bulanık mantık ve yapay sinir ağı teknikleri kullanılarak elde edilen enerji ile karşılaştırılmıştır. Bu teknikler, frenleme gücünden yararlanılan enerjiyi hesaplamak için süperkapasitörün veya bataryanın şarj durumu ve fren talebini dikkate almaktadır. Bu çalışmada önerilen makine öğrenme teknikleri, kullanılan bulanık mantık ve yapay sinir ağı yöntemlerine kıyasla enerji kazanımında %59 artış sağlanmıştır.

## 1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, EA'ların faydalı frenleme yönteminin batarya üzerinde oluşturacağı batarya yaşlanma etkisini azaltarak batarya ömrünün iyileştirilmesini sağlamaktır. EA'larda en pahalı bileşenlerden birisi olan bataryanın şarj/deşarj sayısını azaltmak için öncelikle bir süperkapasitör kullanılmıştır. Bir bulanık mantık kontrolcüsü ile bu depolama bileşenleri arasındaki kısıtlılıklarda belirlenmiştir. Çalışmada hem simülasyon hem de gerçek ortam batarya testleri gerçekleştirilerek, bu yöntemin batarya

üzerinde sağlayacağı faydanın gösterilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon yazılımı olarak MATLAB/Simulink ve Siemens Simcenter Flomaster programları kullanılarak önerilen yöntem ile klasik yöntemin sürüş testlerine tâbi tutulması hedeflenmiştir. Bu sayede yazılım üzerinden önerilen yöntemin batarya yaşlanmasına olan katkısı tespit edilecektir. Simülasyonda oluşturulan ortam koşulları, gerçek ortam testlerinde de oluşturularak batarya şarj/deşarj işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek ortam testi sonunda bataryalar arasındaki kapasite farkları incelenerek yapılan çalışmanın ispatının sağlanması amaçlanmıştır.

### 1.3. Tezin Yapısı

Birinci bölümde, Giriş başlığı altında çalışmanın amacı, kapsamı ve literatür taraması sunulmuştur. EA teknolojilerinin önemi vurgulanarak, çalışmanın temelini oluşturan araştırma soruları ve tezin amacı açıklanmıştır.

İkinci bölümde, Elektrikli Araçlarda Frenleme Sistemleri başlığı altında, EA'ların frenleme teknolojileri incelenmiştir. Geleneksel fren sistemleriyle karşılaştırmalar yapılarak, faydalı frenleme gibi modern tekniklerin avantajları ve zorlukları ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm, Elektrikli Araçlarda Batarya Teknolojisi üzerine odaklanmaktadır. Bu bölümde, bataryaların yapısı, çalışma prensipleri, enerji depolama kapasiteleri, batarya arızaları, performans ve güvenlik konuları detaylı bir şekilde incelenmiş, EA'larda kullanılan batarya teknolojilerinin gelişimi ve mevcut durum hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, Bulanık Mantık Kontrol Sistemi ele alınmıştır. Bu bölümde, bulanık mantık teorisinin temelleri anlatılmıştır. Ardından EA'lar için hibrit depolama sistemi için deneysel çalışmalar ile bulanık mantık kontrol sistemi tasarlanmıştır.

Beşinci bölüm, Elektrikli Aracın Benzetim Çalışmaları başlığı altında, geliştirilen modellerin ve simülasyonların detaylı bir analizini sunmaktadır. Benzetim çalışmalarıyla elde edilen veriler, teorik bilgilerin pratiğe yansımalarını değerlendirmek amacıyla altıncı bölümde kullanılmıştır. Ayrıca, bulanık mantık kontrol sistemlerinin performans ve verimlilik açısından sağladığı faydalar tartışılmıştır.

Altıncı bölümde, Deneysel Çalışmalar başlığı altında, tez kapsamında geliştirilen sistemin laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaları sunulmuştur. Deneyle rin sonuçları detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular simülasyondan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç ve Öneriler başlıklı yedinci ve son bölümde ise tez çalışmasının genel bir değerlendirmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda gelecekte yapılacak araştırmalar için öneriler sunulmuştur.



## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FRENLEME SİSTEMLERİ

### 2.1. Standart Otomotiv Fren Sistemi

Frenlerin amacı, hareket halindeki aracın kinetik enerjisini fren pabuçlarında veya fren balatalarında sürtünme torkuna dönüştürerek aracı yavaşlatmak veya durdurmaktır (Genta, 2004). Hidrolik fren sistemleri, sürücünün pedal kuvvetini her bir tekerlekteki frenlere iletmek için etkili bir yöntem olduğu düşünüldüğünden dolayı binek otomobillerde fren sistemi son seksen yılda çok az değişmiştir (Heisler, 1999). Sürücünün kuvveti, hidrolik basınca dönüştürülerek her bir tekerlek frenine iletilir ve burada tekerleklerin dönüşünü durdurmak için enerji önce torka sonrada ısı enerjisine dönüştürülür. Bu nedenle frenlerde aşırı sıcaklık artışı olmaksızın büyük miktarlarda ısıyı dağıtabilmeli ve karşılaşılan büyük frenleme torklarını absorbe edebilecek kadar sert olmalıdır (Heisler, 1999).

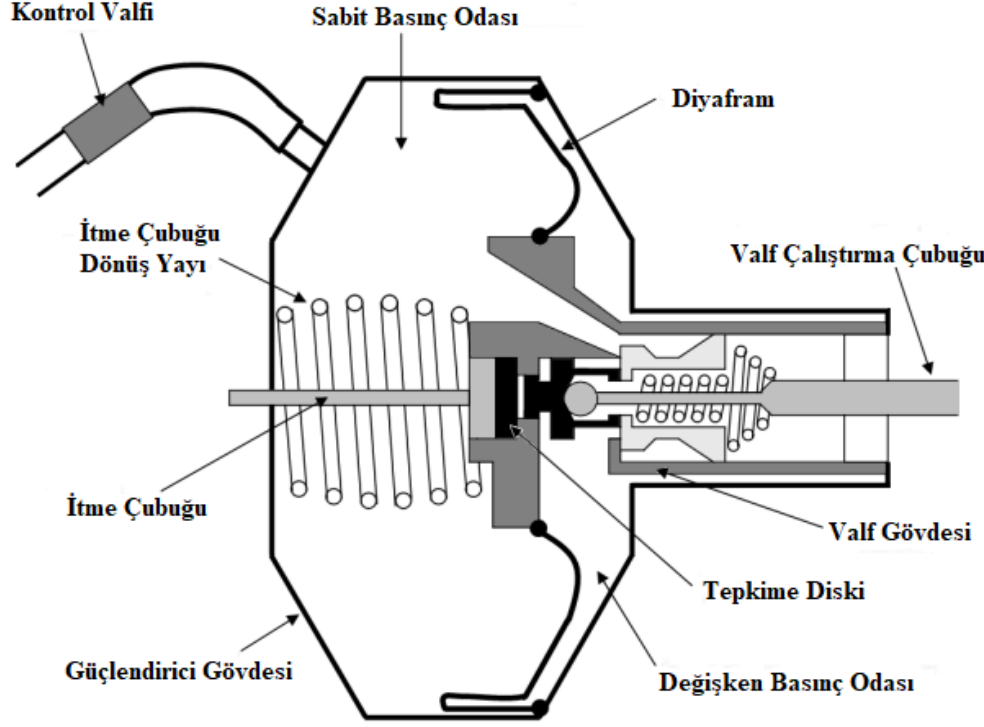
#### 2.1.1. Fren pedalı

Fren pedalı bir kaldıraç görevi görür ve aracı yavaşlatmak veya durdurmak için kullanılır. Fren pedalı genellikle sürücünün uyguladığı kuvveti yaklaşık dört katına çıkarır, bu da sürücünün aracı durdurmak için ihtiyaç duyduğu güç miktarını azaltmaya yardımcı olarak sürücünün yorgunluğunu azaltır (Heisler, 1999). Fren pedalı aynı zamanda sürücüye bir geri bildirim görevi görerek farklı ortam koşullarda frenleme miktarını güvenli bir şekilde kontrol edebilmesini sağlar. Fren pedalı normal şartlarda belirli bir sertliğe sahiptir. Araçta çok fazla fren kullanımı sonucu fren pedalı sertleşir veya fren sistemindeki olası bir arıza durumunda yumuşak hale gelerek sürücüyü önceden uyarabilir.

#### 2.1.2. Fren servosu

Fren servosunun amacı, sürücü tarafından uygulanan pedal kuvvetini artırarak frenlemeyi sürücü için daha konforlu ve güvenli hale getirmektir. Fren servosu, diyaframın boyutuna bağlı olarak pedal kuvvetini iki ile dört kat arasında artırma yeteneğine sahiptir (Genta, 2004). Fren servosu, fren pedalı ile ana silindir arasında yer alır. Fren servosu, bir diyafram tarafından sabit basınç odası ve dinamik basınç odasına

bölünmüş bir gövdeden oluşur. Dinamik basınç odasının içindeki basıncı düzenleyen bir kontrol valfi mekanizması vardır. Fren pedalına bağlı bir valf çalıştırma çubuğu valf mekanizmasını kontrol eder ve bir itme çubuğu fren servosunu ana silindire bağlar. Fren mekanizmasının genel görünümü Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

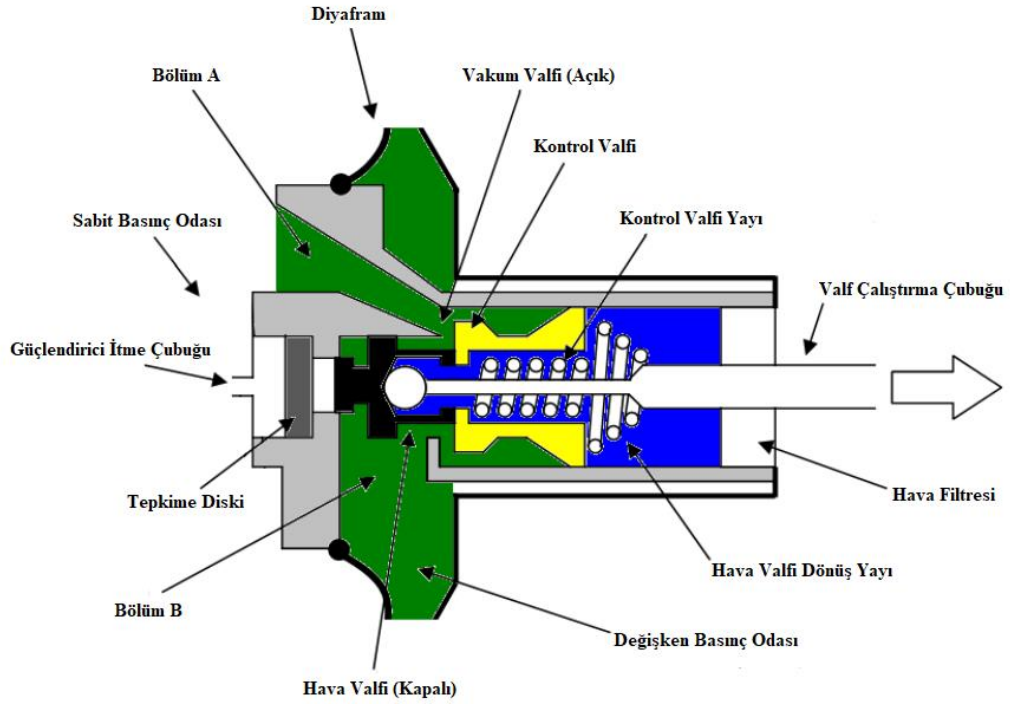


Şekil 2.1. Fren servosunun genel görünümü (DeMers, 2008)

Fren servosu sabit basınç odası ile dinamik basınç odası arasındaki basınç farkını kullanarak çalışır. Frenleme olmayan durumlarda, her iki basınç odası da emme manifoldundaki hava ile oluşturulan ve genellikle 40 kPa ile 60 kPa arasında olan odalar aynı vakum altındadır bu durumda basınç farkı yaratmaz. Frenleme olayları sırasında pedal, çalıştırma çubuğunu iterek bir valfin açılmasına ve dinamik basınç odasına atmosferik hava girmesine neden olur. Böylece, diyafram dinamik basınç tarafında sabit basınç tarafına kıyasla daha yüksek bir basınca neden olur. Bu basınç farkı daha sonra diyaframa bağlı itme çubuğunu ana silindire doğru zorlayarak fren pedalı kuvvetinin artmasına neden olur.

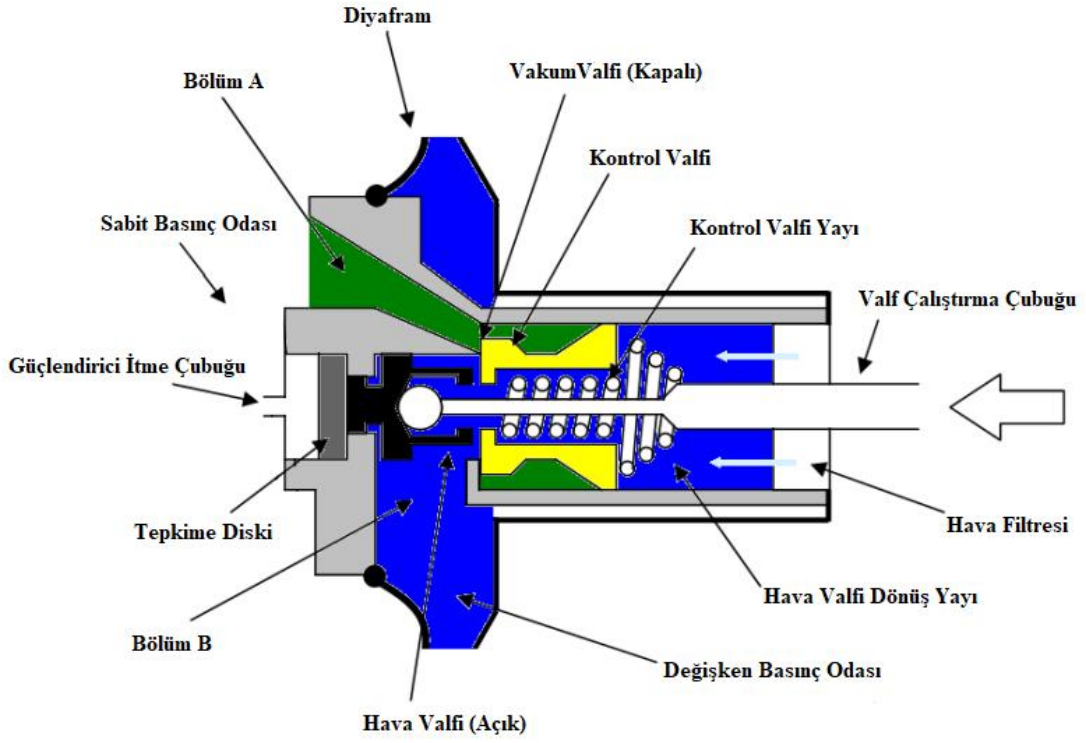
Fren servosunun çalışması sırasında üç temel durum vardır bunlar; uygulama, tutma ve bırakma aşamalarıdır (DeMers, 2008). Fren uygulanmadığında durumda ise,

valf çalıştırma çubuğuna bağlı hava valfi, geri çekme yayı tarafından sağa çekilir. Kontrol valfi, kontrol valfi yayı tarafından sola doğru itilerek hava valfinin kontrol valfiyle temas etmesine neden olur. Bu durum, atmosferik havanın dinamik basınç odasına girmesini ve herhangi bir frenleme kuvvetine neden olmasını engeller. Bir frenleme yapılmadığı durumda fren servosunun çalışma mantığı Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



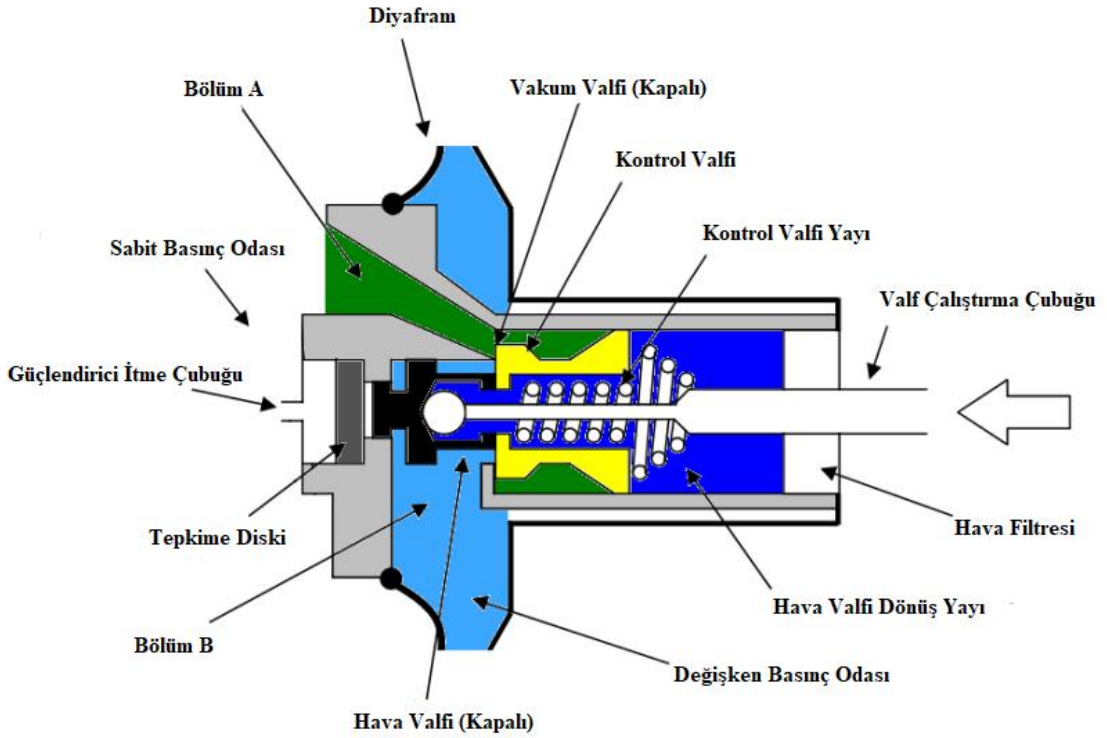
Şekil 2.2. Frene basılmadığında fren servosunun çalışması (Heisler, 1999)

Fren uygulandığında ise, valf çalıştırma çubuğu hava valfini sola doğru iter. Bu durum, kontrol vanasının vakum vanasına değene kadar sola hareket etmesine neden olur. Böylece, bölüm A ile bölüm B arasındaki açıklık kapanır. Hava valfi sola doğru hareket ettikçe kontrol valfinden uzaklaşarak atmosfer basıncının B bölümündeki dinamik basınç odasına girmesine izin verir. Fren uygulandığında iki bölüm arasındaki kapanma durumu Şekil 2.3’te gösterilmektedir.



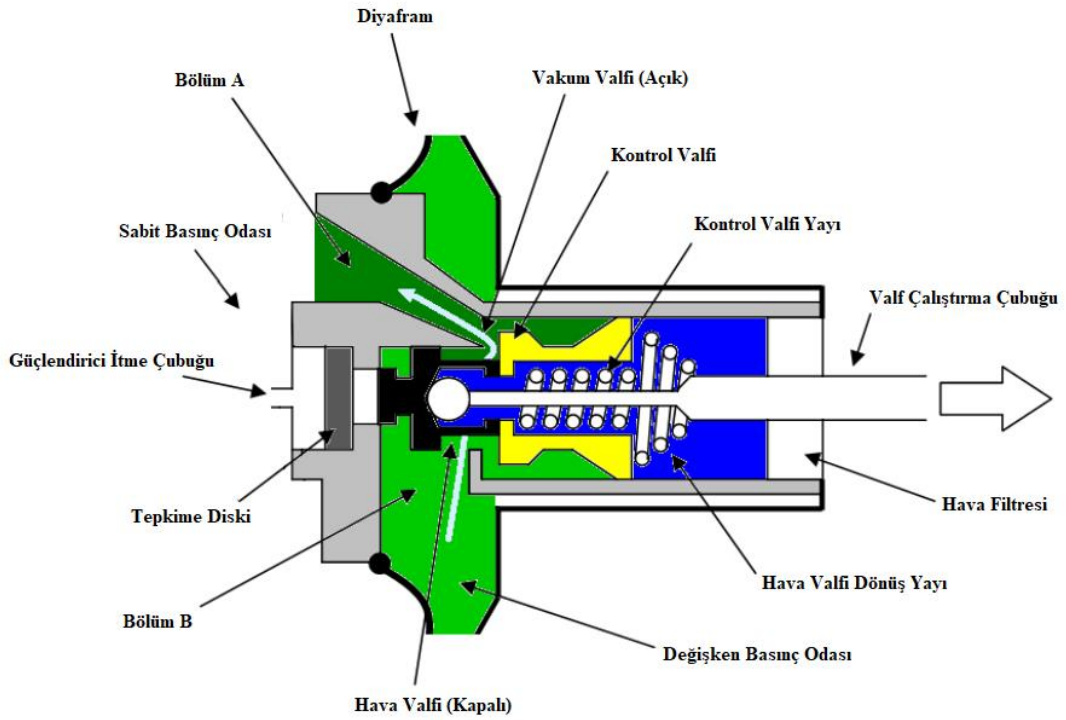
Şekil 2.3. Frene basıldığında fren servosunun çalışması (Heisler, 1999)

Dinamik basınç odasına giren hava miktarı, sürücü tarafından fren pedalına uygulanan kuvvete bağlıdır. Frener tutulduğunda, sabit basınç odası ile dinamik basınç odası arasındaki basınç farkı, pistonu sola doğru hareket ettirerek bir frenleme kuvveti uygulamasına neden olur. Frener tutulduğunda fren servosunun çalışma mantığı Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Frenler tutulduğunda fren servosunun çalışması (Heisler, 1999)

Frenler serbest bırakıldığında ise, valf çalıştırma çubuğu ve hava valfi, hava valfi geri dönüş yayı tarafından sağa hareket ettirilir. Bu durum, hava valfinin kontrol valfiyle temas etmesine neden olarak atmosferik basıncın dinamik basınç odasına girmesini engeller. Aynı zamanda kontrol valfi yayı geri çekilir ve kontrol valfinin A bölümünü B bölümüne bağlayan vakum valfinden uzaklaşmasına neden olur. Böylece, dinamik basınç odasından gelen basıncın sabit basınç odasına akmasına izin verilerek basınç farkı ortadan kaldırılır. Böylece yükseltici frenlerin uygulanmadığı aşamaya geri döner. Frenler bırakıldığında fren servosunun çalışma mantığı Şekil 2.5'te verilmiştir.



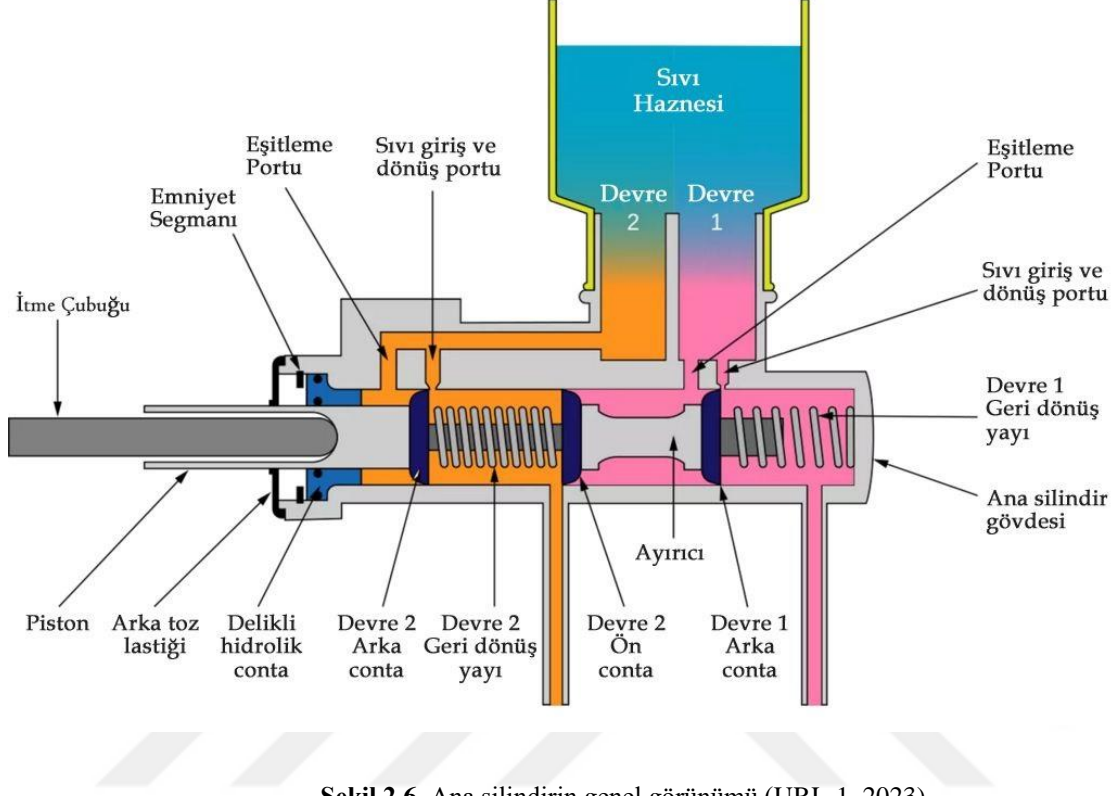
Şekil 2.5. Frenler bırakıldığında fren servosunun çalışması (Heisler, 1999)

### 2.1.3. Ana silindir

Ana silindirin görevi, fren pedalı ve fren servosu tarafından oluşturulan kuvveti bir silindir ve piston vasıtasıyla hidrolik basınca dönüştürmektir. Bir ana silindirin en basit yapısı bir silindir basınç odası ve bir rezervuar odası olmak üzere iki hazneye sahiptir (Heisler, 1999). Rezervuar odası, sıcaklık değişimi veya fren balatasında aşınma olması durumunda fren hidroliği hacmindeki herhangi bir değişikliği telafi eder. Her zaman sıvı ile dolu olan silindir basınç odası, bir itme çubuğuna bağlı bir piston içerir. Pistonun her iki ucu, herhangi bir sıvı sızıntısını önlemek için contalarla donatılmıştır.

Ana silindirin, frenler uygulandığında ve frenler bırakıldığında meydana gelen iki farklı çalışma modu bulunmaktadır. Fren uygularken, fren pedalı ve fren servosu kuvvetleri itme çubuğu boyunca hareket eder ve pistonu silindir boyunca iter. Böylece, rezervuar bölmesine bağlı olan kompanzasyon portu kapanır ve silindirdeki sıvı sıkıştırılır. Sıkıştırma sonrasında ana silindir içindeki sıvı basıncı artar ve sıvı fren

hatlarının içine girmeye zorlanır (Heisler, 1999). Ana silindirin yapısı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



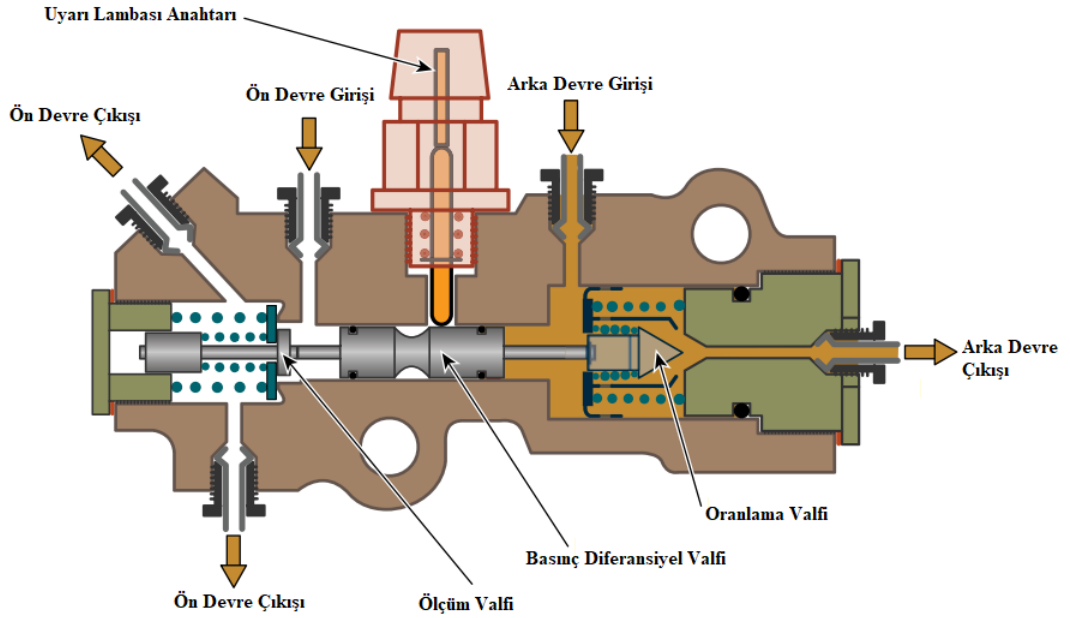
Şekil 2.6. Ana silindirin genel görünümü (URL-1, 2023)

Fren pedalı bırakıldığında, geri dönüş yayı, pistonu orijinal konumuna geri getirir. Bu durum, ana silindirde bir basınç düşüşüne neden olur. Böylece pistonun etrafındaki sıvı basınç odasına akar ve iki taraf arasındaki basınç farkını geçici olarak dengelenmesini sağlar. Güvenlik nedeniyle günümüz araçların tamamı çift devreli ana silindirler sistemine sahiptir (DeMers, 2008). Yani iki bağımsız basınç odasına sahip bir ana silindirden çalışan iki ayrı hidrolik fren devresine sahiptirler. Hidrolik devrelerden birinde bir arıza olursa, diğeri daha az frenleme kuvvetiyle çalışmaya devam edecektir (Şekil 2.6). İkinci bir avantajı da, hangi devre arızalanırsa arızalansın, her zaman çalışır durumda olan en az bir ön fren olacaktır (Goodnight ve VanGelder, 2019).

#### 2.1.4. Fren oranlama valfi

Bir aracın yavaşlaması sırasında, aracın arka aksından aracın ön aksına bir ağırlık aktarımı olur. Tekerlek kilitlenmeden önce uygulanabilecek fren kuvveti miktarı, her

tekerlek üzerindeki ağırlık miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ana silindirden gelen fren hattı basıncı dört tekerlekte de aynı olması durumunda, sert fren manevralarında aracın dengesinin bozulmasına neden olur. Bu sorunu çözmek için araçlarda fren oranlama valfi kullanılmaktadır. Ayrıca araçta ön veya arka fren sisteminde bir arıza meydana geldiğinde uyarı lambası makarası ileri doğru hareket ederek uyarı ışığını aktif eder. Ön fren sisteminin arızalanması durumunda, arka frenlerde basınç yükselir. Oranlama valfi arka frenlerin tam basınç ile yüklenerek kitlenmesini engeller. Arka frenlerde bir arıza olmasında ise, basınca duyarlı oranlama valfi bu durumda çalışmaz tüm basınç ön frenlere aktarılır. Şekil 2.7’de ön fren arıza olması durumunda oranlama valfinin çalışmasını göstermektedir.



Şekil 2.7. Ön fren arızasında oranlama valfinin hareketi (Goodnight ve VanGelder, 2019)

Fren oranlama valfi, hem ön hem de arka frenler için önceden eşit tanımlanmış belirli bir basınca izin verir ve bu değer aşıldığında ise sadece ön fren hattı basıncı artar. Bu sistemin dezavantajı, ön frenler kilitlendikten sonra, fren pedalı kuvveti ne kadar artarsa artsın, arka fren hattı basıncı sabit olacağından araç yavaşlaması daha fazla artmayacaktır (Goodnight ve VanGelder, 2019).

## 2.2. Faydalı Frenleme

EA'lardaki frenleme karakteristiklerinin incelenmesi için elektrik makinesinden bataryaya kadar olan enerji akışı bilinmesi gerekir. Bir döner sistemde güç, moment ve açısal hızına eşittir bu durum Formül 2.1'de ifade edilmiştir. Bu güç motor miline indirildiğindeki durumu Formül 2.2'deki gibi ifade edilir.

$$P_{tk}(t) = w_{tk}(t) \cdot r_{tk}(t) \quad (2.1)$$

$$P_{tk}(t) = \eta_{ak} \cdot P_{EM}(t) \quad (2.2)$$

Formüllerde,

$P_{tk}(t)$  ; araç tekerlerindeki gücü (*Watt*),

$w_{tk}(t)$  ; tekerlek hızını (*I/s*),

$r_{tk}(t)$  ; tekerlek momentini (*N.m*),

$\eta_{ak}(t)$  ; aktarma bölümlerindeki verimi,

$P_{EM}(t)$  ; elektrik makinesinin gücünü (*Watt*) temsil etmektedir.

EA'lardaki fırçasız bir doğru akım (DA) motorunun bataryadan beslenmesi durumundaki geçerli koşulları Formül 2.3'te verilmiştir.

$$E_a - V_{bt} = I_{fr} \cdot (R_{bt} + R_{PP} + R_{SC}) \quad (2.3)$$

Formülde,

$E_a$  ; frenleme esnasında endüklenen gerilim (*V*),

$V_{bt}$  ; bataryanın frenleme anındaki uç gerilimi (*V*),

$I_{fr}$  ; fren akımı (*A*),

$R_{bt}$  ; bataryanın iç direnci (*ohm*),

$R_{PP}$  ; elektrik makinesinin direnci (*ohm*),

$R_{SC}$  ; yarı iletken malzemelerin direncini (*ohm*) temsil etmektedir.

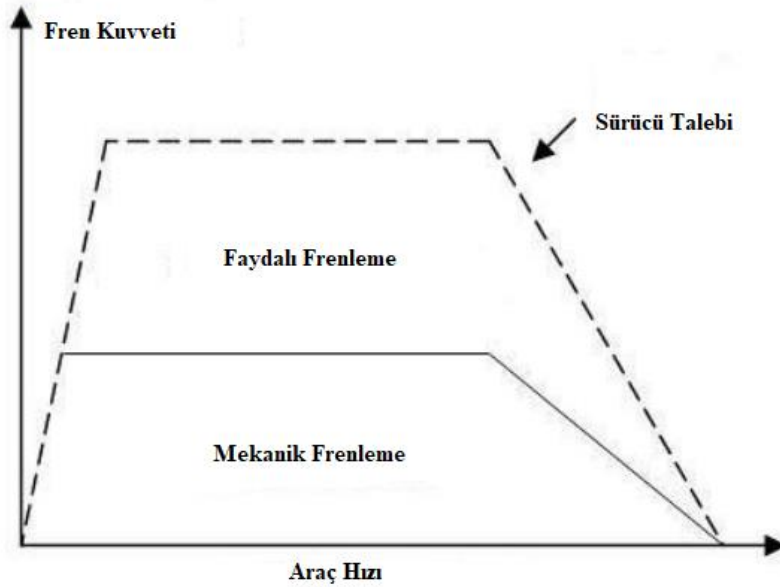
EA'ların, elektriksel frenlemesi için üç farklı metot kullanılmaktadır. İlk olarak faydalı frenleme olarak bilinen enerji geri kazanımlı frenlemedir. Bu frenlemede araç belirli bir hızın üzerindeki iken araç verimini artıracak şekilde frenleme yapılarak bataryaya enerji depolaması gerçekleştirir. EA'larda frenleme karakteristiği bağlı olarak belirli hızların altında faydalı frenlemeden enerji geri kazanımı elde edilememektedir. Faydalı frenleme işlemi araç üzerinde meydana gelen tüm kayıplar çıkarıldıktan sonra üretilen gerilim batarya geriliminden daha yüksek bir gerilim olması durumunda gerçekleşir (Gökçe ve ark., 2013; Gökçe, 2015). Bataryanın şarj edilebilmesi için frenleme sisteminde endüklenmesi gereken gerilim Formül 2.4'de verilmiştir. Frenleme esnasında bu gerilimin altında gerilim üretilmesi durumunda faydalı frenleme gerçekleşmeyecektir.

$$E_a > V_{bt} + (R_{bt} + R_{PP} + R_{SC}) \cdot I_{fr} \quad (2.4)$$

EA'larda frenleme esnasında gerilim değeri Formül 2.4'te verilen değerin altında kalması durumunda gerilim yükseltmesi yapılarak frenleme esnasında kazanılan enerjinin bataryalarda depolaması işlemi gerçekleştirilebilir. Bu işlem frenleme momentinin seviyesini koruyacak şekilde batarya şarj akımının kontrolü gerçekleştirilerek sağlanabilir. EA'larda faydalı frenlemeden de daha önemli bir öncelik ise batarya güvenliğinin sağlanmasıdır. Faydalı frenlemeyi sınırlayıcı bir diğer durum bataryanın tam şarjlı olma durumudur. Faydalı frenleme için yeterli hız seviyesine ulaşılsa dahi bataryanın tam şarjlı yani dolu olması durumunda batarya sanki bir direnç gibi davranmaya başlar. Şarj akımı bataryadaki bu yüksek iç direnç üzerinde yüksek miktarda ısı kaybı oluşmasına ve sonuçta bataryanın ısınmasına ve sonrasında yanmasına veya patlamasına neden olabilecek etkilere sebep olabilmektedir. Bu esnada batarya maruz kaldığı şarj akımının karesi ile doğru orantılı olarak tepki verir (Gozález ve ark., 2013). Formül 2.4'te verilen frenleme akımı ( $I_{fr}$ ) bataryanın kabul edeceği maksimum şarj akım değerini aştığında faydalı frenleme işlemi gerçekleştirilmesi kendisinden beklenen fonksiyonu icra edemez.

### 2.2.1. Paralel faydalı frenleme

Paralel rejeneratif frenleme sırasında hem elektrik motoru hem de mekanik fren sistemi aracı yavaşlatmak için her zaman birlikte çalışır (Ehsani ve ark., 2004; González-Gil ve ark., 2013). Şekil 2.8’de paralel faydalı frenlemenin çalışma stratejisi gösterilmektedir. Mekanik frenleme, fren pedalı kuvveti ile kontrol edildiğinden, aracın kinetik enerjisinin bir bölümü de ısıya çevirmektedir. Bu durum verimli bir faydalı frenleme yöntemi değildir. Ancak, paralel faydalı frenleme basit ve uygun maliyetli olmasından avantajlıdır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için mekanik fren sisteminde çok az değişiklik yapılması yeterlidir. Böylece elektrik motorunun kontrol algoritmaları araca kolayca uygulanabilir. Bu yöntemin ayrıca, faydalı frenleme sisteminin arızalanması durumunda mekanik fren sisteminin her zaman yedek olarak bulunması gibi ek bir avantajı da vardır.

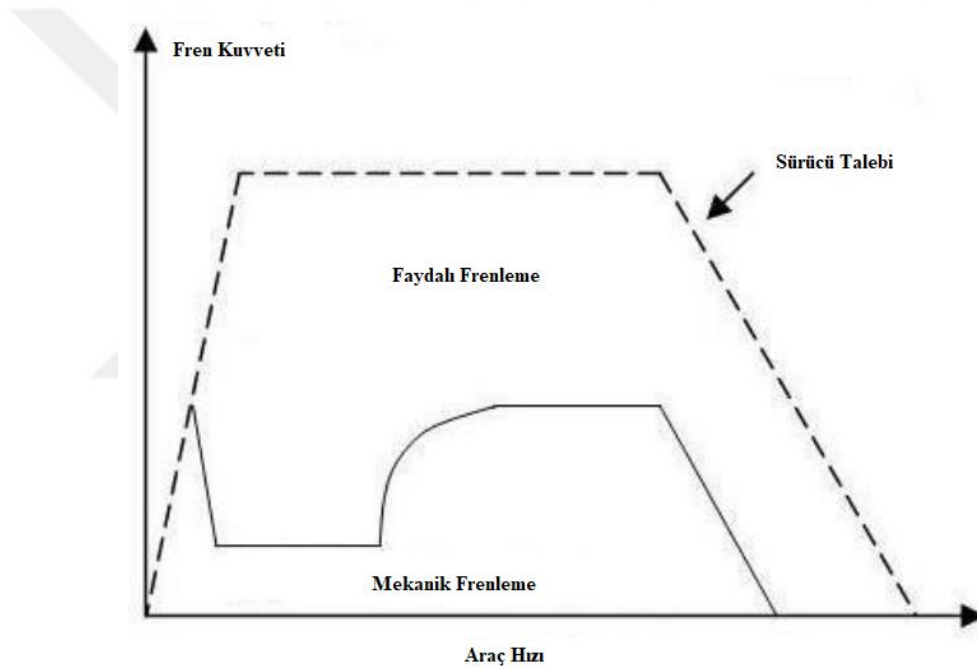


Şekil 2.8. Paralel faydalı frenleme sistemi stratejisi (Nakamura ve ark., 2002)

### 2.2.2. Seri faydalı frenleme

Seri faydalı frenleme sırasında yalnızca elektrik motoru frenleme için kullanılır. Enerji depolama sistemi artık daha fazla enerji depolayamadığında ise mekanik frenler devreye girer (Ehsani ve ark., 2004). Bu yöntemde, faydalı frenleme sisteminin fren

kuvveti seviyesi ayarlanabilir. Bu sistemin avantajı, aracın kinetik enerjisinin büyük bir kısmı elektrik enerjisine çeviren en verimli faydalı frenleme yöntemi olmasıdır. Ayrıca mekanik frenin, paralel faydalı fren sistemine göre daha az kullanılmasından dolayı mekanik malzeme yaşlanması daha yavaş olmaktadır. Şekil 2.9’da seri faydalı frenlemenin çalışma stratejisi gösterilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise, sisteme birçok ek maliyet ve karmaşıklık getirmesidir. Bu yöntemin düzgün çalışması için, ya bir elektro-hidrolik fren (EHB) ya da bir elektro-mekanik fren (EMB) kullanan bir kablolu fren sistemi kullanılmalıdır. Bu tip frenlerin her ikisi de, maliyetli fren pedalı simülatörleri ve fren sistemleri gerektirir. Bu sistemler kablolu fren sistemi olduğundan sensör, işlemci ve kablolama gibi güvenlik için gerekli olan birçok ek malzeme gereklidir.



Şekil 2.9. Seri faydalı frenleme sistemi stratejisi (Nakamura ve ark., 2002)

### 2.3. Dinamik Frenleme

Dinamik frenlemede, faydalı frenlemeden farklı olarak batarya direncinin yerini frenleme direnci alır (Gökçe ve ark., 2013). Şekil 2.10’da aracın normal çalışma anını ve motora uygulanan dinamik frenleme yöntemi gösterilmektedir. Formül 2.5 frenleme esnasında endüklenen gerilimi ve Formül 2.6 frenlemede oluşan momenti ifade etmektedir.

$$E_a = I_{fr} \cdot (R_{fr} + R_{PP} + R_{SC}) \quad (2.5)$$

$$T = k_t \cdot I_{fr} = k_t \cdot \frac{E_a}{R_{fr} + R_{PP} + R_{SC}} \quad (2.6)$$

Formüllerde,

$E_a$ ; frenleme esnasında endüklenen gerilim (V),

$T$ ; frenleme momenti (N.m),

$k_t$ ; endüvi akımı ile moment arasındaki oran,

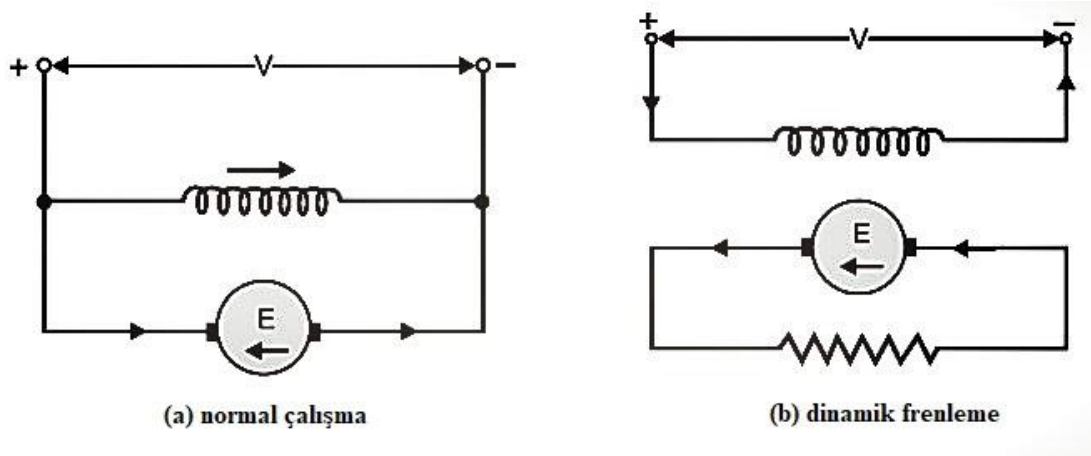
$I_{fr}$ ; fren akımı (A),

$R_{fr}$ ; bataryanın iç direnci (ohm),

$R_{PP}$ ; elektrik makinesinin direnci (ohm),

$R_{SC}$ ; yarı iletken malzemelerin direncini (ohm) temsil etmektedir.

Dinamik frenlemeye aynı zamanda elektriksel frenlemede denilir. Dinamik frenlemede bobine uygulanacak gerilim değeri, aracın hızına bağlıdır. Frenleme momenti için yeterli akımın oluşması gerekir. Araç hızı düşük olduğu durumlarda yeterli akım değerine ulaşamayabilir bu durumda gerilim yükseltilmesi işlemi ya da direnç değeri düşürme işlemi gerçekleştirilir. Güçlü motorlarda ve araç ağırlığının yüksek olduğu durumlarda yüksek momente ihtiyaç duyulur. Frenleme esnasında sargılardan geçen akım motorun nominal akımını geçmemelidir (Gökçe ve ark., 2013; Gökçe, 2015). Aksi halde stator sargıları zamanla ısınarak sargı izolasyonunun bozulmasına ve sonuçta sargıların kısa devre olarak kendisinden beklenen görevi yerine getirememesine ve araç güvenliği tehlikeye girmesine sebebiyet verecek durumlara yol açabilir.



Şekil 2.10. a) normal çalışma anı b) direnç üzerinden dinamik frenleme

## 2.4. Ters Akımla Frenleme

Ters akımla frenleme EA'larda ani frenleme yapılması gereken durumlarda uygulanabilir. Motor devrinin yönü ani olarak değiştirilmesi prensibine dayalı bir frenleme çeşididir. Ters akımla frenleme yüksek eylemsizliğe sahip ve ani durdurma gerektiren makinelerde uygulanabilir (Kangkang ve ark., 2011). Bu tip frenlemede enerji harcanarak motor endüvi sargılarından ters yönde akım akması sağlanarak ve frenleme işlemi gerçekleştirilir. Yani bataryadan motora akım akması için motora uygulanan gerilimin yönü değiştirilerek bataryadan motora doğru akım akması sağlanacak şekilde işlem gerçekleştirilir. Şekil 2.11'de aracın normal çalışma anı ve motora uygulanan ters akımla frenleme yöntemi gösterilmiştir. Frenleme karakteristiği Formül 2.7 ve 2.8'de ifade edilmektedir.

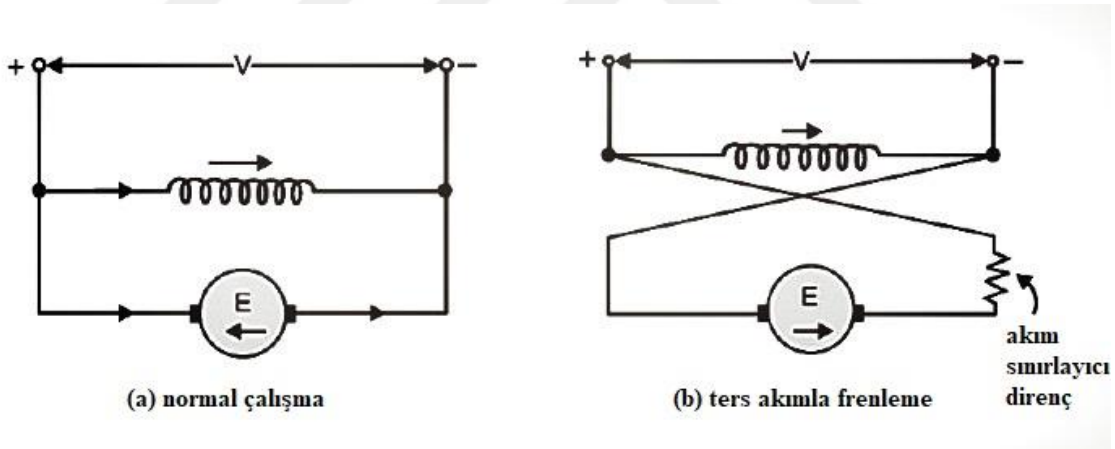
$$V_{ters} + E_a = I_{fr} \cdot (R_{PP} + R_{SC}) \quad (2.7)$$

$$T = k_t \cdot I_{fr} = k_t \cdot \frac{V_{ters} + E_a}{R_{PP} + R_{SC}} \quad (2.8)$$

Ters akımla frenleme yapılacak makinelerin tasarımı aşamasında bazı dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır. Bunlardan birisi frenleme işlemi başladığında sistem üzerinde ciddi bir akım oluşacaktır, bu durumda cihazların zarar görmemesi için elektronik cihazların doğru seçilmesi çok büyük önem arz etmesidir. Bir başka etki motorun mekanik yapısı frenleme esnasında aşırı mekanik zorlanmalara maruz kalacaktır, bunun içinde motor yatak sistemleri ve rotor oluşması muhtemel bu zorlanmalara

dayanacak şekilde imal edilmesi gerekir. Burada belirtilen olumsuzlukların sistem üzerindeki olumsuz etkileri dolayısıyla bu frenleme türü EA'larda menzilin azalmasına istenen durumlarda yani panik frenleme dışında kullanılmasının tercih edilmesi uygun değildir (Kangkang ve ark., 2011). Ayrıca yine elektrikli araçlarda bu tip frenlemenin yanı sıra elektrikselsel frenlemeye ek olarak mekanik frenlemede tamamlayıcı olarak tercih edilir.

Ters akımla motorların ani olarak yönü değişebilir. Bu yöntemle yapılan frenleme ani frenlemede denilebilir. Ani frenlemede yönteminde motor miline ters döndürme momenti uygulanır. Ters akımla ani frenleme de mekanik parçalar ani fren durumunda zorlanmaya maruz kalarak eğilme durumu söz konusu olabilir. Bu frenleme yöntemi EA'ların daha kısa mesafede durmasına yardımcı olur. Konvansiyonel bir araç 100 km/saat bir hızla ilerler iken panik frenleme yaptığında reaksiyon mesafesi ile birlikte ortalama 90 metredir (Greibe, 2008). Bu mesafe EA'larda ek bir frenleme olan ters akımla frenleme yönteminin kullanılması ile daha aşağılara çekilebilir.

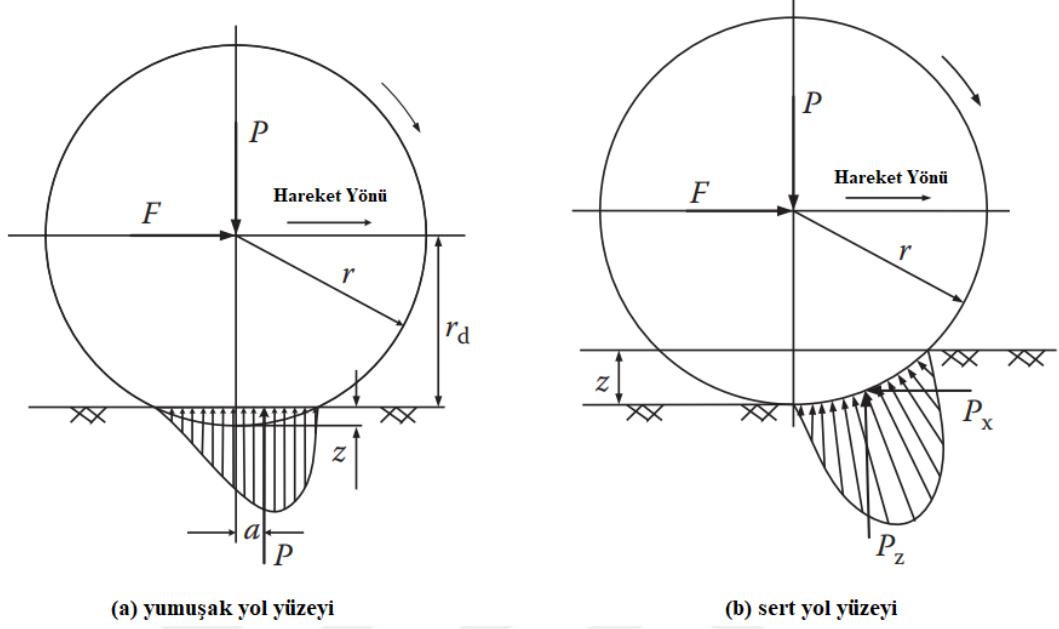


Şekil 2.11. a) normal çalışma anı b) direnç üzerinden ters akımla frenleme

## 2.5. İdeal ve Güvenli Frenleme

Güvenli frenlemeyi sağlamak için öncelikle araç dinamikleri incelenmelidir. Bir aracı güvenli bir şekilde hareket ettirmek için yolla temas noktaları olan tekerlekler her zaman yola tutunmalıdır. Nitekim lastik tekerleklerin tabanında meydana gelen "kayma" aracı hareket ettirir ve yönlendirir. Lastik pozitif moment altındayken yolla temas ettiğinde, sürtüş yönünde sıkışır ve lastiğin arka tarafı gerilir (Ehsani ve ark., 2004). Şekil

2.12’de pozitif momentin yumuşak ve sert yol yüzeyinde lastikte oluşturduğu etki gösterilmektedir.



Şekil 2.12. a) sert ve b) yumuşak yol yüzeylerinde lastik sapması ve yuvarlanma direnci (Ehsani ve ark., 2004)

Şekil 2.12 (a)’da gösterildiği gibi, temas alanının ön yarısındaki basınç arka yarısındakinden daha büyüktür. Bu durum zemin tepki kuvvetinin bir miktar öne kaymasına neden olur. Öne doğru kayan bu zemin tepki kuvveti, tekerlek merkezine etki eden normal yük ile birlikte tekerleğin yuvarlanmasına karşı koyan bir moment oluşturur. Yumuşak yüzeylerde, yuvarlanma direnci esas olarak Şekil 2.12 (b)’de gösterildiği gibi zemin yüzeyinin deformasyonundan kaynaklanır. Zemin reaksiyon kuvveti neredeyse tamamen öndeki yarıya kayar. Ortaya çıkan yer tepki kuvvetinin öne kaymasıyla oluşan moment, Şekil 2.12 (a)’da gösterildiği gibi yuvarlanma direnci momenti olarak adlandırılır. Lastik tabanında oluşan pozitif ve negatif momentler sırasıyla Formül 2.9 ve 2.10’da ifade edilmiştir.

$$s = \left(1 - \frac{V}{r.w}\right) \times \%100 \quad (2.9)$$

$$s = \left(1 - \frac{r.w}{V}\right) \times \%100 \quad (2.10)$$

Formüllerde,

$S$  ; kayma,

$V$  ; aracın hızı,

$r$  ; tekerlek yarıçapı,

$W$  ; tekerlek dönüş hızını temsil etmektedir.

Bir noktadan sonra tekerleğe bir moment uygulandığında, bu baz reaksiyonu tekerlek ile yol arasındaki bağı koparacak kadar büyür. Tahrik ve fren birimleri dışında, bir aracın tekerleklerinin bu birimlerin etkilerini yola iletme yeteneği, aracın çekiş veya fren performansını belirler. Bu, tekerlek ve yol yapışkan bir etkiye sahip olduğu sürece mümkündür. Genelde, bu etki genel araç performansını sınırlar. Bu etki, özellikle ıslak, çamurlu veya buzlu yollarda minimum düzeyde olduğundan, aracın hareket etme ve durma kabiliyetini de büyük ölçüde azalır. Tekerleğin yol ile temasının en üst seviyede olduğu durum Formül 2.11’de ifade edilmiştir.

$$F_{maks} = P_n \cdot \mu \quad (2.11)$$

Formülde,

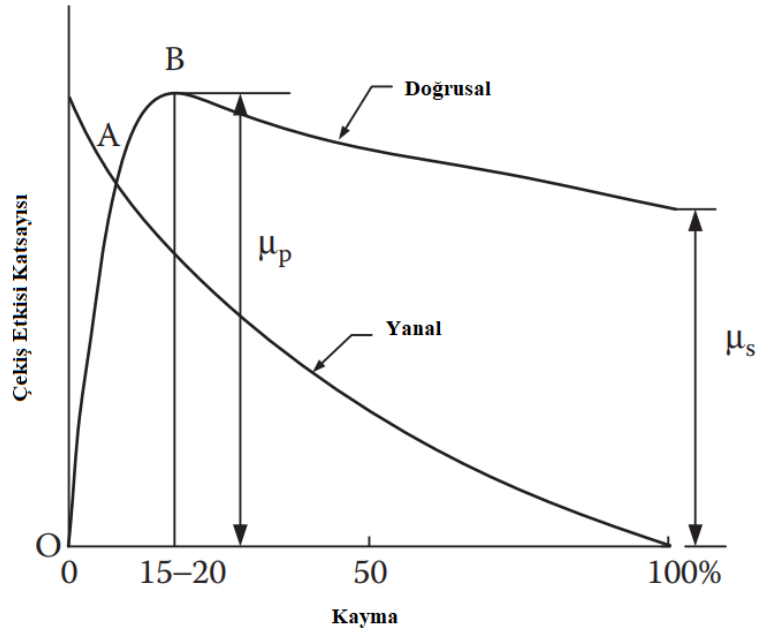
$F_{maks}$  ; maksimum kuvvet ( $N$ ),

$P_n$  ; tekerlek yükü ( $J/m$ ),

$\mu$  ; yol temas katsayısını temsil etmektedir.

Şekil 2.13’te gösterildiği üzere çekiş gücü ile kayma değeriyle neredeyse doğrusal orantılıdır. Lastiğe bir çekiş torku uygulandığında, lastik-zemin temas noktasında bir çekiş kuvveti oluşur. Aynı zamanda, temas alanının önündeki ve içindeki lastik sırtı sıkıştırmaya maruz kalır. Lastiğin yan duvarında buna karşılık gelen bir kayma deformasyonu da gelişir. Sırt elemanları temas bölgesine girmeden önce sıkıştırıldığından, lastiğin kat ettiği mesafe serbest yuvarlanan bir lastikteki mesafeden daha az olacaktır. Lastiğin neredeyse doğrusal elastik özelliği nedeniyle, çekiş gücü-kayma eğrisi neredeyse doğrusaldır. Tekerlek torkunun ve çekiş gücünün daha da artması, lastik sırtının bir kısmının zeminde kaymasına neden olur. Bu koşullar altında, çekme kuvveti ve kayma arasındaki ilişki doğrusal değildir. Bu durum, Şekil 2.13’te gösterildiği

gibi eğrinin A-B bölümüne karşılık gelir. En yüksek çekiş gücüne %15-%20'lik bir kaymada ulaşılır (Ehsani ve ark., 2004).



Şekil 2.13. Kayma ve temas katsayıları arasındaki ilişki (Ehsani ve ark., 2004)

Şekil 2.13'te görüldüğü üzere maksimum  $\mu_p$  noktasından sonra tekerlekte kararsız durum oluşur ve patinaj ve çekiş arasındaki ilişki ters orantılı olarak değişir. Araçların kayma durumları yol yüzeyine göre değişiklik gösterir. Tablo 2.1'de çeşitli yol yüzeylerine ait tutunma ve patinaj değerleri verilmiştir (Ehsani ve ark., 2004).

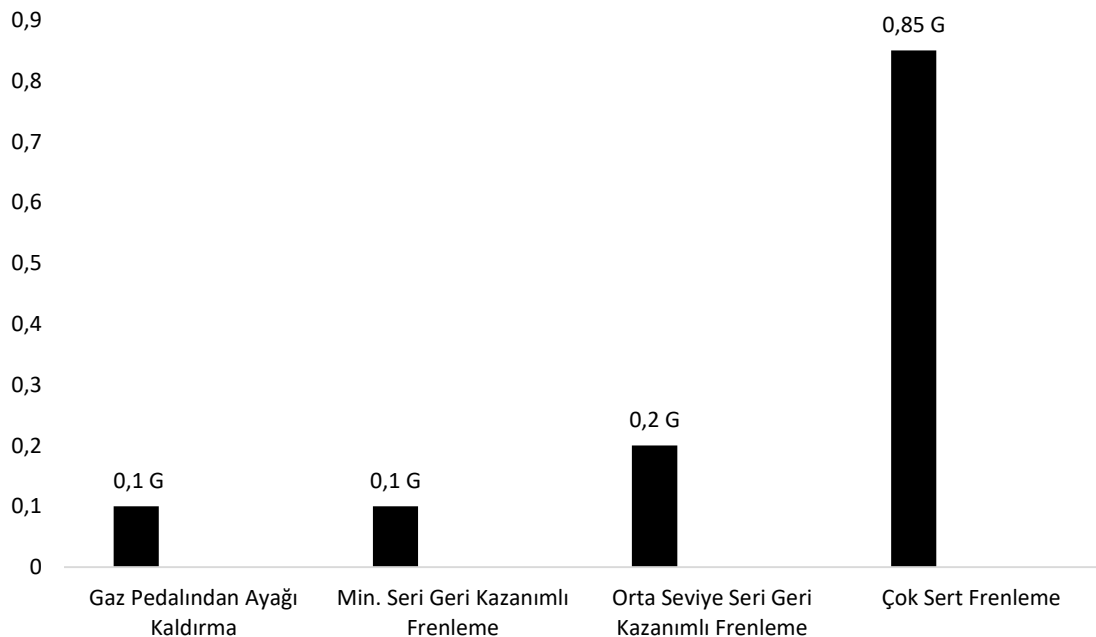
Tablo 2.1. Çeşitli yol yüzeylerinde temas katsayısı

Yüzey	Maksimum değer ( $\mu_p$ )	Patinaj değeri ( $\mu_s$ )
Asfalt kuru zemin	0,8-0,9	0,75
Asfalt ıslak zemin	0,5-0,7	0,45-0,6
Çakıl zemin	0,6	0,55
Toprak kuru zemin	0,68	0,65
Toprak ıslak zemin	0,55	0,4-0,5
Sıkışmış kar zemin	0,2	0,15
Buz zemin	0,1	0,07

Aracın frenlemesi maksimum temas (tutunma) değeri ile sınırlı bir fren kuvveti oluşturur. Tablo 2.1 incelendiğinde en zayıf frenlemenin buzlu zeminde, en kalite frenleme kuvvetinin ise kuru bir asfalt zeminde gerçekleşeceği görülmektedir. Gelişmiş bir frenleme sistemi bulunmayan bir araçta ön ve arka tekerler arasındaki bir orana göre standart bir frenleme yapılır. Araç dinamiği açısından ön frenlerin kitlenmesi arka tekerlerin kitlenmesine göre güvenlidir. Arka frenler kitlendiğinde araçtaki savrulma ve yalpalanma oranı artacaktır. Bu durumda ön tekerlerin kitlenmesi tercih edilir. Günümüzde kullanılan araçlarda gelişmiş elektronik sistemler ile her bir teker üzerine farklı fren kuvveti uygulanarak güvenli frenleme sağlanır.

## 2.6. Konforlu Frenleme

Konvansiyonel araçlarda sürücü frenleme yaptığında sürüş deneyimi ile ters orantılı sürede frenleme kuvvetine adapte olur. Bu sayede frene hangi kuvvete basması gerektiğini ve hangi sürede duracağını rahatlıkla tahmin eder. Benzer şekilde sürücü ayağını frenden çektiğinde aracın negatif moment etkisi ile ne zaman yavaşlayacağını bilir. Alışlagelmiş bu durum EA'larda da uygulanarak konforlu bir fren sistemi sunulmalıdır. Konforlu frenleme için Şekil 2.14'te çeşitli durumlara bağlı olarak frenleme ivmeleri gösterilmiştir (Halderman ve Martin, 2008).



Şekil 2.14. Farklı durumlar için frenleme ivmeleri ( $G=10 \text{ m/s}^2$ )

Araç içerisindeki bir cismin yer değiştirmesi  $3,5 \text{ m/s}^2$  üzerinde bir ivmelenmeden sonra başlar. Bu durumda bir aracın konforlu bir frenlemesi maksimum  $3 \text{ m/s}^2$ 'dir. Binek bir aracın maksimum yavaşlama ivmesi ise  $5-10 \text{ m/s}^2$  arasındadır. Bu veriler doğrultusunda bir aracın yavaşlama karakteristiği Formül 2.12 ve 2.13'teki gibi hesaplanır.

$$F_{fren} = (M \cdot j) - F_{yük} \quad (2.12)$$

$$T_{fren} = r_{tekerlek} \cdot F_{Fren} \quad (2.13)$$

Formüllerde,

$F_{fren}$  ; araç tekerlerindeki frenleme kuvveti ( $N$ ),

$F_{yük}$  ; tekerlek üzerindeki araç yükü ( $N$ ),

$T_{fren}$  ; araç üzerindeki frenleme momenti ( $N.m$ ),

$r_{tekerlek}$  ; araç tekerlek yarıçapı ( $m$ ),

$M$  ; araç kütlesi ( $kg$ ),

$j$  ; frenlemesini ivmesini ( $m/s^2$ ) temsil etmektedir.

Bir aracın yavaşlamasında, araca etki eden yükler ve frenleme momenti rol oynar. Araçta fren momenti ile araç hızı ters orantılı olarak çalışır. Yani araca etki eden toplam kuvvetlerde, araç hızı ve yük kuvveti arasında hızın karesi ile orantılı bir ilişki vardır.

## 2.7. Elektrikli Araçlarda Fren Pedal Hissiyatı

EA'larda kullanılan elektrikli tabanlı frenlemenin mekanik sistemlerde olduğu gibi fiziksel bir bağlantı yoktur. Mekanik sistemlerde pedala uygulanan kuvvet oranında karşı bir kuvvet uygulanır ve sürücüye bir geri besleme verilerek fren kuvvetini ayarlamasına yardımcı olur (Zhang ve ark., 2008). Aynı pedal hissiyatı yalnızca elektrikli tabanlı frenleme uygulanan EA'larda da oluşturularak sürücünün daha konforlu ve güvenli frenleme yapması sağlanmalıdır.

Faydalı frenleme tek başına tüm frenleme gereksinimlerini karşılayamaz. Sağlayabileceği yavaşlama seviyesinin sınırları vardır ve genel olarak  $3 \text{ m/s}^2$ 'den daha küçük frenleme torkunu sağlamak için motordan gelen geri elektromanyetik alana ihtiyaç duyar, bu da hız  $0 \text{ km/s}$ 'ye yaklaştıkça azalır (Goodnight ve VanGelder, 2018). Bu nedenle mekanik frenin bu açığı kapatması gerekir. Genellikle, faydalı fren ve mekanik fren sistemlerinden gelen frenleme torkunun harmanlanmasıyla elde edilir ve birlikte genel yavaşlama sağlanır.

İki sistemi harmanlamak için fren pedalı hidrolik sistemden ayrılır ve fren kontrolörü birleşik bir yavaşlama elde etmek için mekanik freni kontrol eder. Bu pedal karakteristiği, gerekli yavaşlamayı üretmek için fren kontrolöründe kullanılan bir sensör tarafından telli fren sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir (Zhao ve ark., 2019). Kontrolör, her bir sistem tarafından sağlanacak frenleme oranını hesaplar. Çoğu fren uygulamasında hem faydalı hem de mekanik frenleme gerekir (Hua ve ark., 2023).

Bu sistemlerin geliştirilmesi ve test edilmesi daha karmaşıktır ve optimum fren hissi üretmek zordur. Paralel faydalı frenlemenin uygulandığı EA'larda doğru ölçümleme ile pedal hissiyatı kaybı olmadan uygulanabilir. Seri faydalı frenleme sisteminde ise aynı hissiyat sağlanması için araçta daha fazla geliştirme yapılması gereklidir. Fren hissini ölçmek ve geliştirmek için kullanılan yöntemlerin sınırlamaları vardır ve simülasyon testleri bu sistemleri geliştirmek için gereken hassasiyet seviyesini tutarlı bir şekilde sağlayamaz. Bu yüzden çalışmalar gerçek ortam testleri ile bir uzman sürücü tarafından gerçekleştirilmelidir.

### 3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TEKNOLOJİSİ

#### 3.1. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerini aşağıda belirtilen şekilde iki genel gruba ayırmak mümkündür.

- Ticari sistemler
- Geleceğin sistemleri

##### 3.1.1. Ticari sistemler

Ticari sistemleri aşağıda belirtilen şekilde dört genel gruba ayırmak mümkündür.

- Kurşun asit bataryalar
- Nikel metal hidrit bataryalar
- Nikel kadmiyum bataryalar
- Lityum iyon bataryalar

##### 3.1.1.1. Kurşun asit bataryalar

1859’da icat edilen kurşun asitli batarya hem içten yanmalı hem de elektrik motorlu birçok araçta halen kullanılmaktadır. 1899’da bu teknolojiye sahip EA “La Jamais Contente” aslında içten yanmalı motorlu araçlardan çok önce, 100 km/s’yi aşan ilk otomobil olmuştur (Beaume ve Midler, 2009). Günümüzde, kurşun-asit bataryalar artık çekiş kontrolü için değil, marş motoru gibi içten yanmalı motorlara özgü bileşenlerin elektrik devresine güç sağlamak için kullanılmaktadır (Gurz ve ark., 2017). Kurşun asit bataryalar, hacmine ve ağırlığına rağmen yalnızca sınırlı bir kapasite sunmaktadır. Ancak hem ucuz hem de üretilmesi ve geri dönüştürülmesi kolay olma avantajlarına sahiptir. 1980’li yıllara kadar EA’lar için ana enerji depolama mekanizması olarak kullanılan bu sistem, hızla yerini diğer daha verimli teknolojilere bırakmıştır (Andwari ve ark., 2017).

Kurşun asit bataryaların anot malzemesinde Pb, katot malzemesinde ise PbO<sub>2</sub> yer almaktadır. Kurşun asit bataryaların elektrokimyasal reaksiyonu Formül 3.1’de

verilmiştir. Bu reaksiyonun anma gerilim değeri yaklaşık 2V'dur ve %85 ile %90 arasında enerji verimliliğine sahiptir (Biçer ve ark., 2021).



Bu batarya teknolojisinin dünyada yaygın olarak tercih edilme sebebi kolay üretim teknolojisine dayanır. Kurşun asit bataryalar dayanıklı, güvenilir ve neredeyse hiç bakım gerektirmez (Biçer ve ark., 2021).

### 3.1.1.2. Nikel kadmiyum bataryalar

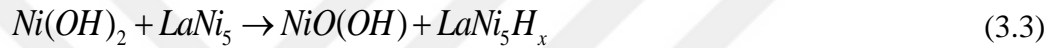
Nikel kadmiyum bataryalar 1899 yılında yüksek depolama kapasitesine sahip bir batarya olarak üretildi. Anot malzemesinde Cd, katot malzemesinde Ni(OH)<sub>2</sub> ve elektrolit malzemesi olarak KOH yer almaktadır (Sarmah ve ark., 2023). Nikel kadmiyum bataryaların elektrokimyasal reaksiyonu Formül 3.2'de verilmiştir.



Nikel kadmiyum bataryaların anma gerilimi 1,2V'dur (Putois, 1995). Bu bataryaların avantajı servis ömürlerinin yüksek olması ve yüksek akım gerektiren uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılabilmesidir. Ancak bu bataryaların en büyük dezavantajı hafıza etkisidir (Petrovic, 2021). Hafıza etkisi bataryanın tam deşarj edilmeden, şarj edilmesi durumunda tam kapasiteyi verememesidir. Bu durumun yanı sıra ağır metal olan kadmiyum çevre kirliliğine sebep olabilmektedir. Yüksek şarj/deşarj akımı araçlarda kullanıma uygun görünse de, hafıza etkisi bu durumu kısıtlamaktadır. Bu olumsuz durumlara rağmen nikel kadmiyum batarya Citroen AX, Ford Think Car, Peugeot 106 ve Renault Clio gibi araçlarda kullanılmıştır (Özcan ve ark., 2021). Hafıza etkisi, maliyet ve enerji yoğunluğu dikkate alındığında EA'larda nikel kadmiyum bataryaların önemli bir yer alması beklenmemektedir.

### 3.1.1.3. Nikel metal hidrit bataryalar

Nikel kadmiyum bataryalarda yaşanan kadmiyum krizinden dolayı artan maliyetler Ar-Ge çalışmalarını nikel tabanlı olan farklı bir katot maddesi içeren bataryalara yönlendirmiştir (Winter ve ark., 2018). Böylece hem katot maddesi kadmiyum olmayan hem de kurşun asit bataryaların eksikliklerinden arındırılmış bir batarya teknolojisi olarak üretilmiştir. Kurşun asit ve nikel kadmiyum bataryalardan daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir (Omar ve ark., 2014). Nikel metal hidrit bataryalar anot malzemesi olarak metal hidrür ve katot malzemesi olarak  $Ni(OH)_2$  kullanılmaktadır (Winter ve ark., 2018). Nikel metal hidrit bataryaların elektrokimyasal reaksiyonu Formül 3.3'te verilmiştir.



Nikel metal hidrit bataryaların, nikel kadmiyumda olduğu gibi anma gerilimi 1,2V'dur (Furukawa, 1994). Isı toleransı yüksek bu bataryalar, Uninterruptible Power Supply (UPS) ve telekom uygulamalarında kullanılmıştır (Omar ve ark., 2014). 2000'li yılların başında HEA ve EA'larda yaygın olarak kullanılmıştır. Düşük maliyet ve yüksek enerji yoğunluğu bu bataryaların otomotiv sektörüne hakim olmasını sağlamıştır. Ford Escape, Honda Insight, Honda Civic, Honda Accord ve Toyota Prius nikel metal hidrit bataryaların kullanıldığı bazı HEA'lardır (Özcan ve ark., 2021). Nikel fiyatlarının yüksek olması bu bataryaların kullanım alanlarını lityum iyon (Li-iyon) bataryalara bırakmaktadır. Bu nedenle nikel metal hidrit bataryalar EA uygulamalarında güçlü bir aday olarak görülmemektedir.

### 3.1.1.4. Lityum iyon bataryalar

Li-iyon bataryalar, elektrokimyasının temel bir bileşeni olarak lityum iyonlarını kullanan gelişmiş bir batarya teknolojisidir (Etacheri ve ark., 2011). Bir deşarj döngüsü sırasında anottaki lityum atomları iyonize olur ve elektronlarından ayrılır. Lityum iyonları anottan hareket eder ve elektronlarıyla yeniden birleşip elektriksel olarak nötralize oldukları katoda ulaşana kadar elektrolitten geçer (Warner, 2019). Li-iyon bataryaların elektrokimyasal reaksiyonu Formül 3.4'te verilmiştir. Lityum iyonları, anot ve katot

arasındaki mikro geçirgen bir ayırıcıdan geçebilecek kadar küçüktür. Kısmen lityumun küçük boyutundan dolayı Li-iyon bataryalar, birim kütle ve birim hacim başına çok yüksek voltaj ve şarj depolama özelliğine sahiptir (Deng, 2015).



Li-iyon bataryalarda, elektrot olarak bir dizi farklı malzeme kullanılabilir. En yaygın kombinasyon, cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir elektronik cihazlarda en yaygın olarak bulunan lityum kobalt oksit (katot) ve grafitir (anot) (Warner, 2019). Diğer katot malzemeleri arasında lityum mangan oksit (HEA ve EA’larda kullanılır) ve lityum demir fosfat bulunur (Biçer ve ark., 2021).

Diğer yüksek kaliteli şarj edilebilir batarya teknolojileriyle (nikel kadmiyum veya nikel metal hidrit) karşılaştırıldığında, Li-iyon bataryaların bazı avantajları vardır. Günümüz batarya teknolojileri arasında en yüksek enerji yoğunluklarından birine sahiptir (100-265 Wh/kg veya 250-670 Wh/L). Ayrıca Li-iyon batarya hücreleri, Ni-Cd veya Ni-MH gibi batarya teknolojilerden 3 kat daha fazla şarj-deşarj olabilirler (Gu, 2023). Bu durum, Li-iyon bataryaların diğer bataryalara göre nispeten az bakım gerektiren ve yüksek güçlü uygulamalar için büyük miktarlarda akım sağlayabilecekleri anlamına gelir. Ayrıca Li-iyon bataryalar ayda yaklaşık %3-%5 gibi düşük oranda kendi kendinedeşarj oranına sahiptir. Nikel metal hidrit bataryalarda ise bu oran %30 civarındadır (Biçer ve ark., 2021).

Bu avantajlar nedeniyle Li-iyon bataryalar, taşınabilir elektronik cihazlarda (akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlar gibi) pazar lideri olarak nikel kadmiyum ve nikel metal hidrit bataryaların yerini almıştır. Li-iyon bataryalar, ağırlığın önemli bir faktör olduğu havacılık uygulamalarında elektrik sistemlerine güç sağlamak için de kullanılmaktadır. Şu anda en çok satan EA olan Nissan Leaf ve Tesla Model S, birincil yakıt kaynağı olarak Li-iyon bataryaları kullanmaktadır (Vidyanandan, 2019). Bu avantajlarına rağmen, Li-iyon bataryalar, özellikle güvenlik açısından hala bazı dezavantajlara sahiptir. Li-iyon bataryalar aşırı ısınma eğilimindedir ve yüksek voltajlarda hasar görebilir (Chombo ve Laonual, 2020). Yüksek ısı bazı durumlarda termal kaçak ve yanmaya yol açabilir. Tablo 3.1’de incelenen batarya türlerinin karşılaştırması verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Ticari bataryaların parametreleri (Özcan ve ark., 2021)

Batarya türü	Nominal gerilim (V)	Özgül enerji (Wh/kg <sup>-1</sup> )	Enerji yoğunluğu (Wh/L <sup>-1</sup> )	Özgül güç (W/kg <sup>-1</sup> )	Yaşam döngüsü	Kendi kendine deşarj (aylık %)	Hafıza etkisi	Çalışma sıcaklığı (°C)
Kurşun asit	2	35	100	180	1000	<5	Yok	-15 / +50
Nikel kadmiyum	1,2	50-80	300	200	2000	10	Var	-20 / +50
Nikel metal hidrit	1,2	70-95	180-220	250	<3000	20	Az	-20 / +60
Lityum iyon	3,6	118-250	200-400	315	2000	<5	Yok	-20 / +60

Li-iyon bataryalar çeşitli anot ve katot malzemelerin kombinasyonundan oluşur. Bataryanın kullanılacağı alana göre güvenlik, maliyet, performans gibi parametrelere göre bu kombinasyonlardan oluşan bir Li-iyon batarya tercihi yapılır (Gu, 2023). Ticari anlamda yaygın olarak kullanılan lityum tabanlı bataryalar; Lityum-Kobalt-Oksit (LCO), Lityum-Manganez-Oksit (LMO), Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA), Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC), Lityum-Titanat (LTO) ve Lityum-Demir-Fosfat (LFP) olarak sınıflandırılır (Özcan ve ark., 2021). Tablo 3.2’de ticari anlamda yaygın olarak kullanılan lityum bazlı bataryaların özellikleri verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Bazı çözücülerin fiziksel özellikleri (Özcan ve ark., 2021)

Kimyası	LCO	LMO	NMC	LPF	NCA	LTO
Nominal voltaj	3,6V	3,7V	3,7V	3,3V	3,6V	2,4V
Tam şarj	4,2V	4,2V	4,2V	3,65V	4,2V	2,85V
Özgül enerji (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220	90-220	200-260	70-80
Döngü Ömrü	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000

### 3.1.2. Geleceğin sistemleri

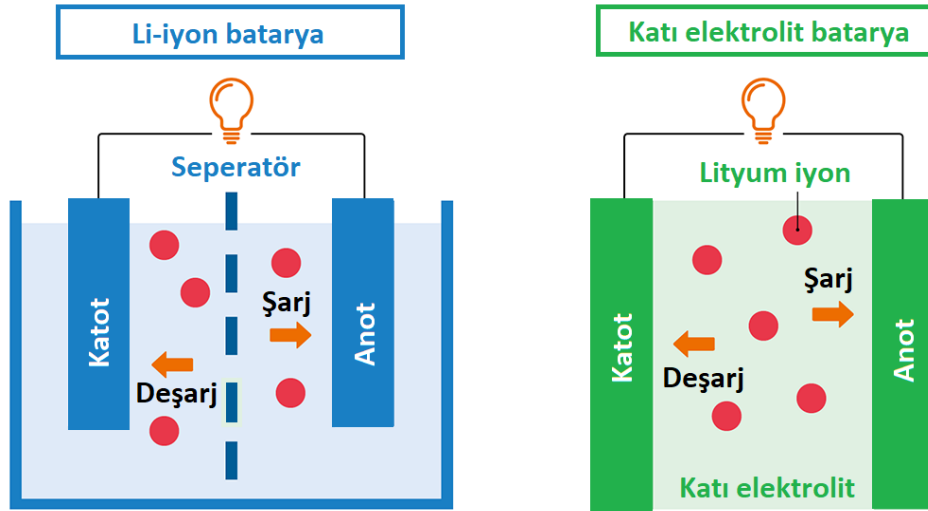
Geleceğin sistemlerini aşağıda belirtilen şekilde üç genel gruba ayırmak mümkündür.

- Katı elektrolit bataryalar
- Metal-hava bataryalar
- Lityum sülfür bataryalar

### 3.1.2.1. Katı elektrolit bataryalar

Bu bataryaların temeli Li-iyon bataryaların çalışma prensibine dayanmaktadır. Katı elektrolit bataryaların geliştirilme nedenleri enerji yoğunluğunun ve güvenlik seviyesinin yüksek olmasıdır (Cui, 2020). Sıvı elektrolit içeren Li-iyon bataryalara göre katı elektrolitli bataryaların iyonik iletkenliği daha zayıf olması sebebiyle performansları daha düşüktür. Ancak katı bataryalarda dendrit oluşumu baskılandığından patlama veya yangın riski son derece azdır, bu nedenle güvenlik için ek bileşenlere ihtiyaç duymazlar. Katı elektrolit bataryalar kendi kendine deşarj oranı çok düşüktür ve bozulmalar daha az olduğu için daha uzun kullanım ömrü sunarlar (Sun, 2020). EA'larda daha yaygın kullanıma aday olan bu bataryaların halen araştırma çalışmaları devam etmektedir (Sun, 2020).

Şekil 3.1'de Li-iyon batarya ve katı elektrolit bataryaların çalışma prensibi gösterimleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Li-iyon batarya ve katı elektrolit bataryaların çalışma prensibi gösterimleri (URL-2, 2023)

EA pazarında araştırma şirketlerinin de vurguladığı gibi Li-iyon batarya kullanımının, EA piyasasında lider konuma gelmesinin en önemli sebebi bu bataryayı kullanan araçların menzilinün daha fazla olması durumudur (Sun, 2020). EA'larda menzil artırılmasının iki yöntemi vardır; ya batarya sayısının artırılması ya da bataryaların enerji yoğunluğunun artırılmasıdır (Beaume ve Midler, 2009). Araçlarda kullanılacak batarya

sayısının doğrudan artırılması hem hacim hem de ağırlık olarak bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu kapsamda bataryaların enerji yoğunluğunun artırılması için yapılan bilimsel çalışmalar ağırlık kazanmıştır (Gurz ve ark., 2017).

### 3.1.2.2. Metal-hava bataryalar

Metal-hava bataryalar, Li-iyon bataryalardan çok daha yüksek bir teorik enerji yoğunluğuna sahiptir (Lee ve ark., 2011). EA'lar ve şebeke enerjisi depolama için yeni nesil elektrokimyasal enerji depolamaya yönelik bir çözüm olarak önerilmektedir. Ancak anotta metal, katotta hava ve elektrolit malzemesi ile ilgili üretim zorlukları nedeniyle henüz ticarileşme imkanı olmayan bu bataryalar araştırma laboratuvarlarında faaliyet göstermektedir (Rahman ve ark., 2013). Metal-hava bataryaların pratik bir gerçeklik haline gelmesinden ve geniş ölçekte kullanılmasından önce bu üretim zorluklarının uygun şekilde çözülmesi gerekmektedir. Çeşitli metallerin kullanıldığı bu bataryalarda Tablo 3.3'te teorik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 3.3.** Metal-hava bataryaların tasarım gereksinimleri (Biçer ve ark., 2021)

Metal Anot	Kapasite (Ah/g)	Teorik potansiyel (V)	Spesifik enerji (kWh/kg)
Lityum	3,86	3,4	13
Kalsiyum	1,34	3,4	4,6
Magnezyum	2,2	3,1	6,8
Alüminyum	2,98	2,7	8,1
Çinko	0,82	1,6	1,3
Demir	0,96	1,3	1,2

Tablo 3.3 incelendiğinde lityum hava (Li-hava) bataryaların diğer metal-hava bataryalara göre daha yüksek kapasite ve enerji yoğunluğu sunduğu görülmektedir. Bu durum Li-hava bataryaların tercih edilme oranını arttırmaktadır. Ancak Li-hava bataryaların güç yoğunluğunun düşük olması, EA'larda kullanılmasını sınırlamaktadır. Metal-hava bataryaların tamamının çevrim ömürlerinin halen yeterli seviyede olmamasından dolayı geleceğin bataryaları kategorisinde yer almaktadır.

### 3.1.2.3. Lityum sülfür bataryalar

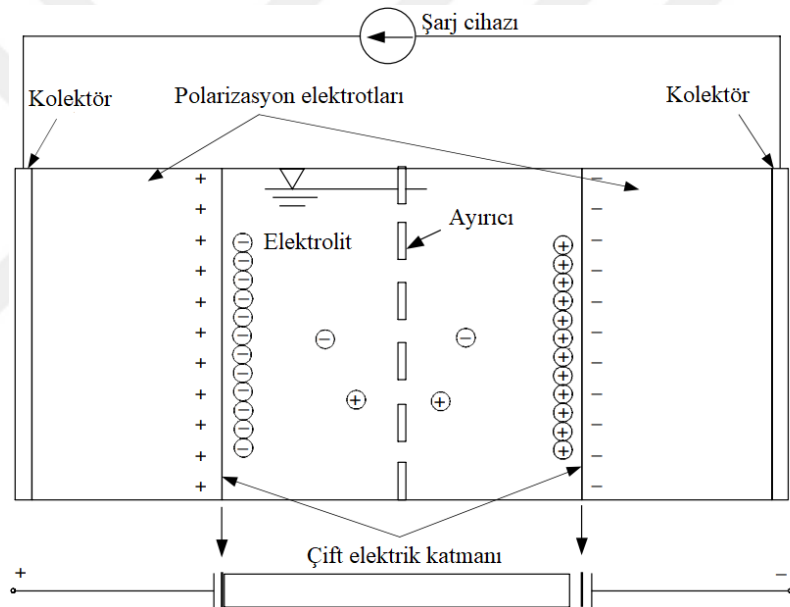
Li-iyon bataryaların yerini kullanılma potansiyeli olan lityum sülfür (Li-S) bataryaların geliştirme çalışmaları 61 yıl öncesine dayanmaktadır (Danuta, 1962). Li-iyon bataryalara göre %40 daha yüksek kapasite sunmayı vadeden Li-S bataryaların yakın gelecekte kullanıma sunulması beklenmektedir (Chen ve Shaw, 2014). Bugün gelinen aşamada halen çevrim ömürlerinin çok kısa olması ticarileşme anlamında bu bataryaları kısıtlamaktadır.

Araştırmaların birçoğu batarya ömrünü uzatmak için yeni bir elektrokatalizör üzerine odaklanmıştır (Song ve ark., 2020). Bu bağlamda yeni bir elektrokatalizör arayışında katot elementine kobalt oksalat katmanı eklenmiş ve batarya ömrünün ve performansının arttığı tespit edilmiştir (Yao ve ark., 2019). Bu sorunların aşılması ile birlikte enerji yoğunluğu yüksek, güvenli ve çevreye daha az zararlı bu bataryaların Yapılan bilimsel çalışmalar, Li-S bataryaların EA'larda kullanımının yakın gelecekte gerçekleşebileceğini göstermektedir (Song ve ark., 2020).

### 3.1.3. Süperkapasitörler

Süperkapasitörler, Li-iyon bataryalara kıyasla çok daha yüksek özgül güce sahip iken çok daha düşük özgül enerjiye sahiptir (Ehsani ve ark., 2004). Özgül enerjisi kilogram başına birkaç Wh aralığındadır. Bununla birlikte, özgül gücü 3 kW/kg'a kadar ulaşabilir, bu da herhangi bir batarya türünden çok daha yüksektir (Chan ve Chau, 2001). Düşük enerji yoğunlukları nedeniyle, süperkapasitörleri tek başına EA'lar için bir enerji depolama sistemi olarak kullanmak zordur (Gao ve Ehsani, 2002). Ancak, süperkapasitörlerin yardımcı bir güç kaynağı olarak kullanılmasından kaynaklanabilecek bazı avantajları vardır. Gelecek vaat eden avantajlarından biri, EA'lar için batarya ve süperkapasitör hibrit enerji depolama sistemidir. Böylece enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu ayrıştırılarak çevrim ömrü optimize edilmiş bir batarya tasarlama fırsatı elde edilmiş olur. Süperkapasitörlerin yük dengeleme etkisi sayesinde, bataryadan yüksek akımla deşarj ve faydalı frenleme ile bataryaya yüksek akımla şarj en aza indirilebilir, böylece bataryanın mevcut enerjisi, dayanıklılığı ve ömrü önemli ölçüde artırılabilir.

Süperkapasitörler, çift katmanlı kapasitör teknolojisi ile geliştirilmektedir (Ehsani ve ark., 2004). Şekil 3.2’de bir süperkapasitörün temel çalışma prensibi verilmiştir. Birçok yönden, bir süperkapasitör, büyük bir kapasitöre benzerlik göstererek daha büyük enerjilerin depolanmasına izin verir. Süperkapasitörde gözenekli aktif malzeme içeren elektrot plakalar bir elektrolite batırılır ve ince bir seperatör benzeri elektrokimyasal sistem ile ayrılarak dielektrik malzeme elde edilir (Gao ve ark., 2003). Elektrotlar yüklendiğinde elektrolit içinde bulunan tuzdan kaynaklanan iyonlar ayrışarak pozitif yüklü elektrota anyonlar, negatif yüklü elektrota ise katyonlar birikir. Böylece süperkapasitör şarj olmuş olur, deşarj esnasında ise elektrotların yüzeyinde biriken iyonlar tekrar elektrolitte buluşurlar ve biriken elektronlar sistemi beslerler. Süperkapasitörde depolanan enerji Formül 3.5’deki gibi hesaplanabilir.



Şekil 3.2. Süperkapasitörün temel çalışma yapısı (Ehsani ve ark., 2004)

$$E_{kap} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.5)$$

Formül 3.5’de C, Faraday cinsinden kapasitansı ve V, Volt cinsinden kullanılabilir gerilimi temsil etmektedir. Bu formül, daha büyük enerji yoğunluklu kapasitörler için daha yüksek gerilime ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Sulu elektrolit bir kapasitörün nominal voltajı hücre başına yaklaşık 0,9V, katı elektrolit kapasitörün gerilimi ise 2,3V ile 3,3V arasında değişebilir (Cheng Zhang ve ark., 2009). Bir süperkapasitörün

performansı, deşarj ve şarj sırasında uç gerilimleri ile temsil edilebilir. Süperkapasitörün uç gerilimi, elektrik potansiyeli ve kaçak akımı sırayla Formül 3.6, Formül 3.7 ve Formül 3.8’te verilmiştir.

$$V_t = V_C - iR_S \quad (3.6)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\left(\frac{i + i_L}{C}\right) \quad (3.7)$$

$$i_L = \frac{V_C}{R_L} \quad (3.8)$$

Formüllerde,

$V_t$ ; süperkapasitör uç gerilimi (V),

$V_C$ ; süperkapasitör gerilimini (V),

$R_L$ ; dielektrik kaçak direnci (*ohm*),

$R_S$ ; seri direnci (*ohm*) temsil etmektedir.

Son gelişmeler süperkapasitörlerin performansının nanomalzemeler kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir (Chen ve Dai, 2013; Peng ve ark., 2014; Li ve ark., 2020; Xie ve ark., 2021; Yıldırım ve ark., 2021). Bir kapasitörün enerji depolama kapasitesi, kapasitansı ile doğru orantılıdır ve bu da plakaların veya elektrotların alanıyla orantılıdır. Aynı şekilde akım taşıma kapasitesi de elektrotların alanıyla doğru orantılıdır (Ehsani ve ark., 2004). Yapılan çalışmalarda, normalde kullanılan gözenekli ve şekilsiz karbon yerine tek duvarlı karbon nanotüpler kullanılarak, elektrotların etkili alanı önemli ölçüde artırılabilirliği tespit edilmiştir (Peng ve ark., 2014). Bu durumda bile süperkapasitörler 60 Wh/kg ile ancak Li-iyon bataryaların yarısı kadar enerji yoğunluğuna ulaşabilmektedir. Süperkapasitörlerin asıl kullanım avantajı olan güç yoğunluğu ise Li-iyon bataryaların üç katı kadardır (Libich ve ark., 2018).

### 3.2. Li-iyon Esaslı Bataryaların Çalışma Prensibi

Günümüzde EA uygulamalarında yaygın olarak kullanılan batarya türü Li-iyon esaslı bataryalardır (Warner, 2019). Mevcut doktora tez çalışmasının konusu EA’larda

kullanılan faydalı frenleme sisteminin bu tip bataryalar üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesidir. Bu sebeple Li-iyon bataryalar konusu bölüm 3.2 ve bölüm 3.3'te daha detaylı olarak irdelenmiştir.

Kimyasal enerji depolayan bir batarya, bir elektrik devresine bağlandığında bunu elektrik enerjisine dönüştürür (Goodenough, 2015). Bir batarya hücresinde pozitif ve negatif elektrotlar vardır: kutuplaşma olduğunda negatif elektrot daha düşük, pozitif elektrot ise daha yüksek bir gerilim değerine sahiptir. Bu elektrotlar sırasıyla anot ve katot olarak adlandırılır (Schmidt-Rohr, 2018). Her bir elektrotta meydana gelen reaksiyona yarı hücre reaksiyonları adı verilir. Bu reaksiyon anotta bir elektron kaybına yol açarken, katotta elektron kazanımı ile sonuçlanır. Hangi elementin elektron kazanacağı ve hangilerinin kaybedeceği elementlerin elektron ilgilerine bağlıdır (Goodenough ve Park, 2013).

### **3.2.1. Anot aktif malzemesi**

Lityum metali düşük ağırlığı, yüksek elektrot potansiyeli ve yaklaşık 3700 mAh/g kapasiteye sahip olması sebebi ile 1970'li yıllarda anot malzemesi olarak tercih edilmiştir (Landi ve ark., 2009). Bataryaların yaygınlaşması ile kullanım alanları da genişlemiş ve farklı ortam koşullarında kullanımı ihtiyaç haline gelmiştir. Ancak lityum metali güvenlik nedeni ile kuru ve inert ortamlarda bulunmalıdır (Kim ve ark., 2006). Bu durum iyi bir izolasyon ile çözüme kavuşturulmuş olsa da hem maliyet hem de lityum metalinin morfolojisinin bozulmasından dolayı farklı anot malzemesi arayışını tetiklemiştir (Meng ve ark., 2020). Bu arayış sonucunda lityum iyonlarının içine girerek yerleşmesine imkân sağlayan karbonlar kullanılmaya başlanmıştır. Kapasite olarak lityum metalinden çok daha düşük olan karbon güvenli olması ve katottan alınabilen enerjiden dolayı anot malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Landi ve ark., 2009). Bugüne kadar kullanılan bazı karbon anot malzemelerin kapasiteleri karbon nanofiber (450 mAh/g), gözenekli karbon (800-1100 mAh/g), grafen (960 mAh/g), sert karbon (1050 mAh/g) ve karbon nanotüpler (1100 mAh/g)'dir (DiLeo ve ark., 2010).

1990'lı yıllarda ticari hücrelerde petrol temelli kok kullanılmıştır. Kok anotlar 180 mAh/g kapasiteye sahiptir ki bu da grafitlerin yaklaşık yarısı kadar kapasiteye eşdeğerdir. Bundan dolayı grafit düşük kapasite kaybına sahip olmasında ve 300 mAh/g'lık

kapasitesinden dolayı ticari bataryalarda tercih edilmiştir (DiLeo ve ark., 2010). Grafit, bir karbon mineralidir ve karbon bileşiğinin lityumca en zengin hâli  $\text{LiC}_6$ 'dır. Grafitin teorik olarak kapasitesi 372 mAh/g'dır. Sert karbonlarda bu kapasite değeri 1000 mAh/g'a kadar ulaşabileceği tahmin edilmiştir ancak yüksek miktarda tersinmez lityum depolaması ve lityum depolama esnasındaki iletkenliği engel oluşturmaktadır. (Landi ve ark., 2009).

Lityum iyonlarının yapı içerisine giriş çıkış yapmasından dolayı anot ve katotta hacim genişlemesi problemi ortaya çıkmaktadır. Bu genişlemeler sonucunda elektrot yüzeylerinde kırılmalar ve yapı bozulmaları meydana gelmektedir. Bu durumu engellemek için nano parçacıklar kullanılarak yüzey alanı artırılma çözümü önerilmiştir. Nano parçaların olumsuz yönü ise, yüzey alanında topaklanma sonucu kapasite kayıplarına yol açmasıdır (Meng ve ark., 2020). Şekil 3.3'te çoklu döngülerden sonra anodun hacimsel değişimi ve kırılması gösterilmektedir.



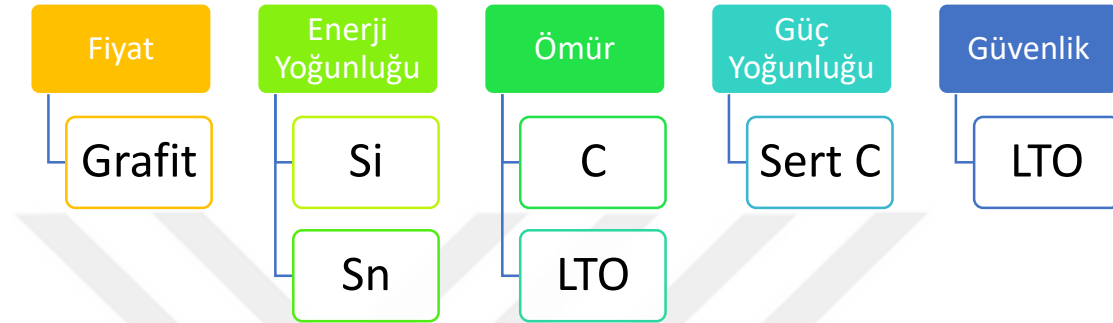
Şekil 3.3. Çoklu döngülerden sonra anodun yapısal deformasyonu (Meng ve ark., 2020)

Son yıllarda ticari ürünler, karbondan daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan nano boyutta kalay esaslı bileşikler Li-iyon bataryalarda anot malzemesi olarak tercih edilmektedir (Cheng ve ark., 2021). Anot malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Bazı anot malzemelerinin performans değerlendirmesi (Lee, 2020)

Malzeme özellikleri	Li	C	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	Si	Sn	Sb	Al	Mg
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.53	2.25	3.5	2.33	7.29	6.7	2.7	1.3
Lityum bileşen fazı	Li	$\text{LiC}_6$	$\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	$\text{Li}_{4,4}\text{Si}$	$\text{Li}_{4,4}\text{Sn}$	$\text{Li}_3\text{Sb}$	$\text{LiAl}$	$\text{Li}_3\text{Mg}$
Teorik kapasite	3862	372	175	4200	994	660	993	3350
Hacimsel değişim (%)	100	12	1	400	260	200	96	100
Li/Li+ potansiyeli	0	0.05	1.6	0.4	0.6	0.9	0.3	0.1

Hücrelerin enerji yoğunluğu hem anot hem de katot malzemelerinin kapasitesine bağlıdır. Katot malzemesi enerji yoğunluğunda sınırlayıcı malzeme olduğu için öncelikli kriterlere göre bir anot malzemesi seçilebilir. Anot malzemelerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajı vardır (Biçer ve ark., 2021). Şekil 3.4'te anot malzemelerinin özellikleri ve öncelikli tercih kriterleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Anot malzemesi tercih kriterleri (Biçer ve ark., 2021)

Lityum iyon ticari bataryalarda halen anot malzemesi araştırmaları devam etmektedir. Günümüzde kullanılan anot malzemelerinin yerine daha güvenli, daha yüksek kapasite ve güç yoğunluğuna sahip maddelerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Araştırmalar kapsamında öne çıkan malzemeler; lityum titanak (160 mAh/g), geçiş metal oksitler (500/1000 mAh/g), kalay (994 mAh/g), silisyum oksit (1600 mAh/g) ve silisyumdur (4200 mAh/g) (Wang ve ark., 2012; Sehwat ve ark., 2020).

### 3.2.2. Katot aktif malzemesi

Genel olarak katot, geçiş metallerinin oksitleridir ve indirgeme reaksiyonunun gerçekleştiği elektrottur. Bu durum, katodun dış devreden elektron kazandığı ve indirgendiği anlamına gelir. Lityum iyonlarının kristal yapı içerisine giriş-çıkış özelliği vardır. Bu sayede şarj sırasında lityum iyonları yapıdan ayrılırken deşarj işlemi sırasında yapı içerisine giriş yaparlar (Li ve ark., 2020). Lityum iyonlarının yapı içerisine giriş süresi bataryadan çekilecek maksimum akımı belirler. Li-iyon bataryaların performansı da katot malzemelerin etkinliği ile doğrudan bağlantılıdır. Bu bağlamda katot

malzemesinin batarya performansının, maliyetinin ve hacminin belirlenmesinde önemli rol oynamasından dolayı çalışmalar katot üzerine yoğunlaşmıştır (Costa ve ark., 2021).

Bu çalışmalarda en çok tabakalı kristal yapıda, üç boyutlu yapıda ve olivin kristal yapıda olan bileşenler yer almaktadır (Li ve ark., 2020). Bu katot bileşenlerinden beklenenler; yüksek enerji yoğunluğu, düşük hacimsel boyut, uzun ömür, düşük maliyet, yüksek güvenlik ve yüksek potansiyeldir. Li-iyon bataryalar 2V ile 5V arasında gerilim seviyelerinde kullanılır ancak günümüzde 5V gerilim seviyesinde kullanılacak kararlı elektrolitler bulunmadığı için ticari uygulama alanları bulunmamaktadır (Alvarado ve ark., 2018). Gelecekte daha yüksek gerilim seviyelerinde elektrolitlerinde geliştirilmesi ile uygulama alanları olacaktır.

Bataryalarda kullanılan farklı katot malzemelerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sadece avantajı bulunun bir katot malzemesi bulmak mümkün değildir (Costa ve ark., 2021). Bunun yerine batarya özelliklerine göre en optimum katot malzemesi belirlenmelidir. Tablo 3.5'te ticari bataryalarda kullanılacak katot malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması, Tablo 3.6'da ise Ar-Ge aşamasında olan katot malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

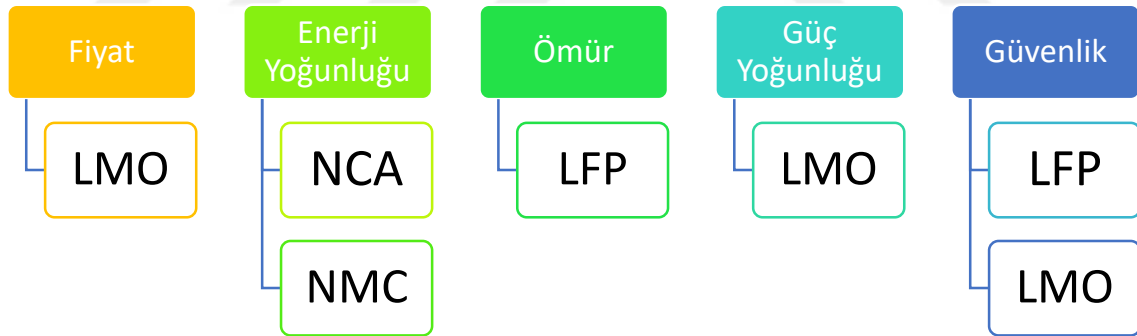
**Tablo 3.5.** Ticari bataryalarda kullanılan katot malzeme özelliklerinin karşılaştırması (Nitta ve ark., 2015)

Kristal yapı	Bileşik	Spesifik kapasite (teorik ve deneysel) (mAh/g)	Volumetrik kapasite (teorik ve deneysel) (mAh/cm <sup>3</sup> )	Ortalama gerilim
Tabakalı	LiTiS <sub>2</sub>	225/210	697	1,9
Tabakalı	LiCoO <sub>2</sub>	274/148	1363/550	3,8
Tabakalı	NMC	280/160	1333/600	3,7
Tabakalı	NMA	279/199	1284/700	3,7
Spinel	LiM <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	148/120	596	4,1
Olivin	LiFePO <sub>4</sub>	170/165	589	3,4

**Tablo 3.6.** Ar-Ge aşamasındaki katot malzeme özelliklerinin karşılaştırması (Nitta ve ark., 2015)

Kristal yapı	Bileşik	Spesifik kapasite (teorik ve deneysel) (mAh/g)	Volumetrik kapasite (teorik ve deneysel) (mAh/cm <sup>3</sup> )	Ortalama gerilim
Tabakalı	LiNiO <sub>2</sub>	275/150	1280	3,8
Tabakalı	LiMnO <sub>2</sub>	285/140	1148	3,3
Tabakalı	Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub>	458/180	1708	3,8
Spinel	LiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	142/84	704	4
Olivin	LiMnPO <sub>4</sub>	171/168	567	3,8
Olivin	LiCoPO <sub>4</sub>	167/125	510	4,2
Tavorit	LiFeSO <sub>4</sub> F	151/120	487	4,2
Tavorit	LiVPO <sub>4</sub> F	156/129	484	4,2

Tercih edilecek katot malzemelerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajı vardır. Şekil 3.5'te katot malzemelerinin özellikleri ve öncelikli tercih kriterleri verilmiştir.

**Şekil 3.5.** Katot malzemesi tercih kriterleri (Biçer ve ark., 2021)

### 3.2.3. Elektrolit

1950'li yıllarda Li-iyon bataryalarda şarj ve deşarj voltajının 3V üzerinde olması sebebi ile sulu bir elektrolit kullanılamayacağı tespit edilmiştir (Simon ve Gogotsi, 2008). 1960'lı yıllara gelindiğinde organik ve inorganik elektrolite sahip lityum temelli

bataryalar üretilmiştir (Manthiram ve ark., 2017). Ancak ilerleyen yıllarda bu bataryaların güvenlik ve kullanım ömrü sorunları ortaya çıkmasıyla bu bataryaların kullanımından vazgeçilmiştir. Bataryalar şarj ve deşarj sırasında anot üzerinde dentrit denilen iğnemi lityum kristalleri oluşmaktadır (Li ve ark., 2020). Dendritler yük transferinde kullanılacak lityumlardan oluştuğundan ilk olarak bataryanın enerji yoğunluğunun azalmasına sebeptir. Ayrıca bataryada yüksek ısı oluşmasına hatta dendritlerin seperatörü delerek kısa devre oluşturmasına sebebiyet vermekte ve ciddi güvenlik sorunlarının nedenidir (Zhang ve ark., 2021).

1980'li yıllara gelindiğinde Li-iyon bataryalarda yapılan çalışmalar dendrit oluşumunu engelleyerek daha güvenli bataryalar üretmeye odaklanmış ve yeni elektrolitler keşfedilmiştir (Manthiram ve ark., 2017). Lityum tuzu ve çözücü ile kullanılan elektrolitlerin daha güvenli olduğu anlaşılmıştır (Zhang ve ark., 2021). Fakat organik elektrolitlerin çevre ve insan sağlığı için tehlikeli olması gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle, son zamanlarda güvenli olmayan sıvı organik elektrolitin solventsiz katı elektrolit ile değiştirilmesi için büyük çaba sarf edilmektedir (Li ve ark., 2020). Tablo 3.7'de elektrolitlerde kullanılan çözücülerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

**Tablo 3.7.** Bazı çözücülerin fiziksel özellikleri (Xu, 2004)

Çözücü	Moleküler ağırlığı (g/mol)	Erime noktası (°C)	Kaynama noktası (°C)	Viskozite (cP, 25 °C)	Dielektrik sabiti (25 °C)	Dipol moment (Debye)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Etilen karbonat	88	36,4	248	1,90	89,78	4,61	1,321
Propilen karbonat	102	-48,8	242	2,53	64,92	4,81	1,2
Bütiro lakton	86	-43,5	204	1,73	39	4,23	1,199
Valero lakton	100	-31	208	2	34	4,29	1,057
N-metal oksolidon	101	15	270	2,5	78	4,52	1,17
Dimetal karbonat	90	4,6	91	0,59	3,107	0,76	1,063
Dietil karbonat	118	-74,3	126	0,75	2,805	31	0,969
Etil metil karbonat	104	-53	110	0,65	2,958	0,89	1,006

Tablo 3.7 incelendiğinde çözücülerde iki fonksiyonlu organik grubun daha üstün olduğu görülmektedir. Tablo 3.8'de ise elektrolitlerde kullanılan bazı tuzların özellikleri verilmiştir.

**Tablo 3.8.** Elektrolitlerde kullanılan bazı tuzların fiziksel özellikleri (Xu, 2004)

Lityum tuzları	Moleküler ağırlığı (g/mol)	Erime noktası (°C)	Bozunma sıcaklığı (°C)
LiBF <sub>4</sub>	93,9	293	>100
LiPF <sub>6</sub>	151,9	200	80
LiAsF <sub>6</sub>	195,9	340	>100
LiClO <sub>4</sub>	106,4	236	>100
Lityum triflate	155,9	>300	>100
Lityum imit	286,9	234	>100

Tablo 3.8 incelendiğinde LiPF<sub>6</sub> lityum tuzları arasında son 30 yıldır en çok tercih edilen elektrolit tuzu olmuştur. Sony markasının Li-iyon bataryaları incelendiğinde 1990'dan itibaren LiPF<sub>6</sub> elektrolit tuzu olarak kullanılmıştır (Li ve ark., 2020; Manthiram ve ark., 2017). Diğer markaların ticari ürünlerinde de değişmeyen bir tercih olmuştur.

### 3.2.4. Seperatör

Seperatör, pozitif ve negatif elektrotların fiziksel temasını engelleyen ve batarya içinde serbest iyon taşınmasına izin veren batarya hücresinin önemli bir bileşenidir. Bu nedenle güvenlik, seperatörün termal kararlılığı ile yakından ilgilidir (Zhang, 2007). Bataryaların güvenliği için seperatörlerin özellikleri dikkate alınarak batarya ihtiyacına en uygun şekilde belirlenmektedir. Seperatörler özelliklerine göre; mikro gözenekli filmler, non-woven tipler, iyon değiştirilen membranlar ve katı polimer elektrolitler olarak çeşitli tiplere ayrılırlar (Abbasi ve ark., 2022).

Son yıllarda Li-iyon bataryaların kapasiteleri giderek artması sebebi ile daha ince seperatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ticari bataryalarda kullanılan seperatörler 30 µm'den daha incedir (Cannarella, 2014). Li-iyon bataryaların mevcut ticari kullanımında mikro gözenekli membranlar kullanılmaktadır. Li-iyon bataryalar için non-woven malzemeye sahip seperatörlerde geliştirilmiş ancak ticari nitelik kazanamamıştır (Zhang, 2007). Tablo 3.9'da Li-iyon bir bataryada anot, katot, elektrolit ve seperatör seçimindeki gereksinimler verilmiştir.

**Tablo 3.9.** Lityum iyon bataryaların tasarım gereksinimleri (Karahana, 2016)

Anot	Katot	Elektrolit	Seperatör
Yüksek malzeme gücü	Yüksek malzeme gücü	Yüksek kimyasal kararlılık	Düşük patlama riski
Yapısal kararlılık	Yapısal kararlılık	Uygun maliyet	Kimyasal kararlılık
Kolay üretim	Kolay üretim	Güvenlik	Uygun maliyet
Yüksek elektron iletkenliği	Yüksek elektron iletkenliği	Yüksek iyon iletkenliği	İnce malzeme
Yüksek lityum difüzyon hızı	Yüksek lityum difüzyon hızı	Yüksek lityum iletkenliği	Çevresel duyarlılık

### 3.3. Li-iyon Bataryalarda Performans ve Güvenlik

Li-iyon bataryalar, diğer ticari bataryalara kıyasla güvenlik ve işlevsellik açısından birçok avantaja sahiptir. Bu temel avantajlar;

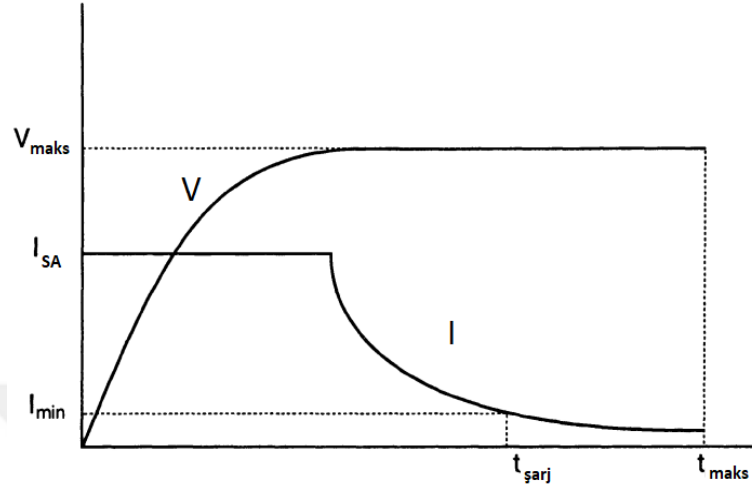
- Hızlı şarj desteği,
- Kendi kendine deşarj olmama,
- Düşük hacimde yüksek güç,
- Yüksek çevrim döngüsü olarak listelenebilir.

İlk geliştirilen EA’larda nikel metal hidrit bataryalar kullanıldı. Ancak günümüzde yukarıda listelenen Li-iyon bataryaların avantajlarından dolayı EA ve HEA’larda Li-iyon bataryalar tercih edilmektedir (Winter ve ark., 2018; Warner, 2019). Bu bağlamda Li-iyon bataryaların şarj-deşarj edilmesi, Li-iyon bataryaların arızaları ve Li-iyon bataryaların performansını etkileyen etmenlerin kapsamlı olarak incelenmesi bu tez çalışması için önem arz etmektedir.

#### 3.3.1. Li-iyon bataryaların şarj ve deşarj edilmesi

Batarya şarj ve deşarj işlemi, bataryanın performansı ve ömrünü etkileyen en önemli etkenlerdir (Liu ve ark., 2014). Li-iyon bataryaların organik ortamda maksimum şarj gerilimi 4,2V’dur (Notten ve ark., 2005, Nitta ve ark., 2015). Li-iyon bataryalarda önerilen şarj yöntemi sabit akım ve sabit gerilim yöntemidir. Bu şarj yöntemlerine göre

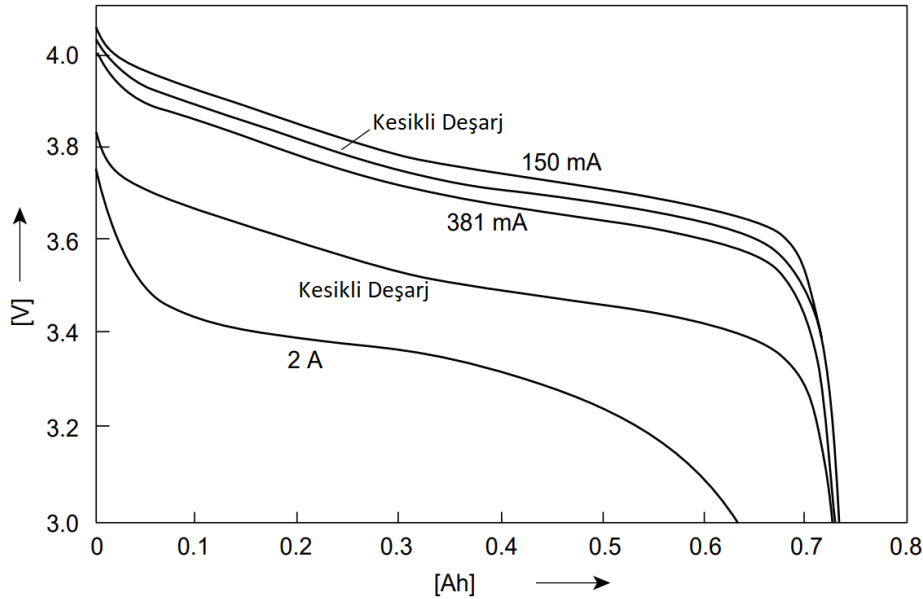
bataryanın şarj esnasında sıcaklığı, ömrü ve performansı değişiklik gösterir (Liu ve ark., 2014). Şekil 3.6’da sabit akım ve sabit gerilim yöntemi ile şarj edilen Li-iyon bataryanın gerilim ve akım özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Li-iyon bataryalara sabit akım ve sabit gerilimde şarj uygulanması durumunda gerilim ve akım değişimi (Bergveld, 2001)

Batarya üreticileri, bataryaların sabit akım ve maksimum gerilim değerlerini ürünün teknik dokümanında vermektedir. Bu değerler Li-iyon batarya marka ve modeline göre kullanılan aktif malzemenin özelliklerine, miktarına ve bataryanın yapısal düzenine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bataryalarda uygulanacak maksimum değerlerde dikkatli olunması gerekir aksi takdirde bataryada telafisi mümkün olmayan zararlar ve kapasite kayıpları meydana gelebilir. Şekil 3.6 incelendiğinde, şarj süresi ile maksimum şarj süresi arasındaki geçen sürede nasıl bir yöntem izleneceği batarya sağlığı açısından önem arz etmektedir. Bu süre boyunca minimum akım yönteminin tercih edilmesi batarya ömrüne olumlu katkı sağlamaktadır (Bergveld, 2001).

Li-iyon bataryaların deşarj gerilimleri marka ve modele göre değişiklik göstermektedir. Li-iyon bataryaların genelde deşarj gerilimleri 2,5V ile 2,7V arasındadır (Nitta ve ark., 2015). Batarya ömründe deşarj edilirken akım ve gerilim değerleri de önem arz etmektedir. Akım değerinin artması ile bataryada oluşan ısınma, iç direnç değişimine de sebep olmakta bu durum batarya ömrünü olumsuz etkilemektedir (Liu ve ark., 2014). Şekil 3.7’de Li-iyon bir bataryanın farklı akım değerlerinde ve kesikli deşarj (KD) işlemlerinde bataryadaki gerilim, kapasite değişimi verilmiştir.



Şekil 3.7. 17500 Li-iyon bir bataryanın sabit akım deşarj ve kesikli deşarj işlemlerindeki değişimi (Bergveld, 2001)

### 3.3.2. Bataryalarda durum belirleme

Batarya şarj durumu belirlenmesi güvenlik için önemli bir göstergedir. Bu yüzden bataryaların şarj durum tahmini önem arz etmektedir. Günümüzde birçok uygulamada şarj durumunu belirlemek için farklı yöntemler bulunmaktadır. Geleneksel tahmin yöntemi olan amper-saat entegrasyon yöntemi ve Coulomb sayma yöntemi kümülatif bir hataya sahiptir ve Gauss gürültüsüne sahip bir çalışma ortamında iyi sonuçlar elde edilemez (Khalid ve ark., 2023).

EA'larda kullanılan Li-iyon bataryaların güvenilir şekilde çalıştırılabilmesi için batarya yönetim sistemleri tarafından izlenmesi ve yönetilmesi gerekir. Verimli ve etkili batarya yönetim sisteminin başarısı batarya şarj durumunun doğru hesaplanması ile ilişkilidir. Batarya şarj durumu tahmini önemli bir konu olmasının yanı sıra doğru tahmin edilme işlemleri de bir o kadar zor ve karmaşıktır. Bunun nedeni bataryalar arasında parametrik belirsizliklerin bulunmasıdır. Buna karşılık ise günümüzde farklı şarj durum tahmin yöntemleri bulunmaktadır. Literatür taramalarında yapılan çalışmaların üç ana başlıkta toplandığı görülmektedir. Deneye dayalı, durum uzay modeline dayalı ve akıllı algoritma tabanlı yöntemler tespit edilmiştir (Yang ve ark., 2021; Khalid ve ark., 2023).



doğruluğu kesin olmayan verilerden elde edip, sistemin gerçek durumuna yakın bir tahminde bulunulmaya çalışılır. Veri elde etmek için kullanılan yöntem eğer çeşitli gürültüler içeriyorsa kalman filtresi yardımıyla gerçeğe en yakın değerlerin iyi bir şekilde tahmin edilmesini sağlar. Kalman filtresi en küçük değişimleri bile doğru bir şekilde tespit edebildiğinden şarj durum tahmin uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Khalid ve ark., 2023). Batarya matematiksel modellerinde kullanılan eşitlikler, Formül 3.9 ve Formül 3.10'da verilmiştir.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (3.9)$$

$$y_{k+1} = g(x_k, u_k) + v_k \quad (3.10)$$

Formüllerde,

$u_k$  ; sistem girişindeki değişkenler (akım, iç direnç, sıcaklık),

$x_k$  ; kestirilmiş şarj durumu,

$x_{k+1}$  ; sistem çıkışındaki açık devre gerilimini,

$y_{k+1}$  ; dışarıdan alınan ölçüm değeri,

$w_k$  ; işlem gürültüsü,

$v_k$  ; ölçüm hatasını,

$f, g$  ; batarya modelindeki lineer olmayan denklemleri temsil etmektedir.

Kalman süzgeci algoritması elektriksel bir eşdeğer modeli ile ifade edilmelidir. Kalman filtresi kullanılarak batarya durum denklemlerinin elde edilmesi Formül 3.11 ve Formül 3.12'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_b} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} I \quad (3.11)$$

$$u_{oc} = [-1 \quad -1] \begin{bmatrix} u_b \\ u_2 \end{bmatrix} + (-R_1 I) + u_{oc} \quad (3.12)$$

Formüllerde,

$u_b$ ;  $C_b$  üzerindeki gerilimi (V),

$u_2$ ; RC döngüsü üzerindeki gerilimi (V),

$u_{oc}$ ; bataryanın açık devre gerilimini (V),

$C_b$ ; batarya kondansatörü (F),

$C_2$ ; polarizasyon kondansatörü (F),

$R_1$ ; batarya iç direnci (ohm),

$R_2$ ; polarizasyon direncini (ohm) temsil etmektedir.

Kalman filtrede kestirim doğruluğu gürültülü sinyallerde dahi oldukça yüksektir. Kestirim için başlangıç şarj durumu önemli değildir. Ancak kestirim doğruluğu seçilen elektriksel modele göre değişiklik göstermektedir (Khalid ve ark., 2023).

### 3.3.3. Li-iyon batarya performansını etkileyen etmenler

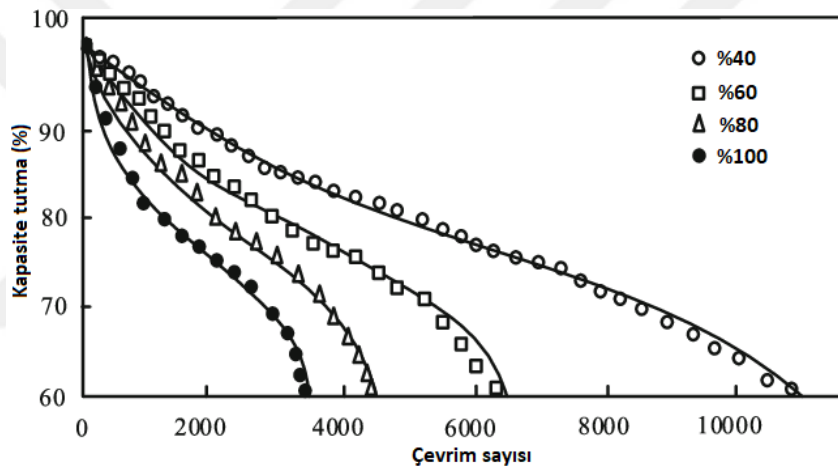
Lityum iyon batarya performansını etkileyen en önemli etmenleri genel olarak üç grupta toplayabiliriz. Bunlar;

- Derin deşarj etkisi,
- Akım ve deşarj C-oranı etkisi,
- Sıcaklık etkisidir.

#### 3.3.3.1. Derin deşarj etkisi

Bir bataryanın deşarj derinliği, bataryanın genel kapasitesine göre boşalmış batarya yüzdesini gösterir. İleri deşarj derinliği durumlarında başlangıç malzemelerinin kimyasal olarak dönüşerek iletkenlik kaybı, hacim değişimi vb. olaylardan başlangıç performanslarından tersinmez olarak uzaklaşma durumu söz konusudur. Deşarj derinliği, şarj durumunun tamamlayıcısıdır; biri arttıkça diğeri azalır. Deşarj derinliği ile bataryanın çevrim ömrü arasında doğrudan bir ilişki vardır (Chrenko ve ark., 2022). Deşarj derinliği

ne kadar sığ olursa, bir batarya tarafından verilen döngü sayısı da o kadar yüksek olur. Bataryanın deşarj derinliği kısıtlayarak, bataryanın çevrim ömrü önemli ölçüde artırılabilir. Li-iyon bataryalarda hafıza etkisi yoktur (Sasaki ve ark., 2013), bu yüzden ömrü uzatmak için düzenli tam deşarj ve şarj döngülerine ihtiyaç duymazlar. Yani tam tersi; deşarj ne kadar düşükse, batarya o kadar uzun süre dayanır ve o kadar çok döngü yapabilir. Tersine, tamamen boşaldığında ise (2,7V'un altında) yukarıda bahsedilen tersinmez olaylar meydana gelir ve bozulmalar gözlenir (Notten ve ark., 2005). Bu durumda batarya daha hızlı yaşlanır ve ömrünü tamamlar. Bu bağlamda bataryalar derin deşarj yaptırılmadan Şekil 3.12'de verildiği üzere ideal çalışma aralığında kullanılmalıdır. Şekil 3.9'da Li-iyon bataryanın farklı deşarj derinliklerinde çevrim ömrü değişimi verilmiştir.



Şekil 3.9. Li-iyon bir bataryanın çeşitli deşarj derinliklerinde kapasite tutma yüzdesi (Yan ve ark., 2018)

### 3.3.3.2. Akım ve deşarj C-oranı etkisi

C-oranı, bir bataryanın tamamen şarj olma veya deşarj olma hızını ölçmek için kullanılan bir birimdir. Örneğin, 1C hızında şarj etme, bataryanın bir saat içinde %0'dan %100'e şarj edilmesi anlamına gelir. 1C'den yüksek bir C oranı, daha hızlı şarj anlamına gelir; örneğin, 3C oranı üç kat daha hızlıdır ve bir saatte şarj olan bataryanın 20 dakika sürede şarj olacağını belirtir. Aynı şekilde daha düşük bir C oranı, daha yavaş bir şarj anlamına gelir ve 0,2C, 1C'den beş kat daha yavaş olur ve bu da bir saatte dolan bir bataryanın beş saatlik bir sürede şarj edileceği anlamına gelmektedir (Biçer ve ark., 2021). Araştırmalar, bataryaları daha düşük akımda şarj etmenin bataryadaki dendrit

oluşumunu azaltarak bataryayı güvenli hale getirdiğini ve bataryaya daha az stres yükleyerek daha uzun çevrim ömrüne sahip olacağını göstermiştir (Peng ve ark., 2023; Aslam ve ark., 2021).

Benzer şekilde farklı deşarj akımlarının batarya kapasitesini değiştireceği görüşü 1897 yılında kurşun asit bataryalar üzerinde yapılan deneyler sonucunda öne sürülmüştür (Peukert, 1897). Wilhelm Peukert, yüksek akımlarda gerçekleşen deşarj işleminin bataryalar üzerinde kapasite kayıplarına sebep olacağını Formül 3.13, Formül 3.14 ve Formül 3.15 ile savunmuştur.

$$C_p = I^k \cdot t \quad (3.13)$$

$$t = H \left( \frac{C}{IH} \right)^k \quad (3.14)$$

$$It = C \left( \frac{C}{IH} \right)^{k-1} \quad (3.15)$$

Formüllerde,

$C_p$  ; şarj edilen akıma bağlı elde edilen kapasite (*mAh*),

$C$  ; nominal akımla deşarja bağlı elde edilen kapasite (*mAh*),

$H$  ; nominal akımla deşarja bağlı elde edilen deşarj süresi (*saat*),

$I$  ; deşarj akımı (*A*),

$It$  ; deşarj esnasında etkin kapasite değeri (*mAh*)

$k$  ; Peukert sabiti,

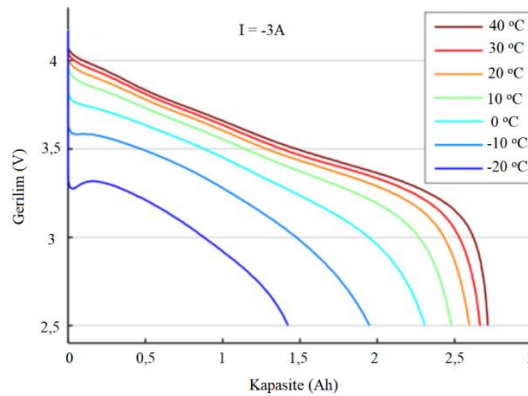
$t$  ; deşarj süresini (*saat*) temsil etmektedir.

Bataryaların yüksek deşarj akımları sonucunda batarya kapasitesindeki azalma tüm batarya türleri için geçerlidir. Ancak Li-iyon bataryalarda yüksek deşarj akımı bataryada ısınmaya sebep olur. Bataryadaki bu sıcaklık artışı lityum iyonlarının hareketini artırarak kapasite kaybını önler (Etacheri ve ark., 2011). Peukert yasasının bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu yasada sıcaklığın batarya üzerindeki etkileri ve batarya yaşlanması dikkate alınmamaktadır (Biçer ve ark., 2021). Bu bağlamda Peukert formülleri Li-iyon bataryalar için geçerli değildir. Ancak bataryalarda oluşan sıcaklık

sorunu, batarya şarj-deşarj döngüsü arttıkça ortaya çıkmakta ve Peukert formüllerine doğrudan bağlı olmasa da kapasite kayıplarına yol açmaktadır.

### 3.3.3.3. Sıcaklık etkisi

Çalışma sıcaklığının Li-iyon batarya ömrü üzerindeki etkisi, esas olarak elektrolit viskozitesinin, iyon geçiş hızının ve mikroskobik seviyedeki yan reaksiyonlarına yansır. Teorik olarak, elektrolitin viskozitesi ve iyon geçiş hızı, sıcaklık arttıkça Li-iyon bataryaların performansını artıracaktır, ancak aşırı sıcaklık, bataryada uzun sürede elverişli olmayan yan reaksiyonların artmasına yol açacaktır (Rodrigues ve ark., 2017). Sıcaklık ne kadar düşük olursa, lityum iyon geçiş hızı o kadar yavaş olur, batarya o kadar polarize olur ve Li-iyon bataryanın performansı o kadar düşer (Etacheri ve ark., 2011). Aynı zamanda, çok düşük sıcaklıkta şarj etmek, batarya güvenliğini etkileyen ve bataryada büyük hasara neden olan lityum kaplamaya yol açabilir. Bir Li-iyon bataryayı donma noktasının altındaki sıcaklıklarda şarj etmek, anotta kalın solid electrolyte interfaces (SEI) oluşumuna neden olarak bataryayı olumsuz etkilemesine ve kapasite azalmasına neden olur. Bu nedenle düşük sıcaklıkta şarj etmek hem batarya performansını azaltacak hem de güvenlik zafiyetine yol açacaktır (Rodrigues ve ark., 2017). Şekil 3.10'da çeşitli sıcaklıklarda bir 18650 Li-iyon bataryanın deşarj voltajı verilmiştir. 2.8Ah kapasiteye sahip bataryanın 3A deşarjı, 1.07C'lik bir C oranını temsil etmektedir. Düşük sıcaklıkta azaltılmış kapasite, yalnızca batarya bu durumdayken geçerlidir ve oda sıcaklığında batarya eski haline dönecektir. Ancak uzun süre düşük veya yüksek sıcaklıkta kullanım bataryanın iç direncini artırarak kalıcı kapasite kayıplarına yol açacaktır (Şen ve ark., 2024; Deng, 2015).



Şekil 3.10. Li-iyon bataryanın çeşitli sıcaklıkta deşarj gerilimi ve kapasitesi (URL-3, 2023)

### 3.3.4. Li-iyon batarya arızaları

Li-iyon bataryalar üreticiler tarafından önerilen sınırlar içinde saklanır ve çalıştırılırsa, arıza oranının 40 milyonda 1 olduğu tahmin edilmektedir (Doughty ve Roth 2012; Wen ve ark., 2020). Ancak aşırı şarj, harici ısıtma ve mekanik zorlama gibi öngörülemeyen durumlar bu arıza olasılığını önemli ölçüde artırabilir. Ticari Li-iyon batarya paketlerine çeşitli güvenlik cihazları entegre edilmiş olsa da çeşitli alanlarda kullanılan birçok hücrede arızalar meydana gelerek kazalara sebep olmuştur (Wang ve ark., 2019). Tablo 3.10'da, son zamanlarda Li-iyon bataryaların sebep olduğu kazalar listelenmiştir. Bu liste, küçük tüketici elektroniğinden EA'lara ve uçaklara kadar geniş bir ürün yelpazesi içermektedir.

**Tablo 3.10.** Son yıllarda gerçekleşen bazı Li-iyon batarya arızaları (Wang ve ark., 2019; Şen ve ark., 2023)

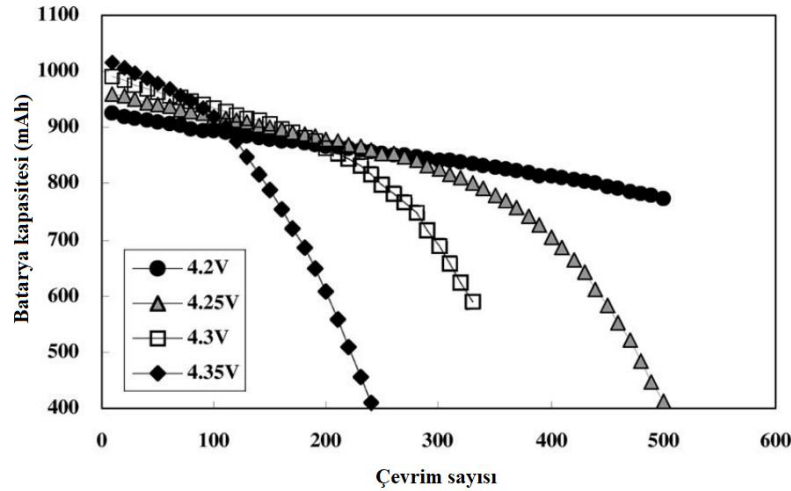
Tarih	Gerçekleşen kaza	Kaza nedeni
Mart 2010	Japonya iki tane iPod nano ısınarak alev aldı.	Aşırı ısınmış Li-iyon batarya
Nisan 2010	6 üretici firma 2700 dizüstü bataryasını geri çağırdı.	Aşırı ısınma ve yangın tehlikesi
Nisan 2011	Çin'de bir EA yandı.	Kısa devre hataları
Kasım 2013	6 tane Tesla marka EA yandı.	Çarpışma nedeni ile bataryaların kısa devre olması
Ocak 2013- Ocak 2014	Boeing 747 marka 3 tane uçak yandı.	Kısa devre ve batarya yönetim sistemi arızası
Nisan 2015	Çin'de bir elektrikli otobüs şarj esnasında alev aldı.	Bataryanın aşırı şarj edilmesi
Mayıs 2016	Li-iyon batarya deposunda patlama gerçekleşti.	Tamamen şarj bataryaların kendi kendine tutuşması
Ağustos 2016	Samsung Note 7 akıllı telefon patladı.	Tasarım hatası nedeniyle bataryada kısa devre olması
Mayıs 2017	Panasonic 270 binden fazla Li-iyon bataryasını geri çağırdı.	Aşırı ısınma ve yangın kazası
Ekim 2017	Avusturya'da EA alev aldı.	Araç kazası sonrası yanma
Ocak 2018	Çin'de Tesla marka bir EA kendiliğinden yandı.	Bataryanın kendiliğinden tutuşması
Temmuz 2018	Kore'de enerji depolaması sistemi alev aldı.	Bir Li-iyon batarya'da oluşan yangın 3500'den fazla bataryaya yayıldı
Temmuz 2018	Elektrikli scooter şarj olurken alev aldı.	Muhtemel aşırı şarj
Şubat 2022	Felicity Ace adlı kargo gemisinde 300 EA yandı.	Yangın nedeni henüz belli değil
Kasım 2023	Türkiye'de bir tır dolusu Tesla Model Y alev aldı.	Taşıma esnasında batarya ezilmesi

Bu kazaların temel nedenleri arasında aşırı ısınma, kısa devre, aşırı şarj, kendi kendine ısınma ve mekanik hasarlar sayılabilir. Tablo 3.10'da verilen Li-iyon bataryaları içeren çok sayıda tehlikeli kaza nedeniyle, bataryaların taşınması ve depolanmasına ilişkin bazı düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin; Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü, Li-iyon bataryaların yolcu uçaklarında kargo olarak gönderilmesini yasaklamıştır. Bataryaların yalnızca kargo uçaklarında gönderildiğinde ise, şarj durumlarının %30'dan az olması gerekmektedir (URL-4, 2023). Hem güvenlik hem de batarya sağlığı açısından doluluk oranının depolama sırasında %30'u geçmemesi önem arz etmektedir. Ölümcül kazalardan çıkarılacak dersler bize Li-iyon batarya teknolojisi güvenliğinin ciddi bir sorun olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, daha güvenli ve daha yüksek enerji yoğunluklu bataryalar geliştirmek için Li-iyon bataryalarda arızaları tetikleyen etkiler bilinmelidir. Li-iyon bataryalarda arızaların oluşmasını tetikleyen en önemli üç unsur;

- Gerilim etkisi,
- Sıcaklık etkisi,
- Katot kimyasıdır.

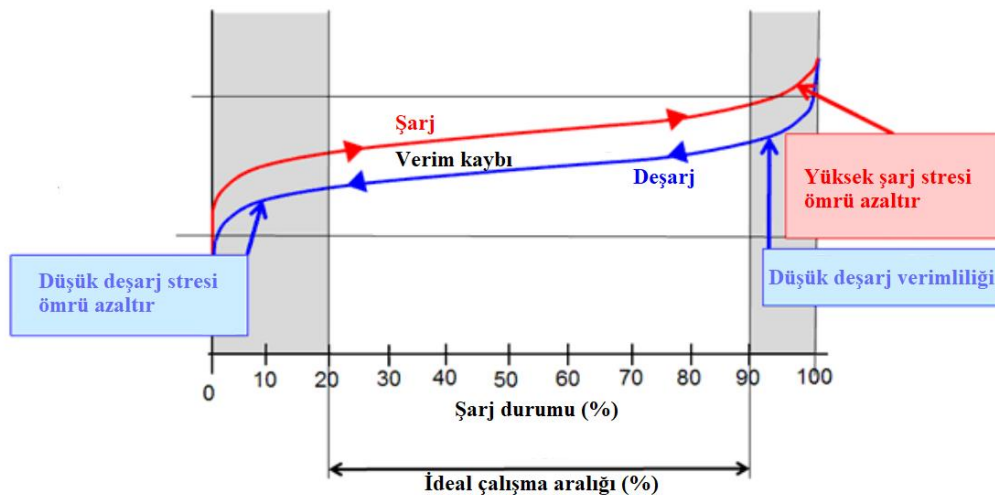
#### **3.3.4.1. Gerilim etkisi**

Li-iyon bataryaların teknik dokümanında verilen şarj gerilimin üzerinde şarj edilmesi durumunda lityum kaplama ve aşırı ısınma sorunlarına neden olur. Lityum kaplama, aşırı akımlarda lityum iyonlarının anot üzerinde birikmesi olarak bilinir (Bergveld, 2001). Bu durum bataryada kapasite kaybına sebep olur. Ayrıca anot yüzeyinde anizotropik olarak büyüyen dendritler bataryada kısa devreye neden olur (Warner, 2019). Li-iyon bataryada hem lityum kaplama hem de aşırı ısınma bataryanın çevrim ömrünü azaltmaktadır. Li-iyon bataryaların genel olarak şarj kesme gerilimi 4,2V'dur (Özcan ve ark., 2021). Bu değer üzerinde gerçekleşen şarj gerilimi bataryanın kapasitesini ve ömrünü azaltarak güvenlik zafiyetine sebep olmaktadır. Şekil 3.11'de 4,2V ve üzerinde gerçekleşen şarj işlemlerinde Li-iyon bataryanın kapasite ve çevrim ömründeki değişimin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11. Li-iyon bataryalarda şarj kesme geriliminin kapasite ve çevrim sayısına etkisi (Choi ve Lim, 2002)

Li-iyon bataryalar yalnızca yüksek gerilimden etkilenmezler aynı zamanda düşük gerilim, elektrot malzemesinin kademeli olarak bozulmasına neden olur. Gerilimin 2V'un altına düşmesi durumunda anot ve katot üzerinden farklı etkiler görülür. Böyle bir durumda anot üzerindeki bakır çözünmesi gerçekleşir ve yeniden şarj işlemi gerçekleştirildiğinde bakır çökmesi ile karşı karşıya kalınır (Choi ve Lim, 2002). Bakır çökmesi, anot ve katot arasında elektronların atlayacağı bir köprü kurarak kısa devreye sebep olur. Katotta ise oksijen kaybına yol açarak batarya kapasitesinin azalmasına neden olur (Warner, 2019). Bu bağlamda Li-iyon bataryaların çalışma aralığı belirli bir gerilim aralığında olması gereklidir. Şekil 3.12'de Li-iyon bataryaların çalışma aralığı verilmiştir.

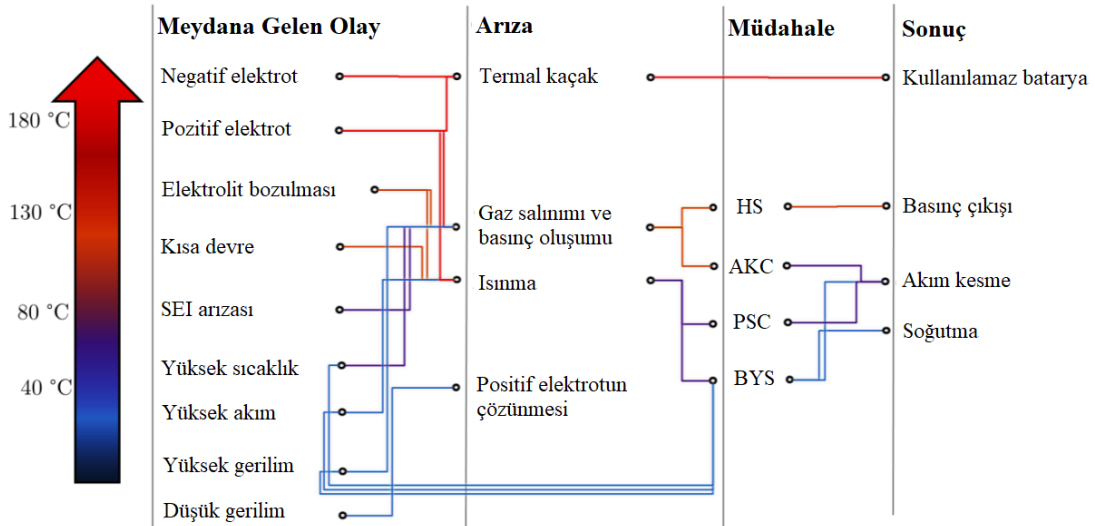


Şekil 3.12. Li-iyon bataryaların çalışma aralığı (URL-5, 2023)

Şarj ve deşarj arasındaki histerezis genelde iç dirençten kaynaklanmaktadır. Sıcaklık değişimi sonucunda batarya iç direncinde de değişim gözlenir. Bundan dolayı EA'larda bataryanın katalog değeri aralığında çalışması için ısı pompası, soğutma sistemi ve batarya paket yerleşimi önem arz etmektedir.

### 3.3.4.2. Sıcaklık etkisi

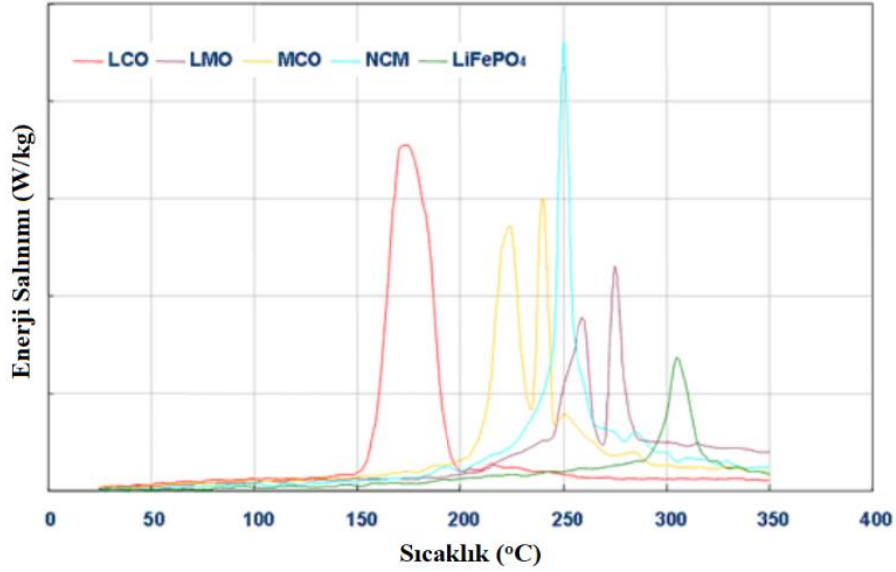
Sıcaklık yalnızca Li-iyon bataryalarda değil tüm batarya türlerinde çevrim ömrü ve kapasite üzerinde doğrudan etkilidir. Şarj ve deşarj süreçlerinde bataryada ısınmalar gerçekleşir ve ısı kontrolü yapılmaz ise batarya arızaları ile sonuçlanır. Li-iyon bataryalarda; direnç artışı kaynaklı omik ısınma, reaksiyon ısısı ve polarizasyon ısınması olmak üzere temelde üç farklı ısı kaynağı vardır (Biçer ve ark., 2021). Şekil 3.13'te Li-iyon bataryalarda sıcaklık artması ile gerçekleşecek olaylar, müdahaleler ve sonuçları verilmiştir. Li-iyon bataryaların deşarj ve şarj kaynaklı ısınmalarını önlemek ve batarya sıcaklığının gereken değerin üstüne çıkmasını önlemek amacıyla EA'larda klima sistemlerinde kullanılan soğutma sıvısı batarya paketleri içine konulan soğutma kanallarından dolaştırılır. EA'lardaki bu sistemler de araç üzerinde bulunan bataryalardan önemli bir ekstra güç tüketilmesine neden olmaktadır. Li-iyon bataryalarda sadece yüksek sıcaklık değil aynı zamanda düşük sıcaklıkta batarya üzerinde olumsuz etkileri vardır. Li-iyon bataryalarda batarya sıcaklığının negatif sıcaklık değerlerine ulaşması durumunda iyon hareketleri azalmaktadır (Etacheri ve ark., 2011). Bu durum batarya kapasitesini olumsuz yönde etkileyerek düşmesine neden olmaktadır. Sıcaklık değerinin çok düşmesi durumunda elektrolit çözeltilsinin de donmasına sebep olarak bataryanın kendisinden beklenen performansı yerine getirememektedir. Bu nedenle EA'ların soğuk havalarda da kendisinden beklenen istekleri yerine getirmesini sağlamak için batarya ısıtma sistemleri kullanılmaktadır.



**Şekil 3.13.** Sıcaklık artması ile Li-iyon bataryalarda meydana gelen olay ve sonuçları (HS; havalandırma sistemi, AKC; akım kesme cihazı, PSC; pozitif sıcaklık katsayısı cihazı, BYS; batarya yönetim sistemini temsil etmektedir.) (Finegan, 2016)

### 3.3.4.3. Katot kimyası

Li-iyon bataryaların koruması anot malzemesinde başlamalıdır. Çünkü sıcaklık etkisi ile bir arıza olduğunda süreç SEI etkisi ile anot üzerinde başlamaktadır (Biçer ve ark., 2021). Süreç katot malzemesinde ulaştığında artık bataryayı geri kazanma durumu yoktur. Ancak katot malzemesinin süreci hızlandırdığı gerçeği unutulmamalıdır. Alevlenme ve patlama durumlarındaki büyük enerjiyi veren katot malzemesidir (Wang ve ark., 2021). Katot malzemesi içerisindeki nikel ve kobalt elementlerinin miktarı arttıkça batarya ısınması daha fazla görülmektedir (Biçer ve ark., 2021). Bu bağlamda batarya arızalarındaki güvenliği sağlamak için katot malzemesi önem arz etmektedir. Şekil 3.14'te Li-iyon bataryalarda kullanılan katot malzemelerinin sıcaklık dayanımları verilmiştir.



Şekil 3.14. Li-iyon bataryaların katot malzeme sıcaklık dayanımları (URL-5, 2023)

Li-iyon bataryalardaki arızalar EA'larda beklenmedik yangınlara ve patlamalara neden olabilmektedir. Bu nedenle EA endüstrisi güvenlik standartlarını sürekli olarak güncellenmek için çalışmalar yürütmektedir. Sonuç olarak, batarya teknolojisindeki ilerlemeler EA'ların gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Batarya tasarımı, malzemeleri ve üretim süreçlerindeki sürekli yenilikler, EA'ların performansını, menzili ve genel verimliliğini de önemli ölçüde artırmaktadır.

## 4. BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMİ

### 4.1. Bulanık Mantık

Günlük hayatta karşılaştığımız problemleri geçmişte yaşadığımız problemlerden kazandığımız deneyimler ile çözebiliriz. Ancak problemlerin bazıları kolaylıkla tanımlanırken bazıları ise belirsizlik sebebi ile çözüme ulaşamaz. Bu durum problemlerin çözümünde belirsizliklerin önemli bir yer tutabileceğini göstermektedir. Bulanık mantık sistemleri, bu tip problemlerin çözümünde geleneksel mantıktan belirsiz düşüncelere geçişin öncüsü olmuştur (Bělohlávek ve ark., 2017).

Bulanık mantık teorisi 1965 yılında Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesi'nden Lofii Zadeh tarafından geliştirilmiştir (Zadeh, 1965). Bu yöntem geleneksel mantık teorisinin bir genellemesini temsil eder ve gerçek dünya problemlerinin çözümünde daha uygulanabilir bir yöntemdir. Bulanık mantık özellikle, belirsiz verilerle karar vermek için kullanılabilir. Gerçek dünyada uygulanabilirliğinin olması nedeniyle bulanık küme teorisi günümüz matematiğinde önemli bir araştırma alanı olmuştur (Dubois ve Prade, 1980; Kandel ve Lee, 1979). Tez çalışmasının bu bölümde, EA'larda kullanılan faydalı frenleme sisteminin batarya üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için bulanık mantık kontrol sistemi sunulması hedeflenmiştir.

#### 4.1.1. Bulanık mantık sisteminin avantajları ve dezavantajları

Bulanık mantık, karar verme ve kontrol sistemlerinde belirsizlik ve kesinsizlik ile ilgilenen matematiksel bir yöntemdir. Bulanık mantık sisteminin avantajları şu şekildedir;

- Bulanık mantık, verilerin veya bilgilerin kesin olmadığı durumları ele almada iyi bir yöntemdir (Çelikyılmaz ve Türkşen, 2009). Geleneksel ikili mantık kullanılarak temsil edilmesi zor olabilen “çok sıcak” veya “biraz soğuk” gibi belirsiz kavramların temsil edilmesine olanak tanır.
- Bulanık mantık, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde esnek bir yaklaşım sağlar. Gerçek dünya problemlerinin nüanslarını ve inceliklerini yakalayabilir, bu da onu çok çeşitli uygulamalar için uygun çözüm yöntemi olmasını sağlar (Dubois ve Prade, 1980).

- Bulanık mantık aynı anda birden fazla çelişkili hedefi optimize edebilir, bu da karmaşık sistemlerde karar verme için faydalıdır (Zadeh, 1965).
- Bulanık mantık sistemleri gerçek zamanlı olarak adapte olabilir ve kendini ayarlayabilir, bu da sistemi dinamik ve değişen ortamlar için uygun hale getirir (Alonso ve ark., 2009).
- Bulanık mantık, uzmanların değişkenleri ve kuralları tanımlamak için doğal dil terimlerini kullanmasına olanak tanıyarak, alanında uzmanların kontrol sistemlerini tasarlamasını ve anlamasını daha erişilebilir hale getirir (Kandel ve Lee, 1979).
- Bulanık sistemler gürültülü verilerle başa çıkabilir ve ölçümlerdeki küçük dalgalanmalara veya hatalara karşı dayanıklıdır, bu da sistemi gürültülü sensör verilerine sahip uygulamalar için uygun hale getirir (Çelikyılmaz ve Türkşen, 2009).

Her sistemin avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle bulanık mantık kullanımında bilgisinden faydalanılan uzman kişilerin sahip olduğu bilgi ve tecrübeleri oldukça önemlidir. Bu bağlamda üyelik fonksiyonları ve bulanık kurallar oluşturulur. Ayrıca üyelik fonksiyonu tiplerinin belirlenmesi de deneme yanılma yöntemine dayanmasından dolayı uzun süreler harcanmasına sebep olmaktadır. Bulanık mantık sisteminin dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Bulanık mantık sistemleri, değişkenlerin ve kuralların sayısı arttıkça karmaşık hale gelebilir ve bu da fonksiyonel olarak tasarlamayı, uygulamayı ve geliştirilen fonksiyonların sürdürülmesini zorlaştırabilir (Zadeh, 1965).
- Bulanık mantıkta, özellikle çok sayıda kural ve değişkenle uğraşırken hesaplama açısından yapılması gereken iş yükünün artmasına neden olabilir. Bazı uygulamalarda gerçek zamanlı olarak işlem yapmak hem zor hem de belirtilmeye çalışılan maliyet artışlarına sebep olabilir.
- Bulanık mantık, klasik kontrol teorisi veya diğer makine öğrenme teknikleri kadar yaygın olarak benimsenmemiştir, bu da uygulanması için sınırlı bir uzman ve kaynak havuzu olabileceği anlamına gelir (Kandel ve Lee, 1979).
- Bulanık mantık dilsel kurallara izin verirken, bu kuralların yorumlanması öznel olabilir ve uzmanlar arasında farklılık gösterebilir (Dubois ve Prade, 1980). Bu

da sistemin ince ayarının yapılmasında ve doğrulanmasında zorluklara yol açabilir. Bu açıdan deneysel testlerin gerçekleştirilmesi büyük önem arz eder.

- Bir bulanık mantık sisteminin oluşturulması genellikle uzman bilgisine dayanır ve bu bilginin edinilmesi zaman alıcı ve maliyetli olabilir (Alonso ve ark., 2009).

Özetle, bulanık mantık çeşitli uygulamalarda belirsizlik ve kesinsizlik durumlarında çözüm üretmek için önemli bir yöntemdir. Avantajları, muğlak ve belirsiz bilgileri ele alma kabiliyeti, esnekliği ve uyarlanabilirliğinde yatmaktadır. Bununla birlikte, belirli bir problem için kullanılıp kullanılmayacağına karar verirken göz önünde bulundurulması gereken karmaşıklık, yorumlanabilirlik ve hesaplama gereksinimleri açısından sınırlamalar gerektirebilir. Bu tez çalışmasında bulanık mantık sisteminin dezavantajları deneysel çalışmalar ile toplanan hassas veriler ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım yöntemi sayesinde önlenmiştir.

#### **4.1.2. Bulanık mantık modelleme tipleri**

Literatürde genel olarak üç tür bulanık çıkarım yöntemi önerilmektedir; bunlar aşağıda verilen şekilde üç ana gruba ayrılabilir (Iancu, 2012).

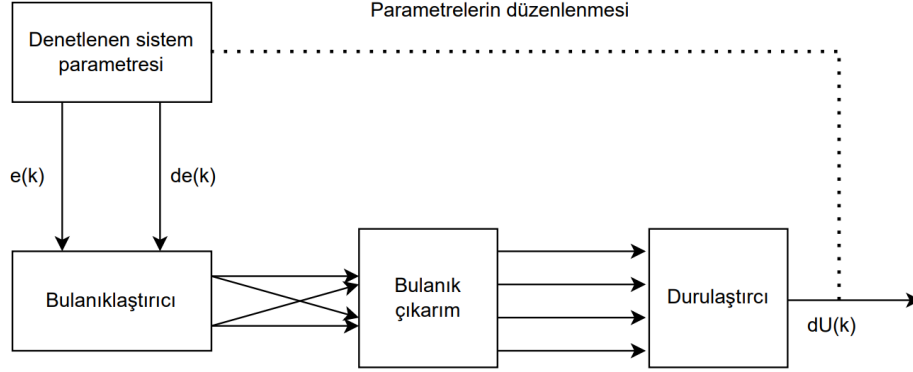
- Mamdani tipi bulanık modelleme
- Sugeno tipi bulanık modelleme
- Tsukamoto bulanık modelleme

Bu üç yöntemin tümü iki sürece ayrılabilir. İlk işlem, girdi değişkenlerinin net değerlerinin uygun bulanık kümelerle göre bulanıklaştırılmasıdır ve bu süreçte bu üç yöntem tamamen birbirinin aynısıdır (Wang ve Chen, 2014). İkinci süreçte ise tüm kuralların sonuçları çıktı için tek bir kesin değere entegre edildiğinde farklılıklar ortaya çıkar (Sakti, 2014).

##### **4.1.2.1 Mamdani tipi bulanık modelleme**

Mamdani çıkarımında If-Then kuralının sonucu, bulanık küme ile tanımlanır (Mamdani ve Assilian, 1975). Her kuralın çıktısı bulanık kümesi, eşleşen bir sayı ile

yeniden şekillendirilir ve bu yeniden şekillendirilmiş bulanık kümelerin tümü toplandıktan sonra durulaştırma yapılması gereklidir (Iancu, 2012). Şekil 4.1’de bulanık mantık sisteminin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 4.1. Bulanık sistemin genel yapısı (Mamdani ve Assilian, 1975)

Şekil 4.1’de  $e(k)$  ayarlanması gereken parametrenin hatasını,  $de(k)$  bu hatanın türevini ve  $dU(k)$  ise kontrol işaretini temsil etmektedir.

#### 4.1.2.2. Sugeno tipi bulanık modelleme

Sugeno çıkarımında If-Then kuralının sonucu, girdi değişkenlerine göre bir polinomla açıklanır ve her kuralın çıktısı tek bir sayı olur (Sugeno, 1985). Daha sonra nihai çıktıyı hesaplamak için bir ağırlıklandırma mekanizması uygulanır. Sugeno çıkarımı karmaşık durulaştırmayı engellemesine rağmen, polinomların parametrelerini belirleme işlemi, Mamdani çıkarımına göre daha basittir (Wang ve Chen, 2014). Bu nedenle Mamdani çıkarımı daha popülerdir. Genel olarak Sugeno modelleme yöntemi Mamdani yönteminin matematiksel uyarlamasıdır (Alonso ve ark., 2015). Sugeno bulanık modelinin hesaplanması Formül 4.1’de ve 4.2’de verilmiştir.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{f_i}^{CR} \cdot f_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{f_i}^{CR}} \quad (4.1)$$

$$\mu_{f_k}^{CR} = \prod_{i=1}^n \mu_{f_k}^{x_i} \quad (4.2)$$

Formüllerde,

$y$  ; bulanık sistem çıkışı,

$f_i$  ; giriş değişkeni,

$f_k$  ; çıkış değişkeni,

$\mu_{f_i}^{CR}$  ; her çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonlarının ağırlık derecesi,

$\mu_{f_k}^{x_i}$  ; çıkış değişkenindeki bulanık kümelerin üyelik fonksiyon değerlerini temsil

etmektedir.

Genel olarak Sugeno modeli; güçlü matematiksel yönü, durulaştırmaya ihtiyaç duymaması, doğrusal yöntemlerde kullanılabilir olması ve çıkışın sürekliliğinden dolayı avantajlı bir modeldir. İleri düzey modellerinin karmaşık olması ise Sugeno modelinin dezavantajıdır (Sugeno, 1985).

#### 4.1.2.3. Tsukamoto tipi bulanık modelleme

Tsukamoto tarafından geliştirilen model bulanık mantık alanında akıl yürütme ve çıkarım metodudur (Tsukamoto ve Terano, 1977). Tsukamoto yönteminde, If-Then kuralının her bir sonucu, monoton üyelik fonksiyonuna sahip bir bulanık küme ile temsil edilmektedir. Diğer yöntemlerden farklı olarak monoton artan veya monoton azalan fonksiyonlar bu modelde kullanılmaktadır. Tsukamoto çıkarımı ise, Mamdani ve Sugeno yönteminin bir kombinasyonu gibi görünmektedir ancak bu iki modele göre daha verimsizdir (Iancu, 2012).

#### 4.1.3. Sinirsel bulanık ağlar

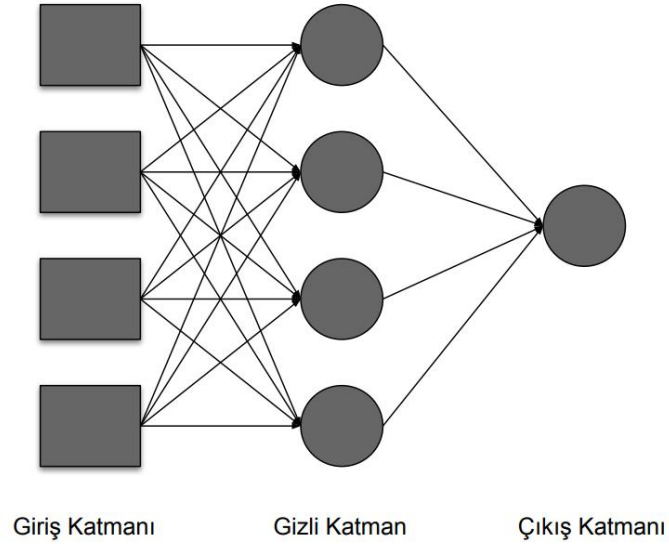
Sinir ağları, insan sinir sistemindeki biyolojik nöronlardan ilham alan bilgi işleme paradigmalarıdır (Kosko ve Burgess, 1998). Bilgiyi yönetmek için insan beyni yaklaşımını taklit etmek üzere tasarlanmışlardır. Bir sinir ağı, her biri bir işlevi yerine getirmek için çalışan birbirine bağlı bileşenlerden (nöronlar) oluşur ve ağın genel çıktısı bunların ağırlıklı toplamıdır (de Campus Souza, 2020). Bir sinir ağı, elemanlar arasındaki ağırlıkların değerlerini ayarlar ve buna bağlı olarak ağın iç yapısını değiştirerek gerekli ilişkiyi öğrenmek için eğitilebilir (Das ve Maulik, 2020). Sinir ağlarının önemli bir gücü,

eğitilmiş bilgiyi genelleştirme ve yeni verilere doğru yanıtlar verme yeteneğidir, bu da onu daha uyarlanabilir ve kullanışlı bir veri modelleme aracı haline getirir (Kulkarni ve Honwadkar, 2016). Bir sinir ağı bir dizi özelliğe göre oluşturulur. Bunlar şunları içerir;

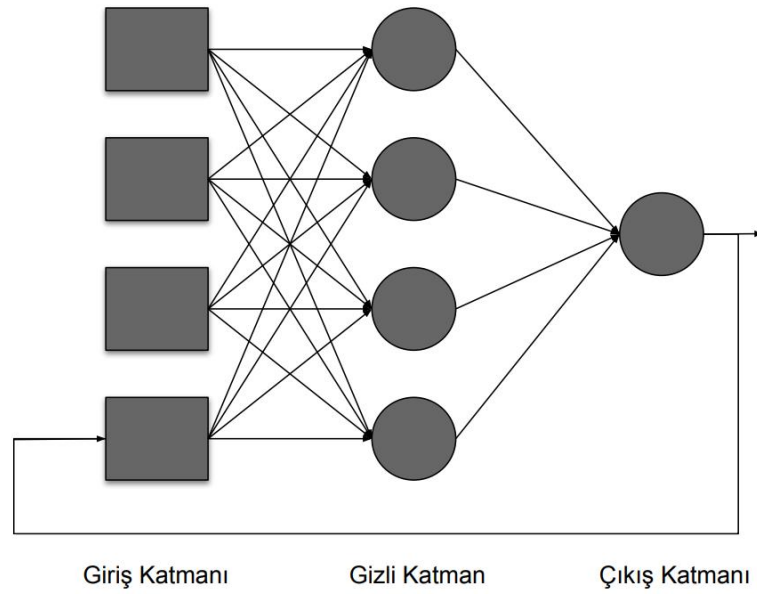
- Sinyallerin hareket ettiği nöronlar arasındaki bağlantı mimarisi,
- Parametrelerin ağırlık belirleme yöntemi veya öğrenme algoritması,
- Nöronların girdi transfer fonksiyonlarıdır.

Sinir ağları örüntü tanıma, fonksiyon yaklaşımı, stok tahmini, enerji piyasası tahmini, görüntü işleme, hava tahmini ve güvenlik uygulamaları gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir (Boopathi ve Kanike, 2023). Özellikle, sinir ağları karmaşık yapıdaki problemleri çözmede geleneksel metodolojilerden daha iyi performans göstermiştir (de Campus Souza, 2020). Bu durum, sinir ağlarının verilerden gerekli bilgileri çıkarmak için eğitilmelerinin bir sonucudur ve girdiler ile çıktılar arasındaki korelasyon doğrusal değilse en iyi şekilde çalışırlar. Genel olarak sinir ağlarının çalışması, bilgisayarların insan beyni mekanizmasını taklit etme durumudur (Kosko ve Burgess, 1998).

Bir sinir ağı genellikle bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşur (Fabiyyi, 2019). Sinir ağlarının işlem düğümleri, ağın istenen amacına bağlı olarak bir dizi katman halinde bir araya getirilebilir (Das ve Maulik, 2020). Nöronların bu şekilde düzenlenmesi sinir ağının genel yapısını oluşturur. Sinir ağlarının iki önemli mimarisi ileri beslemeli ve geri beslemeli yapılardır. İleri beslemeli sinir ağları, yapıda döngülerin olmamasıyla işlem yapar çünkü giriş katmanı yalnızca çıkış katmanına eşlenir ancak tersi mümkün değildir (Fabiyyi, 2019). Böylece ağ sinyalleri sadece ileriye doğru hareket eder. şekil 4.2’de çok katmanlı ağ yapısı olarak bilinen bir ileri beslemeli sinir ağı gösterilmektedir. Diğer yandan, geri beslemeli sinir ağları yapılarında döngüler içerir ve bu da iki mimariyi birbirinden ayıran ana bileşendir. şekil 4.3’te, çıkışın girişe geri eşlendiği bir geri beslemeli, sinir ağı gösterilmektedir.



Şekil 4.2. İleri beslemeli sinir ağı yapısı



Şekil 4.3. Geri beslemeli sinir ağı yapısı

Algoritma eğitimi olarak da bilinen ağ öğrenme notasyonu, bir ağı belirli bir sonuç üretmesi için ağırlıkları ve parametreleri değiştirme uygulamasıdır (Lin, 1995). İki farklı eğitim kuralı kategorisi ayırt edilir. Bunlar denetimli ve denetimsiz öğrenme yöntemleridir. Denetimli öğrenmede, ağın sistemi tanımlaması için bir dizi girdi ve hedef çıktı içeren eğitim verileri verilir (Lin ve Lu, 1996). Girdiler modele uygulandıkça, ağ sonucu sistem hedefiyle karşılaştırılır. Denetimli öğrenmenin kuralı, tüm sistem hedefi

için girdi-çıkıtı ön koşulunu tutarlı bir şekilde yerine getirebilen ağ parametrelerini ayarlamaktır (de Campus Souza, 2020).

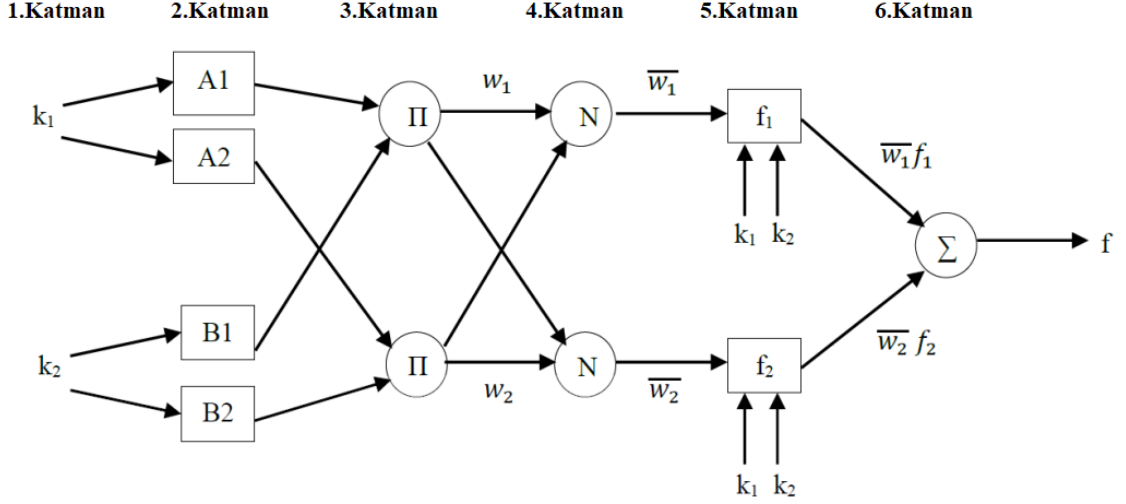
Denetimsiz öğrenmede ise istenen çıktı bilinmemektedir ve bu nedenle ağırlıkları ayarlamak için harici bir sinyal yoktur (Fabiya, 2019). Bunun yerine, öğrenme süreci kararlı ağırlıklarla bir denge koşuluna ulaşılan kadar algoritma performansını sürekli olarak izler. Eksik bilgi ile öğrenme, giriş sinyalleri içindeki eğilimleri ve tutarlılıkları arar ve ağ işlevi ağırlıklarına uyarlar (Pal ve ark., 2000). Buna göre ağ, topolojisini oluşturmak ve parametreleri öğrenmek için kendini organize eder.

## 4.2. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Bulanık sistemlerin etkinliğini artırılmasına katkı sağlayan uyarlamalı tekniğe sahip yöntemlerden biri de ANFIS tekniğidir (Jang, 1996). Bu teknik, bulanık mantık modelinde veri setini kullanarak öğrenen bir model geliştirilmesini olanak tanır. ANFIS; sınıflandırma, regresyon ve sistem modelleme gibi görevleri yerine getirmek için yapay sinir ağlarını (YSA) ve bulanık mantığı birleştiren bir hesaplama modelidir (Karaboğa ve Kaya, 2019). ANFIS özellikle karmaşık ilişkiler veya belirsiz bulanık veriler içeren problemlerin çözümünde kullanışlıdır (Denia ve ark., 2004).

### 4.2.1. ANFIS mimarisi

ANFIS tekniğinin mimarisi, verilen giriş ve çıkış veri çiftleri ile bulanık çıkarım sistemi ve sinir ağından oluşur (Jang, 1996). Bu teknik, öğrenme algoritmalarını kullanan, kendi kendini ayarlayan ve uyarlanabilir bir hibrit kontrolördür. Başka bir ifade ile, bu teknik bulanık mantığa verilen giriş ve çıkış parametrelerini izlemesine izin vererek üyelik fonksiyonu parametrelerini ayarlama yeteneği verir. Şekil 4.4'te ANFIS'in mimari modeli gösterilmektedir. Bu model birinci dereceden Takagi-Sugeno-bulanık modeli olarak adlandırılır. Şekil 4.4'te basitlik açısından, ANFIS modelinin  $k_1$  ve  $k_2$  değişkenleri iki girişi ve  $f$  değişkeni bir çıkışı temsil etmektedir.



Şekil 4.4. ANFIS genel mimarisi (Buriboev ve Muminov, 2022)

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere ANFIS modeli 6 katmandan oluşmaktadır. 1. katman girdi katmanıdır ve bu katmandaki her  $i$  düğümü, düğüm işlevine göre uyarlanabilir. Her  $i$  düğümü için çıkış Formül 4.3'te ve 4.4'te verilmiştir.

$$O_{1,i} = \mu A_i(x), \quad i = 1, 2 \quad (4.3)$$

$$O_{1,i} = \mu B_{i-2}(x), \quad i = 3, 4 \quad (4.4)$$

2. katman bulanıklaştırma katmanıdır. Bu katmandaki her düğüm çıkışı, giriş değerlerine ve üyelik fonksiyonlarına bağlıdır. 3. katman kural katmanıdır. Bu katmandaki üyelik dereceleri  $\mu A_i(x)$  ve  $\mu B_i(y)$  olarak ifade edilmektedir. Bu katmanda 2. katmandan gelen üyelik derecelerinin çarpımı yapılarak  $w_i$  düğüm çıkışı elde edilmektedir. 3. katmanda gerçekleşen işlemlerin matematiksel ifadeleri Formül 4.5'te verilmiştir. Formülde  $O_{3,i}$  3. katman çıkışını ifade etmektedir.

$$O_{3,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (4.5)$$

4. katman normalizasyon katmanıdır ve bu katmanda kural katmanından gelen değerlerin ateşleme seviyesi hesaplanmaktadır. Normalleştirilmiş ateşleme seviyesi olarak bilinen  $\mu_i$ 'nin hesaplanması Formül 4.6'da verilmiştir.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (4.6)$$

5. katman arındırma katmanıdır. Normalizasyon sonucunda verilen kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değeri bu katmanda hesaplanmaktadır. 5. katmanın sonuç değeri Formül 4.7'deki gibi hesaplanabilir. Burada  $\bar{w}_i$  4. katmandan gelen normalleştirilmiş ateşleme gücünü ifade eder. Formülde  $p_i, q_i, r_i$  değerleri ise  $i$ . kuralın sonuç parametrelerini ifade etmektedir.

$$O_{5,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (4.7)$$

6. katman ise toplam katmanıdır. Bu katmanda ANFIS sisteminin çıkış değeri elde edilmektedir. Bundan dolayı bu katmanda yalnızca bir düğüm vardır. Arındırma katmanından gelen her düğüm bu katmanda toplanarak Formül 4.8'de verildiği gibi bir sonuç değeri elde edilir. Formülde genel çıktı  $\Sigma$  etiketi ile sabit bir düğüm tarafından hesaplanır  $f$  ise gelen tüm değerlerin toplamını ifade etmektedir.

$$f = O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i = 1, 2 \quad (4.8)$$

#### 4.2.2. Üyelik fonksiyonları

Bulanık kümeleri temsil eden üyelik fonksiyonları, belirli matematiksel formül türleri ile tanımlanan farklı tiplere sahiptir. En çok kullanılan üyelik fonksiyonu tipleri üçgen, yamuk, Gauss, çan eğrisi, Cauchy, sinüzoid ve sigmoiddir (Zile, 2020). Bu üyelik fonksiyonlarının özellikleri bu alt başlıkta analiz edilecektir. Bulanık kümeler üzerindeki işlemleri kolaylaştırmak için üyelik fonksiyonları, bulanıklık parametresi cinsinden formüle edilir. Parametre ayarlama esnekliği, üyelik fonksiyonlarını da ayarlanabilir hale getirir. Yapılarındaki doğrusallık nedeniyle üçgen ve yamuk tipi üyelik fonksiyonları diğerlerine göre daha çok tercih edilmektedir (Bhattacharyya ve Mukherjee, 2020). Ancak bazı uygulamalarda üyelik fonksiyonları yapay sinir ağlarında olduğu gibi türev gerektiren öğrenme algoritmaları ile belirlenir ve ayarlanır. Bu durumda türevleri kolay

olan fonksiyonlar tercih edilir (Zangeneh ve ark., 2020). Üyelik fonksiyonlarını aşağıda belirtildiği gibi yedi alt sınıfta toplayabiliriz.

- Üçgen üyelik fonksiyonu
- Yamuk üyelik fonksiyonu
- Gauss üyelik fonksiyonu
- Çan eğrisi üyelik fonksiyonu
- Cauchy üyelik fonksiyonu
- Sinüzoid üyelik fonksiyonu
- Sigmoid üyelik fonksiyonu

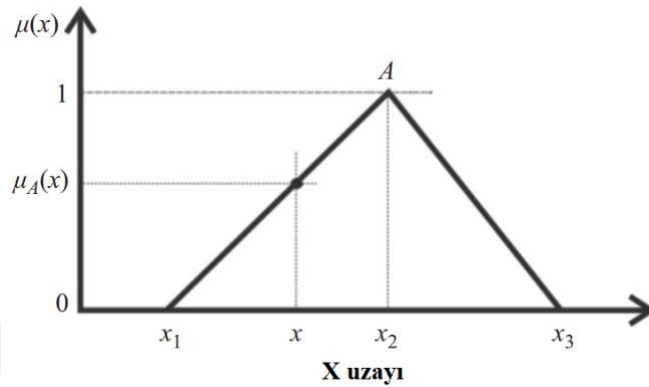
#### 4.2.2.1. Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonu, genellikle bir elemanın bulanık kümeye üyeliğini veya aitlik derecesini üçgen şekline benzer bir şekilde tanımlamak için kullanılır. Üçgen üyelik fonksiyonları, çeşitli uygulamalarda belirsizliği modellemek için yaygın olarak kullanılır (Altas, 2017). Bu tür fonksiyonlar genellikle bir belirli üçgen biçimindeki eğri tarafından tanımlanır ve bu eğri, belirli bir üyelik derecesine sahip olan giriş değerlerini belirler (Zangeneh ve ark., 2020). Üçgen üyelik fonksiyonu genellikle üç temel parametre kullanır;

- Ortanca değer: Üyelik fonksiyonunun tepe noktasının giriş değerini belirtir. Bu değer, üyelik fonksiyonunun en yüksek değerine ulaştığı noktayı ifade eder.
- Sol yayılma veya sol eğim: Üyelik fonksiyonunun sol tarafının eğimini ve genişliğini belirtir. Yani sol taraftaki yükselme hızını kontrol eder.
- Sağ yayılma veya sağ eğim: Üyelik fonksiyonunun sağ tarafının eğimini ve genişliğini belirtir. Yani sağ taraftaki yükselme hızını kontrol eder.

Üçgen üyelik fonksiyonları Şekil 4.5'te gösterildiği gibi doğrulardan oluşur ve Formül 4.9'da verilen doğru denklemlerinin kombinasyonu ile gerçekleştirilir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{|x| - |x_1|}{|x_2| - |x_1|}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ \frac{|x_3| - |x_1|}{|x_3| - |x_2|}, & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0 & \text{diğer aralıklar için} \end{cases} \quad (4.9)$$



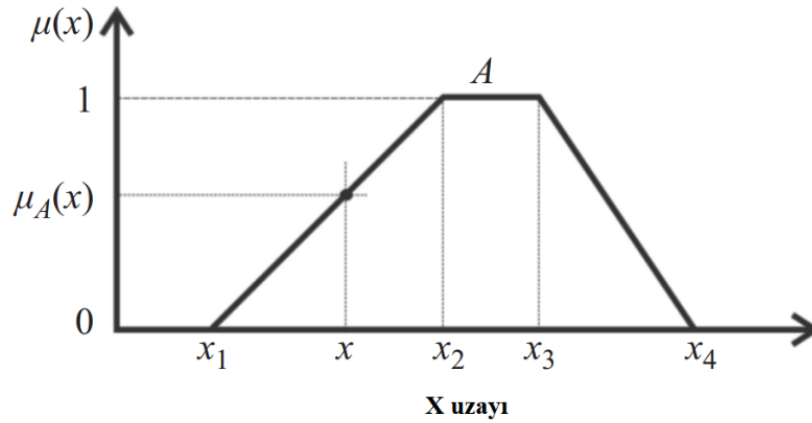
Şekil 4.5. Üçgen üyelik fonksiyonu (Altas, 2017)

Şekil 4.5'te üçgen üyelik fonksiyonu gösteriminde kullanılan  $x$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  ve  $x_3$  parametreleri  $A$  üyelik fonksiyonunun konumunu ifade eder. Benzer şekilde sahip yeni bir üyelik fonksiyonu tanımlamak için parametrelerin değerlerini değiştirmek yeterlidir.

#### 4.2.2.2. Yamuk üyelik fonksiyonu

Yamuk tipi üyelik fonksiyonları, üçgen tipinde olduğu gibi doğru denklemlerinin birleşimi olarak elde edilir. Yamuk üyelik fonksiyonları üçgen tiplerden tepesindeki dik bölge ile ayrılır (Altas, 2017). Yamuk üyelik fonksiyonları bulanık olmayan düz bir tepeye sahipken, üçgen üyelik fonksiyonları keskin bir tepeye sahiptir. Yamuk üyelik fonksiyonu grafiği Şekil 4.6'da matematiksel ifadesi ise Formül 4.10'da verilmiştir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{|x| - |x_1|}{|x_2| - |x_1|}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ \frac{|x_4| - |x_1|}{|x_4| - |x_3|}, & x_3 \leq x \leq x_4 \\ 0 & \text{diğer aralıklar için} \end{cases} \quad (4.10)$$



Şekil 4.6. Yamuk üyelik fonksiyonu (Altas, 2017)

Şekil 4.6'da üçgen üyelik fonksiyonunda olduğu gibi yamuk üyelik fonksiyonunda da kullanılan  $x$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  ve  $x_3$  parametreleri  $A$  üyelik fonksiyonunun konumunu ifade eder.

#### 4.2.2.3. Gauss üyelik fonksiyonu

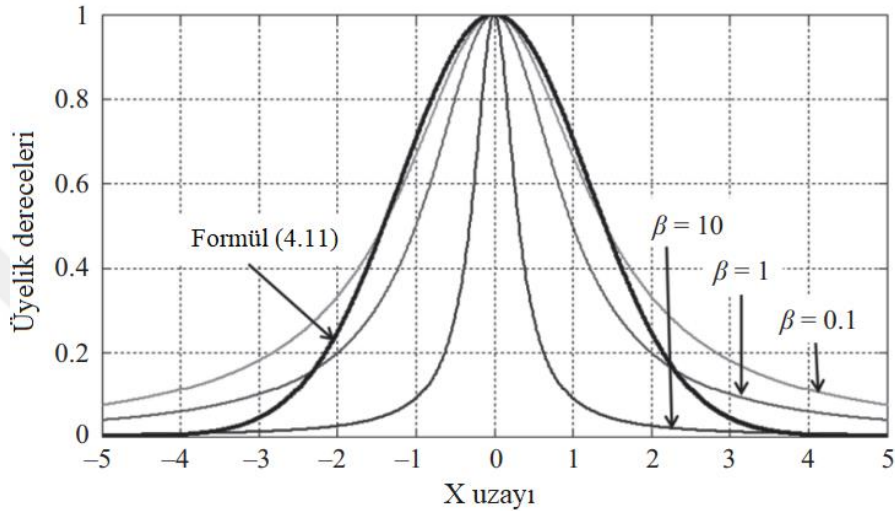
Üçgen üyelik fonksiyonu keskin bir tepe noktasına sahiptir, bu da onu keskin değişimdeki değişikliklere karşı çok hassas hale getirir. Bu yüksek hassasiyet özelliği nedeniyle üçgen tipi üyelik fonksiyonları, yumuşak geçiş tepkisi gerektiren bazı uygulamalarda tercih edilmemektedir (Zile, 2020). Gauss fonksiyonu yumuşak bir tepe noktasına sahip olduğundan, üçgen tipi üyelik fonksiyonlarına kıyasla keskin değişkenlerdeki değişikliklere karşı daha az duyarlıdır (Altas, 2017). Bir Gauss üyelik fonksiyonu Formül 4.11'deki gibi tanımlanabilir.

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-x_p}{w} \right)^2} \quad (4.11)$$

Formül 4.11'de  $w$ ; üyelik fonksiyonlarının genişliğini,  $x$ ;  $X$  uzayındaki değişkeni ve  $x_p$ ;  $A$  üyelik fonksiyonunun 0-1 aralığındaki değişkeni temsil etmektedir. Formülde  $w$  değerinin yüksek olması sinüs dalgasına yaklaştırırken, düşük değerde olması ise tek bir çizgi haline getirmektedir. Bu bağlamda Gauss üyelik fonksiyonunu daha az bulanık yapacak Formül 4.12'de verilmiştir.

$$u_A(x) = \frac{1}{1 + \beta(x - \alpha)^2} \quad (4.12)$$

Formül 4.12’de üyelik fonksiyonları  $0 < \beta < 1$  aralığında değişen  $\beta$  değerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekil 4.7’de Formül 4.11 ve 4.12’nin karşılaştırılması verilmiştir.

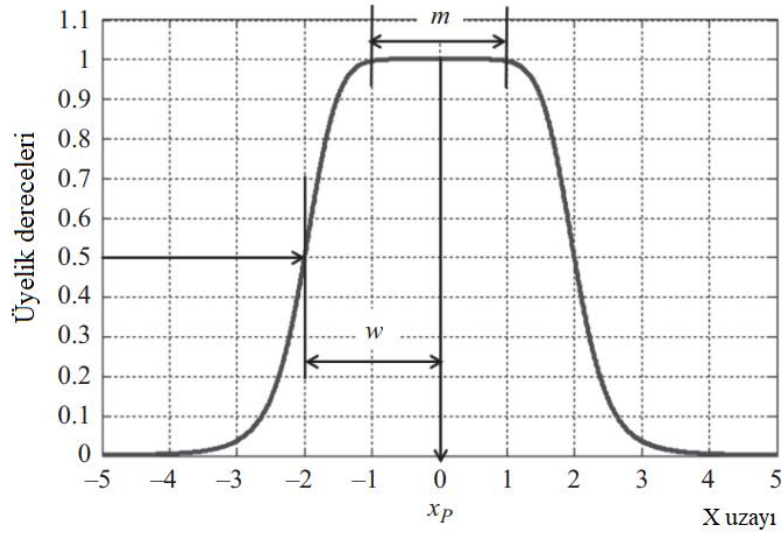


Şekil 4.7. Gauss üyelik fonksiyonu için bir karşılaştırma (Altas, 2017)

#### 4.2.2.4. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu

Çan eğrisi üyelik fonksiyonu, bir elemanın belirli bir bulanık kümeye üyeliğini modellemek için bulanık mantık ve bulanık küme teorisinde sıklıkla kullanılan matematiksel bir fonksiyondur (Bhattacharyya ve Mukherjee, 2020). Bulanık kümeler klasik kümelerin bir genellemesidir ve bir elemanın 0 ile 1 arasında değişen derecelerde bir kümeye ait olabileceği kısmi üyeliğe izin verirler (Altas, 2017). Çan eğrisi şeklindeki üyelik fonksiyonu tipik olarak üç parametre ile tanımlanır:  $A$  ve  $w$  değerleri bulanıklığın değerini ayarlamak için kullanılırken,  $m$  değeri fonksiyon genişliğini ayarlamaktadır. Ayrıca  $m$  değeri negatif olması durumunda çan eğrisi fonksiyonun tersi elde edilir. Formül 4.13’te çan eğrisi denklemi ve Şekil 4.8’de  $x_p = 2$ ,  $w = 2$  ve  $m = 4$  değerleri için çan eğrisi üyelik fonksiyonu verilmiştir.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - x_p}{w} \right|^{2m}} \quad (4.13)$$

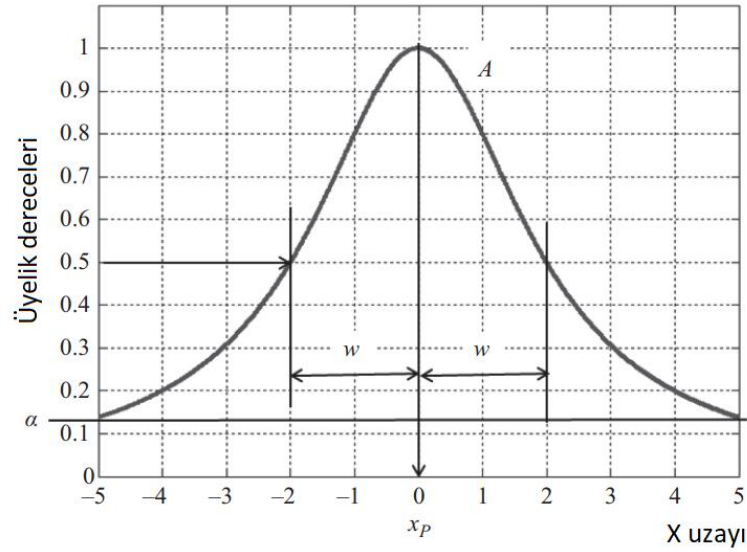


Şekil 4.8. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu (Altas, 2017)

#### 4.2.2.5. Cauchy üyelik fonksiyonu

Cauchy üyelik fonksiyonu, bulanık mantıkta özellikle bazı özel durumlar için kullanılabilir ancak çan eğrisi üyelik fonksiyonu kullanımı daha yaygındır (Zile, 2020). Cauchy üyelik fonksiyonu, tipik olarak olasılık teorisi ve istatistikte kullanılan bir olasılık dağılım fonksiyonu olan Cauchy dağılımı veya Cauchy-Lorentz dağılımı olarak bilinir (Altas, 2017). Cauchy üyelik fonksiyonu Formül 4.14'te ifade edilmiştir. Formülde  $w_p$  üyelik derecesinin tepe noktasını,  $w$  değişkeni ise bant genişliğini ifade etmektedir. Formül 4.13'teki  $m$  ve  $w$  değerleri azaldıkça fonksiyon Cauchy üyelik fonksiyonuna yaklaşmaktadır ve Şekil 4.9'da Cauchy üyelik fonksiyonu verilmiştir. Cauchy dağılımı da çan eğrisi fonksiyonu gibi simetriktir ancak daha yüksek uç nokta olasılığına sahiptir. Cauchy dağılımının iyi tanımlanmış bir ortalaması veya varyansı yoktur, bu da bazı istatistiksel analizlerde çalışmayı daha zor hale getirebilir.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left( \frac{x - x_p}{w} \right)^{2m}} \quad (4.14)$$



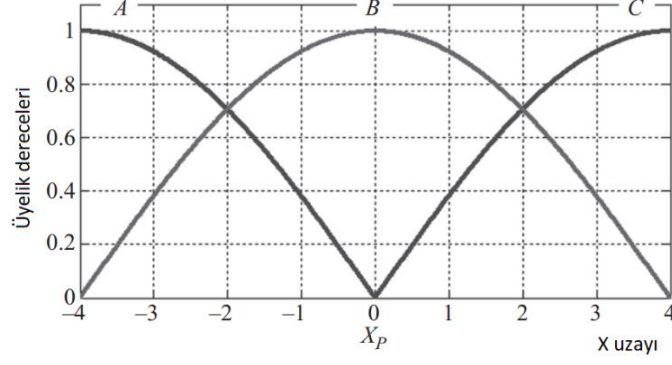
Şekil 4.9. Cauchy üyelik fonksiyonu (Altas, 2017)

#### 4.2.2.6. Sinüzoid üyelik fonksiyonu

Sinüzoid üyelik fonksiyonları, özellikle dönemsel veya dalgalı verilerin işlendiği bulanık mantık uygulamalarında kullanılmaktadır (Bhattacharyya ve Mukherjee, 2020). Bundan dolayı sinüzoid üyelik fonksiyonları; sinyal işleme, zaman serileri analizi ve enerji tahmini uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Jin ve ark., 1996). Ancak, sinüzoid fonksiyonda her uygulama için uygun olmayabilir ve diğer üyelik fonksiyonları, veri dağılımlarına ve gereksinimlere daha iyi uyum sağlayan alternatifler olabilir (Altas, 2017). Bu bağlamda, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak, farklı üyelik fonksiyonları kullanılabilir veya birleştirilebilir. Sinüzoid üyelik fonksiyonu, Formül 4.15'teki gibi tanımlanır.

$$\mu_A(x) = \left| \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} t + \theta \right) \right| \quad (4.15)$$

Formül 4.15'te  $x$ ; girdi değerini,  $\mu_A$ ;  $x$  girdi değerinin üyelik derecesini,  $\alpha$ ; sinüzoid dalganın frekansını ve  $\theta$ ; faz açısını temsil etmektedir. Şekil 4.10'da A, B ve C sinüzoid fonksiyonları verilmiştir.



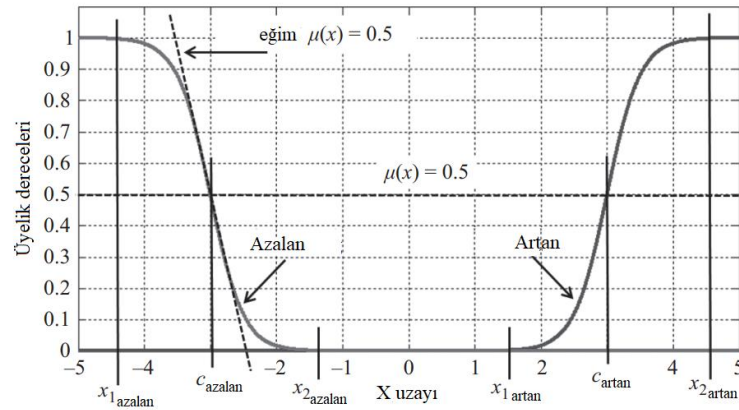
Şekil 4.10. A, B ve C sinüzoid üyelik fonksiyonları (Altas, 2017)

#### 4.2.2.7. Sigmoid üyelik fonksiyonu

Sigmoid üyelik fonksiyonu, genellikle sınıflandırma ve karar verme problemlerinde, özellikle lojistik regresyon gibi algoritmaların çıktılarını sınırlamak veya verileri belirli bir aralığa dönüştürmek için kullanılır (Zangeneh ve ark., 2020). Sigmoid üyelik fonksiyonlarının en yaygın kullanılan biçimi, S-şeklinde bir eğriye sahip olan bir lojistik sigmoid fonksiyonudur (Altas, 2017). Bu sigmoid üyelik fonksiyonu Formül 4.16'daki gibi ifade edilir.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-c)}} \quad (4.16)$$

Formülde,  $\alpha$  ve  $c$  parametreleri sigmoid eğrisinin şeklini ve konumunu ayarlar,  $x$  parametresi ise giriş değerini temsil eder. Şekil 4.11'deki sigmoid üyelik fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 4.11. Artan ve azalan sigmoid üyelik fonksiyonları (Altas, 2017)

### 4.2.3. Tahmin doğruluğu

Gerçek dünyadaki pek çok durum kesin sınırlarla tanımlanamaz. Bulanık mantık, bu tür belirsizlikleri çözmek için kullanılır ve bu durumda tahmin doğruluğu önem arz eder. Tahmin doğruluğunu değerlendirmek için, öncelikle bir problem bağlamı üzerinde uygun bir bulanık mantık modeli oluşturulması ve ardından bu modeli test verileriyle değerlendirmesi gerekir. Bu durumda bulanık mantık tahmin doğruluğu problem bağlamına, modelin tasarımına ve veri kalitesine bağlıdır (Kupchyn ve ark., 2022). Sonuç olarak önerilecek modelin performansı Formül 4.17, 4.18 ve 4.19 kullanılarak değerlendirilir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.17)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{n} \quad (4.18)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4.19)$$

Formüllerde  $O_i$ ; gözlemlenen değer,  $F_i$ ; tahmin edilen değer ve  $\bar{O}$ ; gözlenen değerlerin ortalamasını temsil etmektedir.

### 4.3. Deneysel Sonuçlar ile Kısıtlılıkların Belirlenmesi

EA'larda kullanılan Li-iyon bataryaların ömürlerinin şarj-deşarj döngü sayısı ile bağlantılı olduğu Bölüm 3'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. EA'larda kullanılan faydalı frenleme sistemi batarya üzerinde şarj döngü sayısını artırarak batarya ömrü üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır (Yan ve ark., 2018). Bu tez çalışması kapsamında önerilen batarya ve süperkapasitör hibrit depolama sistemi sayesinde batarya ömrü üzerinde yaşanabilecek olumsuzluklar azaltılarak batarya şarj süreçlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Batarya ömrünü etkileyen faktörler; bataryanın sıcaklığı, şarj akımı, faydalı frenleme esnasında batarya şarj durumu (SoC) ve süperkapasitör SoC bulanık mantık kontrolcüsünün girdi değerleridir. Bu alt başlıkta, yapılan deneysel çalışmalar ile

hibrit depolama sisteminde kullanılacak bulanık mantık kontrolcüsünün girdi değerleri için kısıtlılıklar belirlenmiştir. Tezin bu aşamasında batarya şarj sürecini etkileyen faktörlerin belirlenmesi için yapılan tüm deneysel çalışmalar Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (BİTAM) gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.1. Sıcaklık

Bu alt başlık altında, sıcaklığın batarya üzerindeki etkisi belirlemek ve bu kapsamda bulanık mantık kontrolcüsünün sınırlarını oluşturmak için farklı sıcaklıklarda batarya kapasite testleri yapılmıştır. Deney aşamasında Aspilsan marka 18650 silindirik Li-iyon (NMC) bataryalar kullanılmıştır (Şekil 4.12). Bu bağlamda elde edilen veriler ülkemizde bu marka batarya kullanacak EA üreticilerine önemli katkı sağlayacaktır.

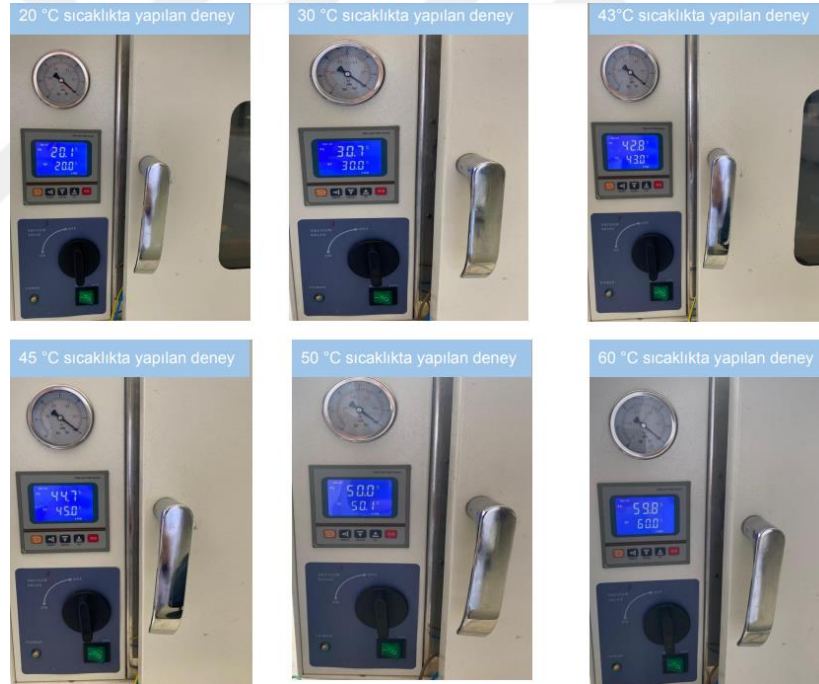


Şekil 4.12. Aspilsan 18650 NMC batarya (Aspilsan, 2024)

Bataryanın farklı sıcaklıklardaki davranışını izlemek için su sirkülasyonlu soğutma banyosu (Şekil 4.13) kullanılarak 10 °C sıcaklık aralığında etüv (Şekil 4.14) kullanılarak 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C ve 60 °C sıcaklıklarda batarya kapasite deneyleri yapılmıştır. 40 °C, 50 °C arasında bir değişim görüldüğü için sonradan bu aralıktaki değişimi daha iyi belirlemek için 43 °C, 45 °C’de de batarya kapasite deneyleri yapılmıştır.

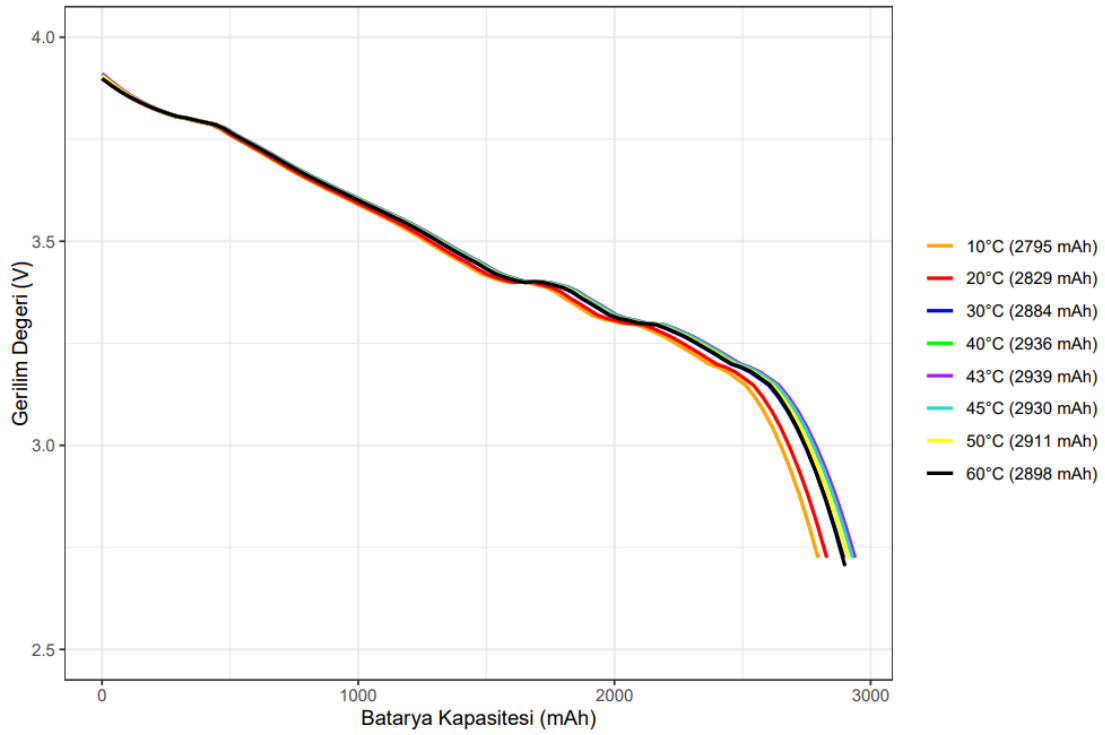


Şekil 4.13. 10 °C'de batarya kapasite deneyi yapılan su sirküasyonlu soğutma banyosu



Şekil 4.14. Etüv ile farklı sıcaklıklarda yapılan batarya kapasite deneyleri

8 farklı sıcaklık değerinde 1C oranında deşarj işlemi DL24P deşarj cihazı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.15'te verilmiştir. Her sıcaklıkta farklı bir batarya kullanılmış ve bataryalar fabrikadan çıktığı hali ile 1C oranında deşarj ve 1C oranında şarj işleminin ardından testlere başlanmıştır.



Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklarda 1C oranında batarya kapasite testi grafiği

Şekil 4.15 incelendiğinde en yüksek kapasite değeri 43 °C’de gözlenmiştir. Bu bağlamda EA’ların kullanımı esnasında batarya ısınma durumunda dikkate alınarak, batarya çalışma sıcaklık değeri 0 °C ile 45 °C olacak şekilde belirlenmiştir. Batarya sıcaklığının bu aralıkta belirlenmesinin sebebi bataryanın ideal çalışma aralığı dışına çıkması durumunda faydalı frenlemeden elde edilecek enerjiden elde edilecek şarj akımı batarya yerine süperkapasitöre yönlendirilecektir. Bataryaları düşük ya da yüksek sıcaklıklarda şarj etme işleminde kullanmak batarya üzerinde kalıcı kapasite kayıplarına neden olmaktadır (Deng, 2015). Bu durum Bölüm 3.3’te daha detaylı bir şekilde ele alınıp açıklanmıştır. Burada deneysel olarak elde edilen sonuçlar dikkate alındığında her ne kadar Aspilsan şirketi bu model bataryanın kullanım kataloğunda 60 °C sıcaklığa kadar çalışabileceğini belirtse de bu tez kapsamında faydalı frenlemenin bataryada oluşturacağı sıcaklık artışını önlemek için sıcaklık 45 °C ile sınırlanmıştır.

### 4.3.2. Batarya şarj akımı

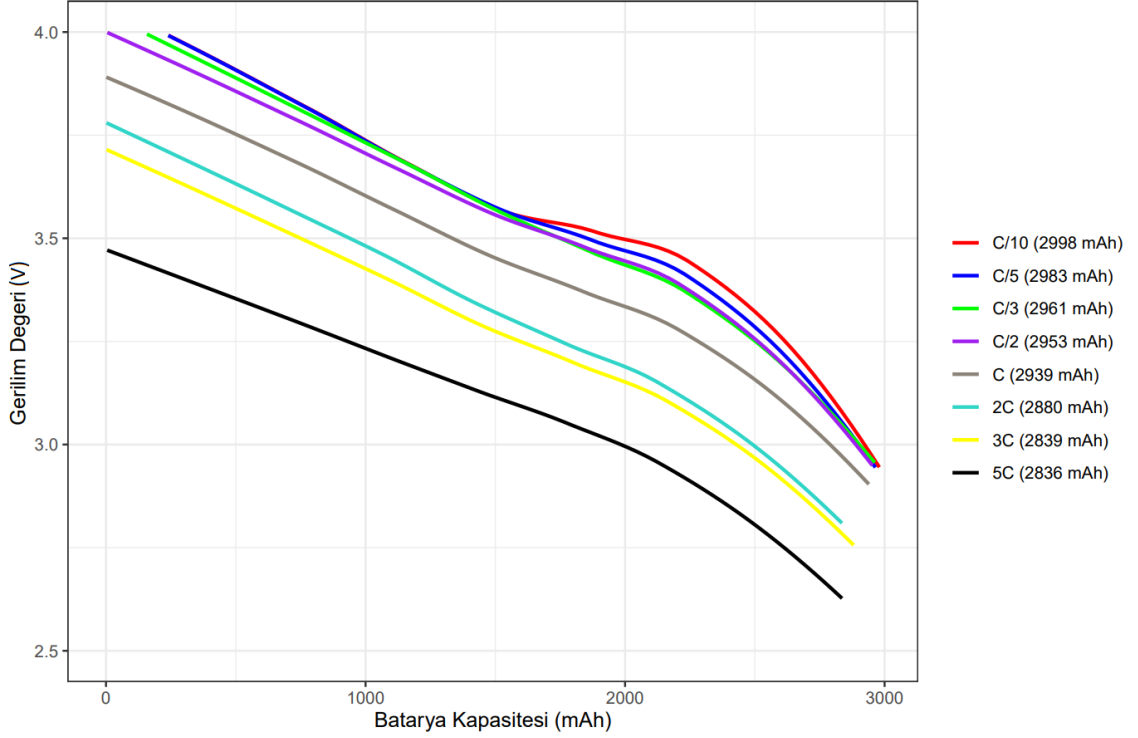
Hem batarya kapasitesi hem de batarya ömrünü etkileyen faktörlerden birisi de batarya şarj akımının hangi değerler arasında olacağını belirlemesidir. Bataryalarda şarj veya deşarj hızı C ile sembolize edilir ve bu oran örneğin; 1Ah'lık bir bataryanın 1A değerindeki akımı 1 saat boyunca sağlamasına olarak tanımlanır. Bu alt başlık altında Li-iyon bataryanın farklı değerlerinde deşarj işlemleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede bulanık mantık kontrolcüsünde kullanılacak deşarj akımının sınırları belirlenmiştir. Deneyde kullanılan bataryalar, fabrika çıkışından %30 doluluk oranında kullanıcıya sunulmaktadır. 4.2V ve 2.5V gerilim değerleri arasında çalışan bu bataryalar önce 1C oranında deşarj ardından 1C oranında şarj edilerek testlere başlanmıştır. Farklı C oranlarında yapılan deşarj işlemleri 43 °C'de, 0.1A ile 30A arasında deşarj işlemi yapabilen DL24P deşarj cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Batarya şarj akımı deneylerinin 43 °C yapılmasının nedeni daha önce de belirtildiği gibi sıcaklık deneylerinde en yüksek kapasitenin bu sıcaklıkta elde edilmiş olmasıdır. Şekil 4.16'da 43 °C'yi ayarlamak için kullanılan etüv ve deşarj cihazı verilmiştir.



Şekil 4.16. Farklı C değerlerinde 43 °C yapılan deşarj test düzeneği

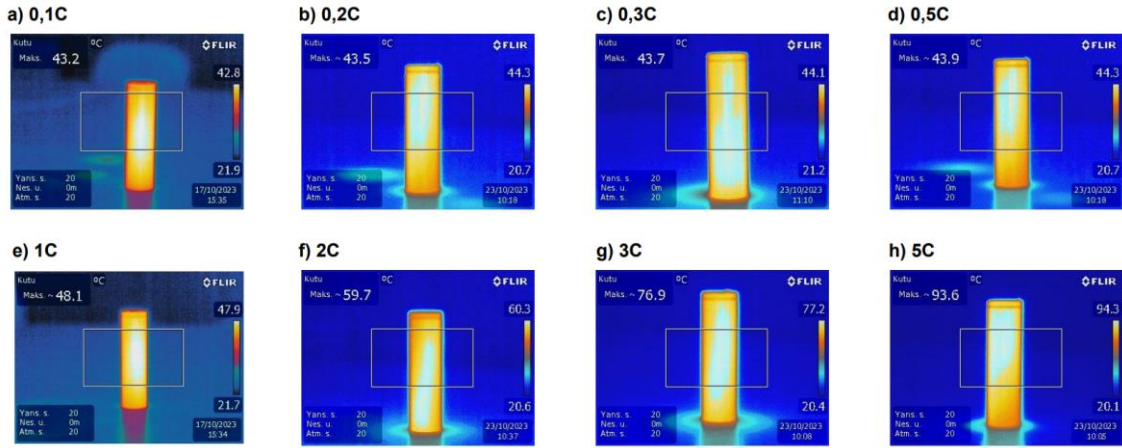
Bu test düzeneği ile C/10, C/5, C/3, C/2, C, 2C, 3C ve 5C oranlarında deşarj işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan Aspilsan 18650 NMC batarya

2900 mAh kapasiteye sahiptir. Bataryanın bu kapasite değeri, 2.9A değerini 1 saat boyunca karşılayabileceğini ifade eder. Düşük C oranlarında şarj ve deşarj işlemlerinin batarya kapasitesine olumlu etkisi olurken, yüksek C oranlarında enerjinin bir kısmı ısıya dönüştürülerek batarya üzerinde kapasite kaybına yol açmaktadır. Bu durum laboratuvarında yapılan deneylerden elde edilen veri sonuçlarıyla belirlenmiştir. Kapasite değişimi Şekil 4.17’de farklı C oranlarında yapılan testler ile ispatlanmıştır.



Şekil 4.17. 25 °C’de farklı C oranlarında yapılan batarya kapasite testi

Bataryalar farklı C oranların farklı kapasite değerlerine sahip olduğu gibi farklı sıcaklık değerlerine ulaşmasına da neden olmaktadır. Yüksek C oranlarında şarj-deşarj işlemi esnasında enerjinin bir kısmı da ısı enerjisine dönüşerek batarya kapasitesi üzerinde azalmalara neden olmaktadır. Bu durumun batarya üzerinde etkisini görsel olarak gözlemlemek için Şekil 4.18’de farklı C oranlarında ve 43 °C’de yapılan deşarj deneyleri sonucunda termal kamera ile ölçülen batarya sıcaklıkları verilmiştir.



Şekil 4.18. 43 °C sıcaklıkta farklı C oranlarında deşarj bataryaların sıcaklıkları

Bulanık mantık kontrolcüsünde kısıtlılıkları belirleyebilmek için bir EA'da kullanılan batarya parametreleri ve önerilecek süperkapasitör parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu tez çalışmasında referans olarak Türkiye'nin ilk yerli ve milli aracı olan TOGG'un kısa mesafe menzilli modelinde kullanıcıya sunulan parametreleri ele alınmıştır. Kısıtlılıkların belirlenmesinde kullanılacak EA batarya ve motor parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. EA'ın batarya ve motor parametre değerleri

Araç parametreleri	Parametre değerleri
Batarya hücre gerilimi	4,2V
Batarya paketi gerilimi	400V
Batarya kapasitesi	52,4 kWh
Batarya hücre sayısı	4560 adet (belirlenen değer)
Batarya ağırlığı	340 kg (belirlenen değer)
Motor gücü	218 HP (160 kW)
Ortalama tüketim	16,9 kWh/100 km

Bu veriler doğrultusunda, EA batarya paketinde 95 seri bağlı batarya hücresi ve 48 paralel bağlı batarya hücresi bulunmaktadır. 160 kW motor gücüne sahip EA'ın batarya hücresinde çekeceği akım maksimum akım değeri 8,7A'dır. Batarya hücresinden çekilecek maksimum akım değeri 3C oranına karşılık gelmektedir. Faydalı frenlemeden kazanılan gücün hibrit depolama sitemine aktarılmasında Formül 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23 hesaplanmıştır. Formül 4.20; atalet momentini, Formül 4.21; aerodinamik sürüklenme

direnci kuvvetini, Formül 4.22; yuvarlanma direnci kuvvetini ve Formül 4.23; hibrit depolama sistemine aktarılan gücü ifade etmektedir.

$$I_{w/t} = m_w r_w^2 + m_t r_t^2 \quad (4.20)$$

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (4.21)$$

$$F_{rr} = [C_{rr,\text{ön}} m_f + C_{rr,\text{arka}} (1 - m_f)] m_v g \cos \alpha \quad (4.22)$$

$$P_{b,giriş} = n_{M/G} V \left[ n_t n_f \left( k f_b \left( F_{aero} + F_{rr} + \left( m_v + 4 \frac{I_{w/t}}{r_r^2} \right) a_x \right) I_{sürüş\ anı} \frac{N_t^2 N_f^2}{r_r^2 a_x} \right) + I_{M/G} \frac{N_t^2 N_f^2}{r_r^2 a_x} \right] \quad (4.23)$$

Formüllerde,

$n_{M/G}$  = motor-generatör verim oranı

$V$  = hız (km/h)

$r_r$  = aktarma oranı

$n_t$  = aktarma verimi

$n_f$  = aks verimi

$a$  = değişken ivme ( $m/s^2$ )

$k$  = faydalı frenleme katsayısı

$f_b$  = frenleme sürtünme katsayısı

$m_v$  = toplam ağırlık (kg)

$r_t$  = lastik yanak kalınlığı (m)

$r_w$  = jant yarıçapı (m)

$m_w$  = jant ağırlığı (kg)

$m_t$  = lastik ağırlığı (kg)

$I_{M/G}$  = motor-generatör atalet momenti ( $kg.m^2$ )

$C_D$  = sürüklenme katsayısı

$A$  = araç ön yüzey alanı ( $m^2$ )

$C_{rr}$  = yuvarlanma katsayısı

$m_f$  = ön aks üzerindeki ağırlık katsayısı

$g$  = yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )

$\rho$  = hava yoğunluğu ( $kg.m^3$ )

$P_{b,giriş}$  = hibrit depolama sistemine aktarılan güç ( $kW$ )

Bu formüller doğrultusunda faydalı frenlemeden elde edilecek enerji hesaplanabilir ancak EA'larda bu enerji yol durumuna bağlı olarak sürekli olarak değişkenlik gösterdiği için öncelikle belirli senaryolar belirlenmelidir.

### 1.senaryo:

Bu çalışmada, 1972 kg boş ağırlığa sahip TOGG EA dikkate alınmıştır (URL-6, 2023). Sürücü ve araç ağırlığı ile birlikte toplam ağırlık 2052 kg'dır. 120 km/h hızla ilerleyen aracın kırmızı ışıkları fark etmesi ile 12 saniye (sn) frenleme yaptığı varsayılmıştır. Bu senaryoda bir eğim söz konusu olmadığı için kinetik enerji hesabı yapılarak EA'nın faydalı frenlemeden elde edeceği enerji hesaplanabilir. Öncelikle aerodinamik sürüklenme direnci kuvveti Formül 4.21 kullanılarak hesaplanmıştır. TOGG için  $C_d$  katsayısı 0,255 değeri ile oldukça iyi bir değerdir. Aracın ön alanı ise 2,65 m<sup>2</sup>'dir.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,225 \times 2,65 \times 120^2 = 5,25 \text{ kWh}$$

aracın sürüklenme direncine karşılık enerji harcanır. Formül 4.22 kullanılarak ise yuvarlanma direnci kuvvetini hesaplanır.

$$F_{rr} = [0,96 \times 0,6 + 0,96(1 - 0,6)] 2052 \times 9,81 \cos 38 = 15,22 \text{ kWh}$$

yuvarlanma direncine karşılık enerji harcanır. Bu değer normal yol şartlarında geçerlidir. Islak ve nemli yol koşullarında bu direnç değeri değişiklik gösterir. Aracın kinetik enerjisi ise;

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times 2052 \times 33,3^2 = 1137721 \text{ J} = 0,316 \text{ kWh}$$

Bu kinetik enerjisine ek olarak tekerlek dönme kinetik enerjiside eklenmelidir. TOGG'un lastik ölçüleri 235/50/19'dur ve lastik toplam ağırlığı 30 kg'dır. Bu veriler doğrultusunda tekerlek başına dönme kinetik enerjisi;

$$I = mr^2 = 30kg \times 0,385m = 4,45$$

$$E_d = \frac{1}{2} \times I \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times 4,45 \times 318_{rpm}^2 = 0,0625 kWh'dir. Aracın dört lastiği için$$

toplamda tekerlek dönme kinetik enerjisi 0,25 kWh'dir. Böylece toplam faydalı frenleme enerjisi 0,566 kWh olarak gerçekleşecektir. EA'larda %80 aktarma organı verimliliği ile 0,452 kWh faydalı frenlemede enerji kazanılacaktır (Martellucci ve Giannini, 2021). 1627,2 kJ enerji aracın 12 saniye olan toplam frenleme süresi içerisinde depolanacaktır. Bu durumda 108,480 kW peak güç oluşacaktır. Araçtaki %80 aktarma organı verimliliği ile peak güç değeri 86,784 kW olacaktır. Bu güç önce toplam batarya gerilim 400V daha sonra ise 48 adet paralel bağlı batarya hücrelerine bölünürse hücre başına 4,52A şarj akımı değeri bulunacaktır. Bu değer 2900 mAh kapasiteli batarya için 1,558 C (4,52/2,9=1,558) değerine karşılık gelmektedir.

### 2.senaryo;

Bu senaryoda 50 km/h hızla ilerleyen aracın şehir içi sürüş yaptığı varsayılmıştır. Bu sürüşte aracın tam durması esnasında 0,0756 kWh enerji depolanacak ve %80 aktarma organı verimliliği ile 0,065 kWh enerji faydalı frenlemeden geri kazanılacaktır. Bu tam durma işleminde 5 sn frenleme yapılacaktır. 100 km'lik şehir içi sürüşünde 100 kez tekrarlanan bu işlemde toplamda 6,5 kWh enerji depolanacaktır. 100 km'de 16,7 kWh enerji tüketimi olan TOGG için bu enerji 38,9 km'lik kazanç sağlayacaktır. Bu senaryoda 197,9 kJ enerji batarya hücresi başına 2,061A değerinde şarj akımı oluşturacaktır. Bu değer 2900 mAh kapasiteli batarya için 0,710 C değerine karşılık gelmektedir.

### 3.senaryo;

Bu senaryoda aracın deniz seviyesinden 650 m yüksekten, deniz seviyesine inmesinde oluşacak faydalı frenleme enerjisi hesaplanmıştır. Toplam yol uzunluğu 15 km olduğu dikkate alınırsa yol eğimi %4,33 olacaktır. Aracın 80 km/h hızla bu eğimli yoldan indiği varsayılırsa 0,26 kWh enerji kazanılacaktır. Bu işlem yol boyu 5 kez tekrarlanırsa

toplamda 1,3 kWh enerji faydalı frenlemeden geri kazanılacaktır. Bu senaryoda batarya hücresi başına 2,27A değerinde şarj akımı oluşturacaktır. Bu değer 2900 mAh kapasiteli batarya için 1,277 C değerine karşılık gelmektedir. Bu senaryoların tamamında araç ağırlığı ve sürücü olarak hesaplama yapılmıştır. Aracın ağırlığının değişmesi faydalı frenleme enerjisinin de değişmesine sebep olur. Bu durumda farklı yüklerde kazanılan enerjinin batarya hücresine olan şarj akım değeri Tablo 4.2’de verilmiştir. Hesaplamalarda bir yolcu ağırlığı 80 kg olarak varsayılmıştır.

**Tablo 4.2.** Farklı yüklerde faydalı frenlemeden kazanılan enerji

Senaryolar	Sürücü	Sürücü ve 1 yolcu	Sürücü ve 2 yolcu	Tam yükte
1.Senaryo	1,558 C	1,618 C	1,678 C	2,275 C
2.Senaryo	0,710 C	0,738 C	0,765 C	1,037 C
3.Senaryo	1,277 C	1,326 C	1,376 C	1,866 C

Geliştirilen 3 senaryodan farklı yol şartları ve farklı yüklerde yapılan hesaplamalarda, faydalı frenlemenin EA batarya hücresine kazandırmış olduğu şarj akımı 2,275 C değeri ile yüksek bir şarj akımı değerine ulaşmaktadır. Batarya şarj işlemi düşük C oranları batarya kapasitesi ve batarya ömrünü artırmaktadır. Bu bağlamda faydalı frenlemeden gelen enerji depolamasında öncelikli olarak süperkapasitör tercih edilecektir. Anlık ortalama tüketim değeri olan 16,9 kWh’in üzerine çıktığı anda süperkapasitör elektrik motorunu besleyerek üzerindeki yükü boşaltacaktır. Böylece süperkapasitörün sürekli olarak boş kalması sağlanacaktır. Süperkapasitörün dolu olduğu durumda, batarya için sıcaklık ve SoC değerleri uygunsa şarj akım değerini batarya için 0,5 C oranında sınırlayarak şarj etmek batarya ömrünü iyileştirecektir. Süperkapasitörün dolu olduğu ve bataryasında enerji depolama için uygun olmadığı kriterlerde ise mekanik frenleme ile güvenli yavaşlama veya durma gerçekleştirilecektir. Batarya ömrünü korumak için gerçekleştirilen mevcut uygulamalarda, hibrit bir depolama sistemi olmadığından dolayı depolanmak istenen enerjinin verimi bu tez çalışmasındaki yöntem göre daha düşüktür.

Tüm bu senaryolar dikkate alındığında faydalı frenlemeden kazanılan enerjinin en uygun şekilde depolanabilmesi için süperkapasitör kapasitesi hesaplanmıştır. Maxwell marka BCAP0350 model 350F’lık bir süperkapasitörün kapasitesi;

$$W = \frac{1}{2} \times C \times V^2 = \frac{1}{2} \times 350 \times 2,7^2 = 1275,75 J = 0,354 Wh \text{ 'dir.}$$

Süperkapasitör paket gerilimi, batarya paket gerilimine eşdeğer olacak şekilde 400V, 150 adet seri bağlantıdan oluşmaktadır. Faydalı frenlemeden gelen enerjinin depolanabilmesi ve frenleme esnasındaki peak akım değerinin süperkapasitöre yönlendirilmesi için 3 adet paralel bağlantı uygun görülmüştür. Bu durumda 450 adet süperkapasitörün toplam kapasitesi;

$$W_{toplam} = 0,354 \times 450 = 159,3 Wh \text{ olacaktır.}$$

2 adet paralel bağlantı yapılarak oluşturulan bir süperkapasitör paketi kullanılması durumunda 106,2 Wh'lik bir kapasite elde edilecektir. Bu kapasite değeri 1.senaryonun araçta yalnızca sürücünün olduğu yükte yapacağı frenlemenin %23,49'luk bir kısmını süperkapasitöre depolayabilir. Bu durum frenlemenin başlangıç esnasındaki yüksek akım değerlerini yeterince süperkapasitöre aktarmadan yeniden bataryaya yüksek akım değerleri ile şarj etmemize neden olabilir. Bu sebepten dolayı süperkapasitör 450 adet olarak belirlenmiştir. Böylece maksimum faydalı frenlemede enerjinin %35,24'luk kısmı süperkapasitöre aktarılarak yüksek akım değerlerinin bataryaya zarar vermesi engellenecektir. Maxwell marka BCAP0350 model 350F'lık, süperkapasitörün parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Maxwell marka BCAP0350 model süperkapasitörün parametre değerleri

Süperkapasitör parametreleri	Parametre değerleri
Hücre gerilimi	2,7V
Paket gerilimi	400V
Hücre sürekli akımı	40A (40 °C'de)
Hücre maksimum akımı	170A
Toplam ağırlığı	27 kg
İç direnci	0,0032 ohm
Toplam kapasitesi	159,3 Wh
Toplam maliyeti	93.000 ₺

Tablo 4.3 incelendiğinde süperkapasitörün maksimum akım değerinin 170A olduğu görülmektedir. Hesaplanan tüm senaryolar içerisinde 150 adet seri, 3 adet paralel bağlı süperkapasitör hücresine 92,38A maksimum şarj akımı elde edilecektir. Bu durumda süperkapasitörlerin maksimum akım değeri aşılmadan güvenli bir şekilde depolama sağlanacaktır.

### 4.3.3. Batarya doluluk oranı

Bataryaların sağlıklı bir şekilde şarj-deşarj olabilmesi için belirli bir SoC aralığında çalıştırılması gerekir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Li-iyon bataryaların en verimli çalışma SoC aralığı %20-%90 olduğu görülmektedir (URL-5, 2023). Bu bağlamda düşük ve yüksek SoC değerlerinde şarj-deşarj işlemleri batarya üzerindeki stresi artırmaktadır (Warner, 2019). Bölüm 3'te Şekil 3.12'de Li-iyon bataryaların ideal çalışma aralığı verilmiştir.

### 4.3.4. Süperkapasitör doluluk oranı

Süperkapasitörler çok hızlı bir şekilde şarj vedeşarj olabilirler (Ehsani ve ark., 2004). Ayrıca süperkapasitörler yüksek güç yoğunlukları sayesinde EA'larda ani hızlanma ihtiyaçlarına destek olabilirler. Bunun yanı sıra süperkapasitörlerin çevrim ömürleri 1 milyondan fazladır (Xie ve ark., 2021). Çevrim ömürlerinin oldukça yüksek olmasından dolayı bataryalara göre daha geniş SoC aralığında çalıştırılabilirler. Benzer şekilde çalışma sıcaklıkları da Li-iyon bataryalara göre daha geniş aralıktadır. Bu sayede faydalı frenleme gibi sürekli şarj-deşarj gerektiren uygulamalarda tercih sebebidir. Süperkapasitörler %5-%95 SoC aralığında çalıştırılarak enerji yoğunluklarından yüksek verim elde edilebilir (Libich ve ark., 2018; Li ve ark., 2020; Ayob ve ark., 2022).

## 4.4. Bulanık Mantık Sisteminin Tasarlanması

### 4.4.1. Verilerin hazırlanması

Bulanık mantık kontrol sisteminin; sıcaklık, şarj akımı, batarya SoC ve süperkapasitör SoC olmak üzere dört adet girdisi ve batarya aktarım oranı ile süperkapasitör aktarım oranı olmak üzere iki adet çıktısı bulunmaktadır. Bu girdilerin

sınır aralıkları Bölüm 4.3'te yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenerek 1000 adetlik veri seti oluşturulmuştur. Tablo 4.4'te “*Matlab® Fuzzy Logic*” sistemine girilen veriler gösterilmektedir. Temel amaç yüksek sıcaklık, yüksek şarj akımı ve yüksek batarya SoC durumlarında faydalı frenlemeden gelen enerjinin süperkapasitöre yönlendirilmesi ile batarya sağlığını koruyarak batarya ömrünü uzatmaktır.

**Tablo 4.4.** Bulanık mantık veri seti

No	Bulanık mantık girdi parametreleri				Bulanık mantık çıktı parametreleri	
	Sıcaklık (°C)	Hücre şarj akımı (C oranı)	Batarya SoC (%)	Süperkapasitör SoC (%)	Batarya oranı (%)	Süperkapasitör oranı (%)
1	34	0.395	13	93	62.5	37.5
2	-16	1.594	47	17	0	100
3	-7	0.439	12	28	37.5	62.5
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
999	47	0.458	15	100	100	0
1000	-5	0.544	6	86	75	25

Tablo 4.4'te veri setinin girdi değerleri Matlab programında bir EA'nın benzetilmesinden elde edilmiştir.

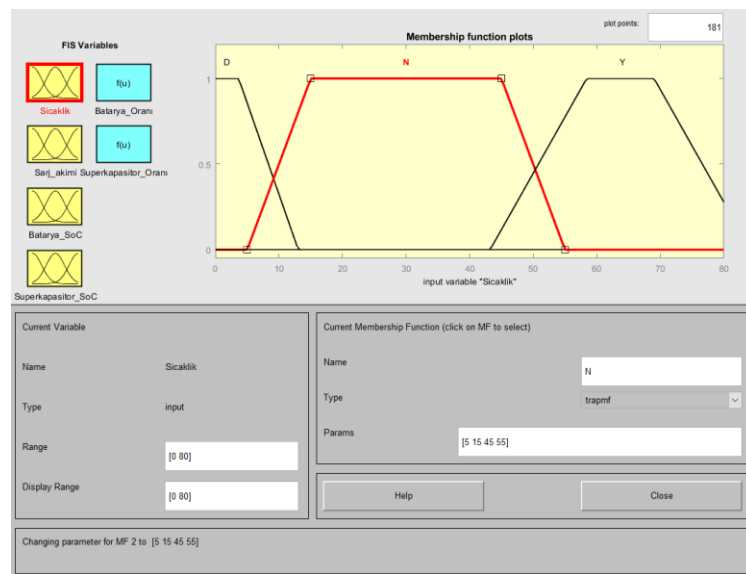
#### 4.4.2. Modelin oluşturulması

Bulanık mantık kontrol sistemine tanımlanan girdiler için üyelik fonksiyonları “trapmf” olarak yamuk şeklinde tanımlanmıştır. Batarya ve süperkapasitör aktarım oranlarının daha net tanımlanabilmesi için Sugeno tipi modelleme yöntemi seçilmiştir. Tablo 4.5'te üyelik fonksiyonlarının sınır noktaları verilmiştir. Bu tabloda girdi seviyeleri düşük (D), nominal (N) ve yüksek (Y) olarak ifade edilmiştir.

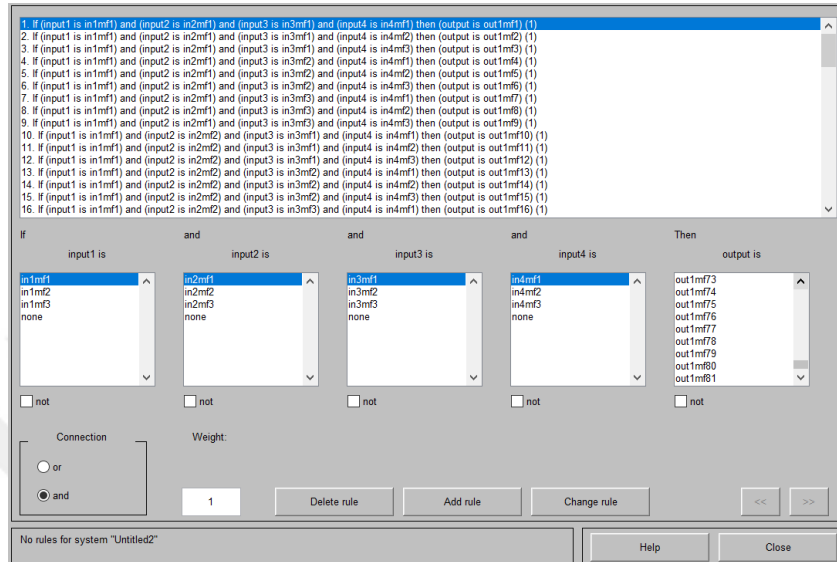
**Tablo 4.5.** Bulanık mantık kontrol sistemi üyelik fonksiyonu değerleri

Girdi ve seviyeleri		Sınır noktaları			
		A	B	C	D
Sıcaklık	D	-30	-15	5	15
	N	5	15	45	55
	Y	43	70	90	110
Şarj akımı (C oranı)	D	-	-	0,08	0,15
	N	0,1	0,2	0,5	0,65
	Y	0,45	0,75	1,5	2
Batarya SoC	D	-	-	0	25
	N	10	20	80	90
	Y	75	90	100	-
Süperkapasitör SoC	D	-	-	0	10
	N	5	15	85	95
	Y	80	95	100	-

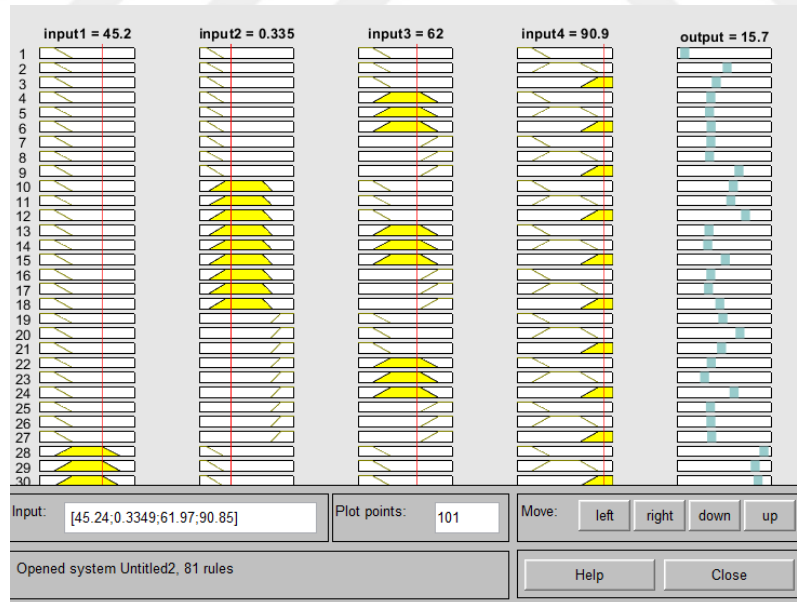
Tablo 4.5'te verilen sınır noktaları Bölüm 4.3'te yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonlarının bu sınır noktaları için Matlab programında gösterimi Şekil 4.19'da verilmiştir.

**Şekil 4.19.** Batarya sıcaklığı ile ilgili üyelik fonksiyonları

Tüm girdi değerleri için üyelik fonksiyonları belirlenen sınır değerlere göre oluşturulduktan sonra ANFIS ortamında eğitim aşaması için 800 adet veri girilmiştir. Bu veriler doğrultusunda ANFIS, 81 tane kural oluşturmuştur. Bu kurallar Şekil 4.20’de ve bu kurallara bağlı aralıklı değişkenler Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. ANFIS kural tablosu

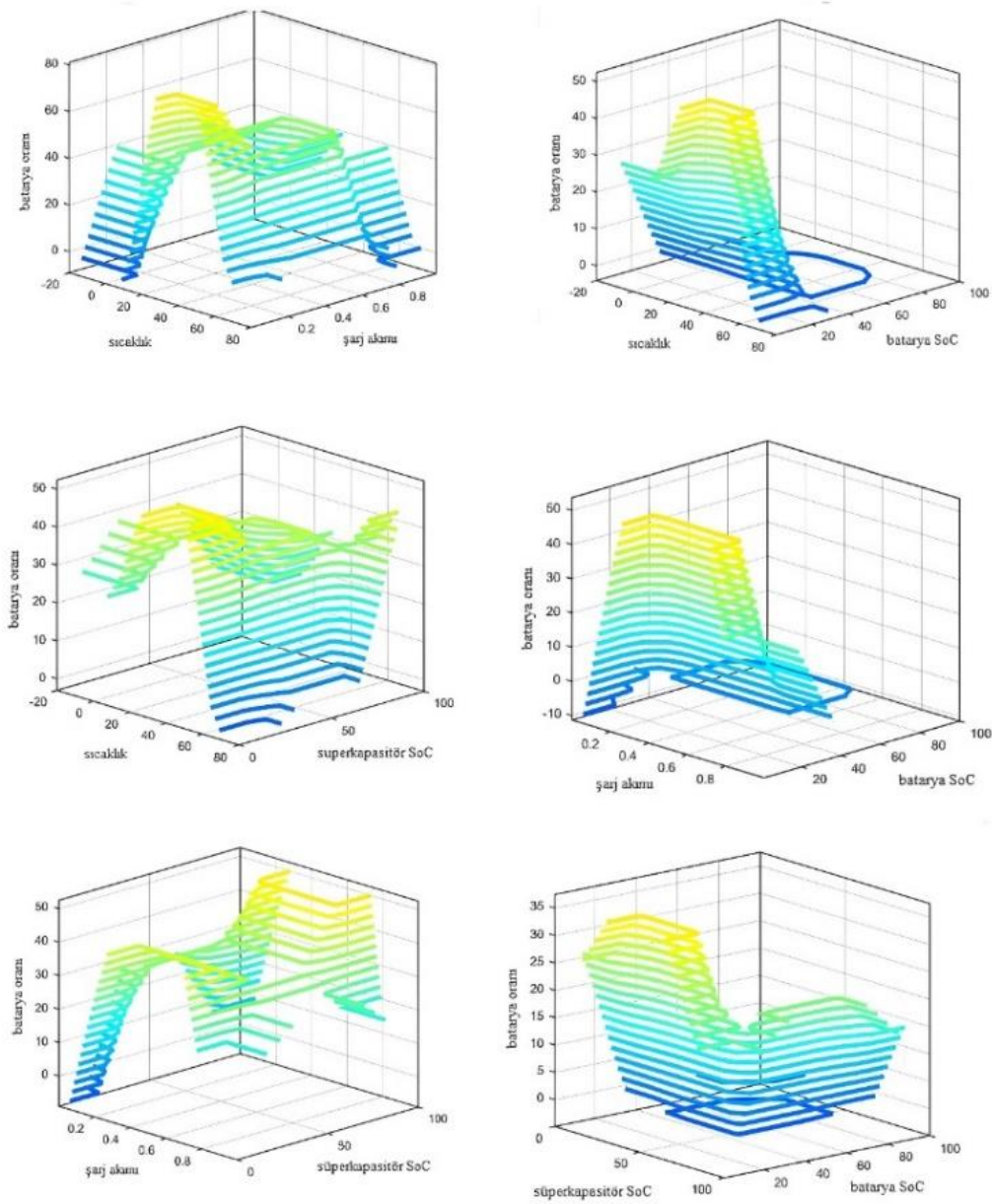


Şekil 4.21. ANFIS kural çıktı değerleri

800 adet verinin eğitim aşamasında kullanılması ile geriye kalan 100 adet veri test aşamasında 100 adet veri ise doğrulama aşamasında kullanılmıştır.

### 4.4.3. Çıktı ve sonuçlar

ANFIS yöntemi ile elde edilen sonuçlarda model oldukça başarılı bir öğrenme elde etmiş ve yüksek doğruluk oranları ile karar verebilmiştir. Oluşturulan modelin test verileri ile performansı Tablo 4.6'da verilmiştir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması ve MSE ile RMSE değerlerinin 0'a yakın olması modelin başarısını göstermektedir. Oluşturulan modelin girdi değişkenleri arasında bağlantı Şekil 4.22'de üç boyutlu olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Modelde girdi değişkenleri arasındaki üç boyutlu ilişki

**Tablo 4.6.** Modelin performans değerlendirmesi

Performans ölçütü	Performans değeri
R <sup>2</sup>	0,927
MSE	0.15
RMSE	0,39

Modelin bir diğer önemli noktası batarya ve süperkapasitör arasındaki anahtarlama değildir. Çıktı sonuçları yalnızca batarya, yalnızca süperkapasitör veya farklı oranlarda hibrit depolama olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda yalnızca batarya veya yalnızca süperkapasitör durumlarında anahtarlama ile yönlendirme sağlanmalıdır. Benzer şekilde, hibrit depolama olması durumunda 3. anahtar kullanılmalı ve batarya ile süperkapasitör arasındaki bağlantı kesilmelidir. Bunun sebebi süperkapasitörün iç direnci, Li-iyon bataryanın iç direncinden çok daha küçük olmasıdır. Bundan dolayı süperkapasitör SoC oranı, batarya SoC oranından daha düşük olması halinde, süperkapasitör batarya üzerindeki yükü kendi üzerine çekebilir. Bu durumun önlenmesi için 3. anahtara ihtiyaç vardır. Ayrıca hibrit depolamada farklı oranlarda enerji depolamasını sağlamak için tristör kullanılmalıdır. Değişken oranlardaki bu depolama için tristörün tetikleme açısı değiştirilerek depolama sağlanabilir. Bu bölümde geliştirilen bulanık mantık kontrol sistemi Bölüm 5'te simülasyon programı içerisine entegre edilerek EA'ın sürüş testleri yapılacaktır.

## 5. ELEKTRİKLİ ARACIN BENZETİM ÇALIŞMALARI

Tez çalışmasının bu bölümünde Matlab Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) ve Siemens Simcenter Flomaster programları ile EA modellenmiş ve bu modeller karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Matlab programında gerçekleştirilen bulanık mantık kontrolcüsünün hem ADVISOR hem de Siemens Simcenter Flomaster programları ile entegrasyonu yapılabilmektedir. Bu programlar, bataryanın gerçek ortam testleri yapılmadan önce maliyet ve güvenlik açısından katkı sağlayarak bu tür sistemlerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır.

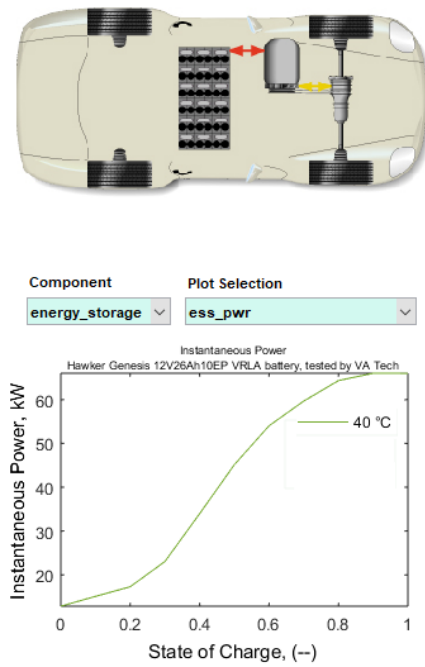
### 5.1. ADVISOR Simülasyon Ortamı

ADVISOR programı 1990'lı yıllarında sonuna doğru Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilmiştir (Turkmen ve ark., 2017). ADVISOR programı konvansiyonel, hibrit ve EA'ların analizlerinde kullanılmaktadır. Açık kaynaklı bir yazılım olması sebebi ile birçok araştırmacı tarafından programın kütüphanesine katkıda bulunulmuştur. Ayrıca Matlab Simulink modülü olarak çalışmasından dolayı kontrol stratejisi oluşturma esnekliği sunmaktadır. ADVISOR, ticari otomobil üreticileri ve üniversiteler ile anlaşmalar yaparak algoritmaların minimum belirsizliğe ulaşmasını sağlamaktadır. Program içerisinde 59 farklı sürüş konfigürasyonu bulunmaktadır. Her bir konfigürasyon gerçek hayatla paralellik göstermekte ve uluslararası kurumlar tarafından kabul görmektedir (Zulkifli ve Dali, 2017; Mitra ve ark., 2024).

#### 5.1.1. Elektrikli araç konfigürasyonu

Bu tez çalışmasında önerilen batarya ve süperkapasitör hibrit depolama sistemi ile klasik batarya depolama sistemi ADVISOR programında tasarlanmıştır. Tasarlanan bulanık mantık kontrolcüsü hibrit depolama sistemine entegre edilerek analizleri yapılmıştır. Blok diyagramı oluşturulmadan önce ADVISOR programında ilk olarak araç verilerinin giriş ekranı araştırmacıyı karşılar. Tablo 4.1 ve Tablo 4.3'de verilen değerler doğrultusunda EA blok diyagramı oluşturulmuştur. Bu ekran üzerinde araştırmacı ilgili verileri girerek bir sonraki aşama olan blok diyagramı tasarımına aktarılır. Şekil 5.1'de ADVISOR programının araç veri giriş ekranı gösterilmektedir.

## Vehicle Input



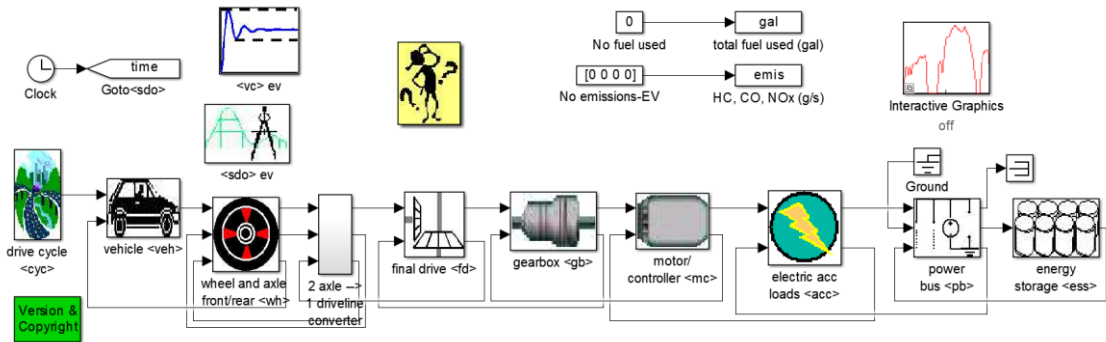
The figure shows the ADVISOR program vehicle input screen. It includes a "Load File" dropdown set to "EV\_defaults\_in", a "Drivetrain Config" dropdown set to "ev", and an "Auto-Size" section with "Scale Components" (max pwr, peak eff, mass) and "V nom" (25, 308, 275). A table lists components with their version, type, and parameters:

Component	version	type	max pwr	peak eff	mass (kg)
Vehicle	?	VEH_SMCAR			592
Fuel Converter	?	fc options			
Exhaust Aftertreat	?	EX_CI			
Energy Storage	rint	pb	25	308	275
Energy Storage 2	?	ess 2 options			
Motor	?	MC_AC75	75	0.92	91
Motor 2	?	motor 2 options			
Starter	?	starter options			
Generator	?	gc options			
Transmission	man	man			1
Transmission 2	?	trans 2 options			
Clutch/Torq. Conv.	?	clutch/torque converte...			
Torque Coupling	?	TC_DUMMY			
Wheel/Axle	Crr	Crr			0
Accessory	Co...	Const			
Acc Electrical	?	acc elec options			
Powertrain Control	ev	man			

Below the table, there are radio buttons for "front wheel drive", "rear wheel drive", and "four wheel drive". A "View Block Diagram" button is labeled "BD\_EV". A "Variable List" section shows "motor\_controller" and "mc\_area\_scale" with a value of 1. A "Save" button is present.

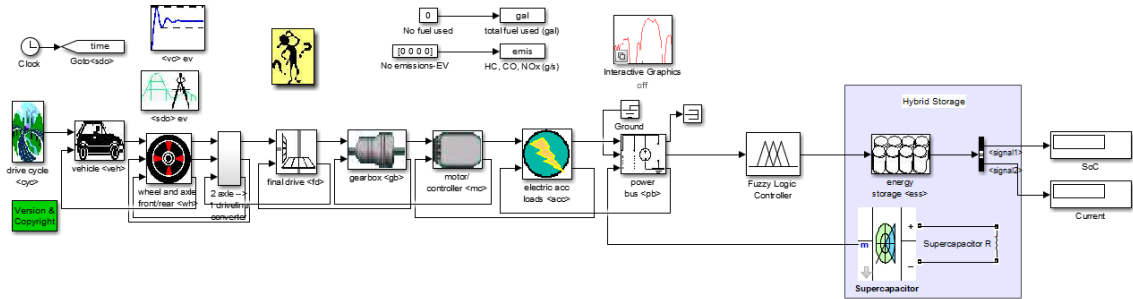
Şekil 5.1. ADVISOR programı araç veri giriş ekranı

Araç veri giriş ekranında girilen veriler doğrultusunda EA için blok diyagram otomatik olarak oluşturulurken hibrit depolama sistemi için yeni blok diyagram oluşturulmuştur. Otomatik oluşturulan diyagramda EA'ın fren, tekerlek, motor ve batarya gibi tüm önemli birimlerden veri alınabilmektedir. Şekil 5.2'de EA'ın blok diyagramları gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Elektrikli aracın blok diyagramı

Hibrit depolama sisteminde batarya ve süperkapasitör paralel olarak bağlanmış ve kontrol sistemi olarak öncesine bulanık mantık denetleyicisi eklenmiştir. Şekil 5.3'te hibrit depolamalı EA'nın blok diyagramları gösterilmektedir.

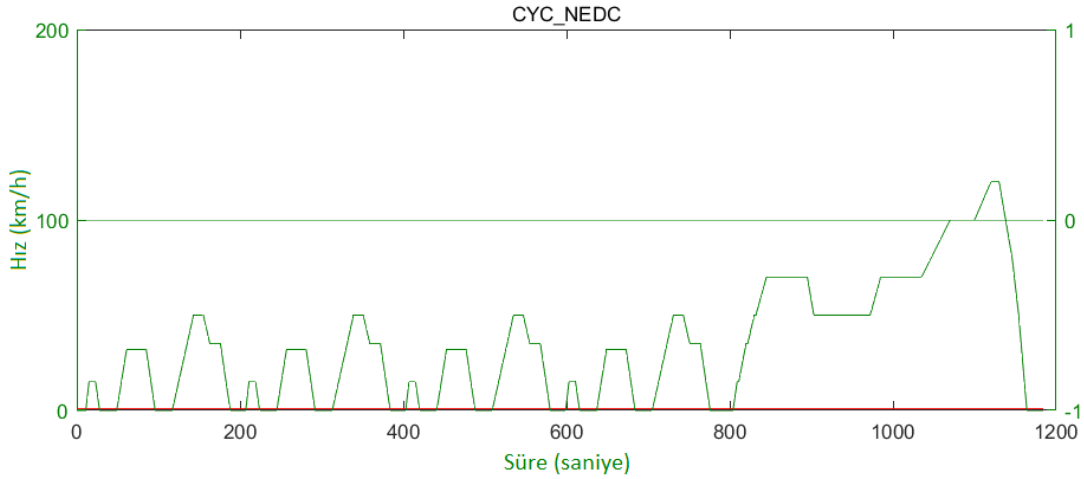


Şekil 5.3. Hibrit depolamalı elektrikli aracın blok diyagramı

Çalışma sırasında izlenen sistematik yöntemlerden, araç verilerinin belirlenmesi ve blok diyagramının oluşturulması bu alt başlık altında tamamlanmıştır. Simülasyonda kullanılacak yol koşullarının seçimi ve analizleri bir sonraki alt başlık altında incelenecektir.

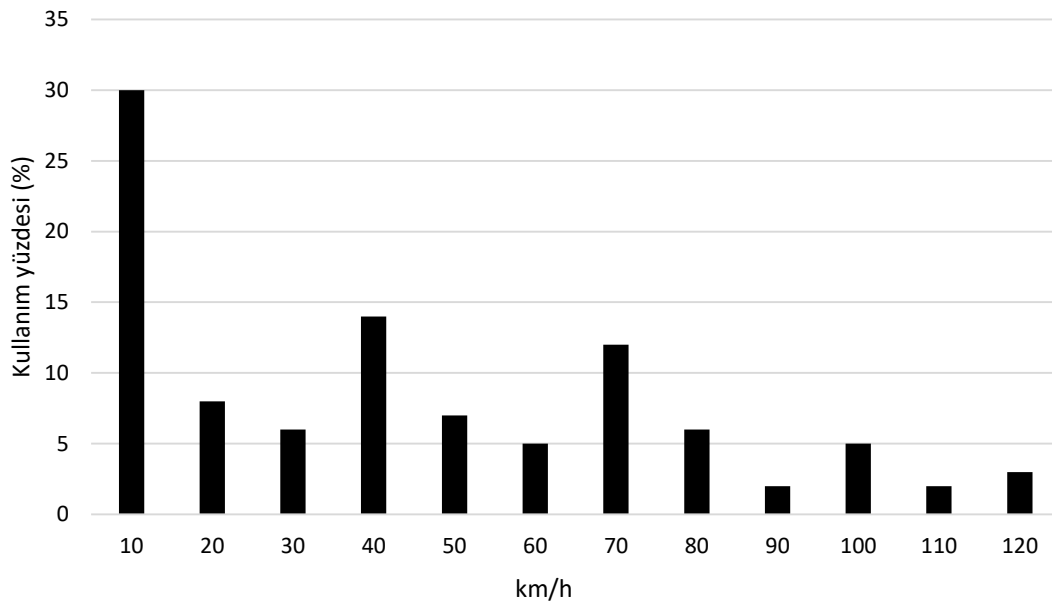
### 5.1.2. Simülasyon ortamında yapılan testler

ADVISOR programı içerisinde bulunan sürüş çevrimleri içerisinde otomobil üreticilerinin en sık kullandığı iki çevrim New European Driving Cycle (NEDC) ve Worldwide Harmonised Light Vehicle (WLTC) sürüşleridir (Kartal ve ark., 2016). NEDC çevrimi 2019 yılına kadar tercih edilmiş ancak konvansiyonel araçlarda yakıt tüketiminin bu çevrimde gerçek hayata göre daha düşük çıkmasından dolayı WLTC çevrim sürüşüne geçilmiştir (Golebiewski ve Lisowski, 2018). Bugün ise EA'larda tam tersi bir durum bulunmakta ve WLTC çevrim sürüşü gerçek hayattaki sürüş verilerden uzak bir noktada daha düşük bir tüketim vermektedir (Şen ve ark., 2024). Bundan dolayı bu tez çalışması kapsamında EA'lar için gerçek kullanıma en yakın tüketim verisi alınabilen NEDC sürüş çevrimi kullanılmıştır. NEDC sürüş çevrimi hem şehir içi hem de şehir dışı verilerini içermektedir. Şekil 5.4'te NEDC çevrimine ait hız-zaman grafiği verilmiştir.



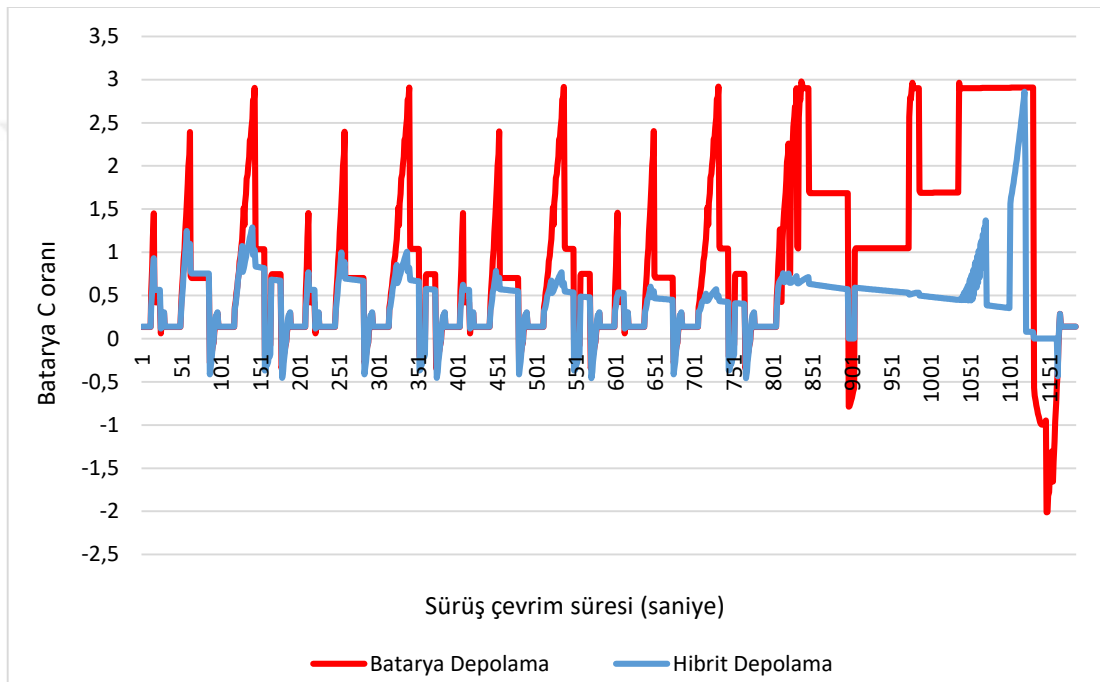
Şekil 5.4. NEDC sürüş çevrimi

NEDC sürüş çevrimi 20 °C ile 30 °C derece arasında değişen dış ortam sıcaklığında ve sürüş çevrim mesafesi 10.93 km olacak şekilde gerçekleştirilir. Çevrim süresince ulaşılabilecek maksimum hız 120 km/h ve ortalama hız 33.21 km/h'dir. Ayrıca bu sürüşün toplam süresi 1184 saniye ve maksimum ivmelenme değeri de 1.06 m/s<sup>2</sup>'dir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere sürüşün çoğunluğu şehir içinde gerçekleşmektedir. Bu sürüş çevrimi hem şehir içi hemde şehir dışı araç kullanımını içermesi sebebiyle uygulama açısından EA için uygun bir sürüş tekniği olmaktadır. Şekil 5.5'te sürüş çevriminin yüzdelik olarak hız oranları verilmiştir.



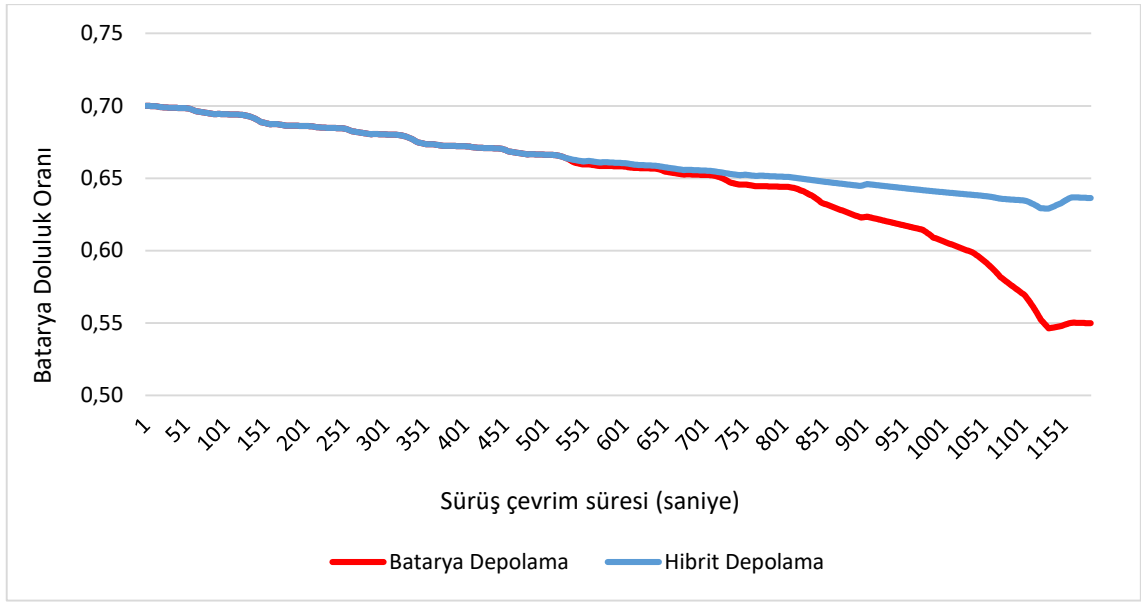
Şekil 5.5. NEDC sürüş çevriminde kullanılan aracın hız yüzdelikleri

Simülasyon ortamında aracın Avrupa'daki yol koşullarının (NEDC sürüş çevrimi) benzetimi yapılmış ardından batarya ve hibrit depolama sisteminden çekilen akım değerleri incelenmiştir. Çıktı olarak alınan akım değerleri batarya başına C değeri olarak hesaplanarak Şekil 5.6'da verilmiştir. Bataryadan çekilen akım değerleri ve faydalı frenlemeden gelen akım değerleri incelendiğinde hibrit depolamalı sistemdeki bataryanın, batarya depolamalı sisteme göre %29,1 oranında daha düşük akım değerlerine maruz kaldığı görülmektedir. Bu durum batarya sağlığına katkı sağlayarak bataryanın daha uzun kullanılmasına yardımcı olacaktır.



Şekil 5.6. ADVISOR programında NEDC sürüş çevriminde oluşan akım değerleri

ADVISOR programı süperkapasitör depolama sistemini desteklememektedir. Ancak blok diyagramında değişiklik yaparak süperkapasitör katalog verilerinin batarya gibi tanımlayarak test yapılabilir. NEDC sürüş çevriminde %70 SoC ve %70 süperkapasitör SoC değerinde teste başlanır. Hibrit depolamalı sistem sürüş çevrimini %7,28 batarya kaybı ile tamamlarken batarya depolamalı sistem %15,64 batarya kaybı ile tamamlamıştır. Test sonuçları incelendiğinde, bulanık mantık kontrolcüsünün, süperkapasitör kullanımıyla ortalama enerji tüketimine olumlu bir katkı sağladığı görülmektedir. Şekil 5.7'de sistemlerin çevrim sürüşü süresince SoC değişimini göstermektedir.



Şekil 5.7. NEDC sürüş çevriminde batarya SoC değişimi

ADVISOR programında yapılan simülasyon testlerinde dış ortam sıcaklığının değiştirilmesi mümkün değildir. Bunun yanı sıra batarya iç dirençlerinin belirlenmesi ve teste başlangıç batarya SoC değerinin değiştirilmesi program izin vermemektedir. Programın bu kısıtlılıkları nedeni ile daha gelişmiş özellikleri bulunan Siemens Simcenter Flomaster programı ile de simülasyonların gerçekleştirilmesi ve karşılaştırılması planlanmıştır. Farklı programlar kullanılarak elde edilen değerler gerçek ortam testlerine yakın verilerin elde edilmesini sağlayacaktır.

## 5.2. Siemens Simcenter Flomaster Simülasyon Ortamı

Simcenter Flomaster programı Siemens firması tarafından geliştirilen mühendislik simülasyon aracıdır. Program EA'ların tasarlanması ve simüle edilmesinde çeşitli sürüş konfigürasyonlar sunmaktadır. Ayrıca PLM, CAD ve Matlab gibi programlar ile entegre olarak çalışabilir. Bu sayede yapılan simülasyonlar daha detaylı olarak analizler yapılabilir. Simcenter Flomaster programının ADVISOR programına göre avantajı, sürüş çevrimlerinde EA'ya ait tüm teknik parametrelerin değiştirilmesine izin vermesidir. Böylece her bir sürüş çevrimi gerçek hayatla birebir benzerlik göstermekte ve ADVISOR programına göre analizler daha kapsamlı olarak gerçekleştirilebilmektedir.

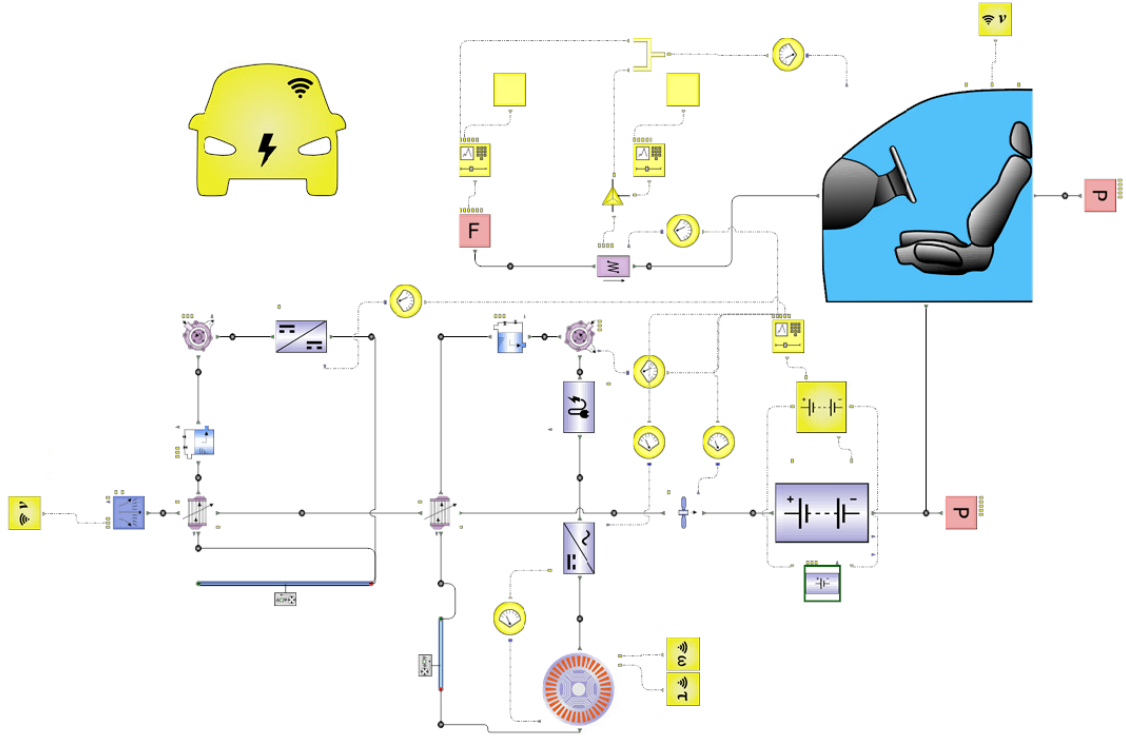
### 5.2.1. Elektrikli araç konfigürasyonu

ADVISOR programında tasarlanan batarya ve süperkapasitör hibrit depolama sisteminin analizleri daha detaylı olarak Simcenter Flomaster programında gerçekleştirilmiştir. Bu program motor, batarya ve dış ortam parametrelerinin değiştirilmesinde ADVISOR programına göre daha fazla imkan tanır. Ayrıca Matlab programı ile entegrasyon sağlanabilmektedir. Bu sayede bulanık mantık kontrolcüsü sisteme entegre edilerek sürüş çevrimleri gerçekleştirilmiştir. EA modellemesi gerçekleştirilirken Tablo 4.1 ve Tablo 4.3’de verilen değerler doğrultusunda veriler programa girilmiştir. Modellemede kullanılan 40 farklı bileşen ve bu bileşenlerin özellikleri için değerler tanımlanmıştır. Şekil 5.8’de programda batarya bileşeni için tanımlanan değerler bir kısmı gösterilmektedir.

Property	Value	
Identification	Sub Form...	<input type="checkbox"/>
Hydraulic Diameter	0.0508 m	<input type="checkbox"/>
Loss Coefficient	0.1	<input type="checkbox"/>
Number of Cells in Series	95	<input type="checkbox"/>
Number of Cells in Parallel	48	<input type="checkbox"/>
Initial State of Charge	70 %	<input type="checkbox"/>
Initial Inside Temperature	[Ambient Temperature]	<input type="checkbox"/>
Thermal Data	Sub Form...	<input type="checkbox"/>
Electrical Data	Sub Form...	<input type="checkbox"/>
Minimum State of Charge	5 %	<input type="checkbox"/>
Maximum State of Charge	99 %	<input type="checkbox"/>
Minimum Cell Voltage	2.1 V	<input type="checkbox"/>
Maximum Cell Voltage	4.2 V	<input type="checkbox"/>

Şekil 5.8. Simcenter Flomaster programında batarya parametre tanımlama ekranı

Araç veri giriş ekranında girilen veriler doğrultusunda EA için model otomatik olarak oluşturulurken hibrit depolama sistemi için EA batarya modeli tasarlanmıştır. Bu oluşturulan modelde EA’ın fren, tekerlek, motor ve batarya gibi tüm hayatı birimlerden veri alınabilmektedir. Hibrit depolama sisteminde batarya ve süperkapasitör paralel olarak bağlanmış ve kontrol sistemi olarak öncesine bulanık mantık denetleyicisi entegre edilmiştir. Şekil 5.9’da Simcenter Flomaster programında modellenen hibrit depolamalı EA verilmiştir.

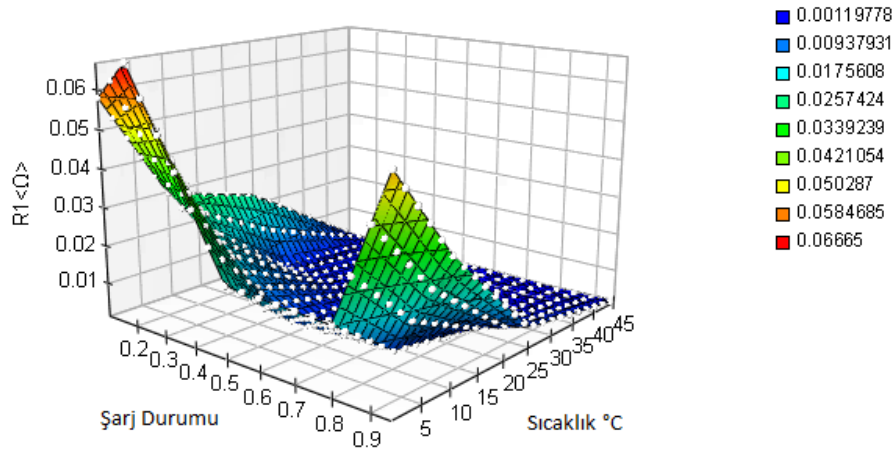


Şekil 5.9. Simcenter Flomaster programında modellenen hibrit depolamalı EA kontrol blok diyagramı

Çalışma sırasında izlenen sistematik yöntemlerden, EA'nın modellenmesi ve araç verilerinin belirlenmesi bu alt başlık altında tamamlanmıştır. Simülasyonda kullanılacak yol koşullarının seçimi ve analizleri bir sonraki alt başlık altında incelenecektir.

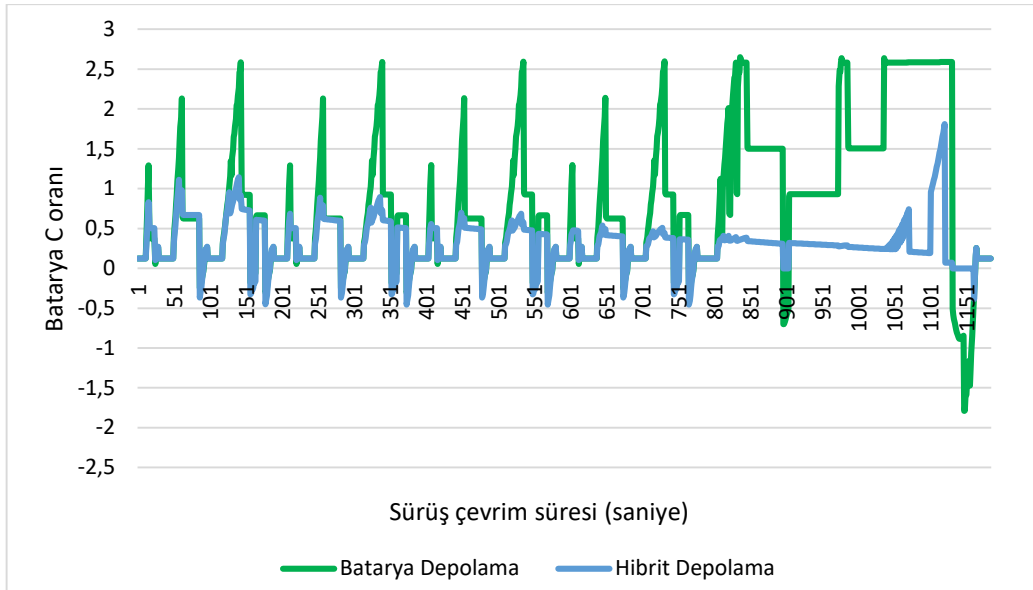
### 5.2.2. Simülasyon ortamında yapılan testler

Simcenter Flomaster programında da EA'lar için en uygun olan NEDC sürüş çevrimi kullanılmıştır. NEDC çevrimi ani hızlanma ve yavaşlama ile birlikte şehir içi ve şehir dışı sürüş sunmaktadır. Bu programda, batarya kullanım değerleri üzerinde gerçeğe en yakın sonuçları elde etmek amacıyla dış ortam ve kabin içi sıcaklıklar ayarlanabilmektedir. Ayrıca batarya başlangıç SoC değerinde ve batarya kapasitesinde değişiklik yapılmasına izin verir. Simcenter Flomaster programı bataryanın tüm parametrelerinin özelleştirilmesini olanak sağlar. Bu bağlamda batarya sağlığı için en önemli değişken olan iç direnç modeli oluşturur. Bu çalışmada kullanılan batarya için programda oluşturulan iç direncin üç boyutlu ilişkisi Şekil 5.10'da verilmiştir.



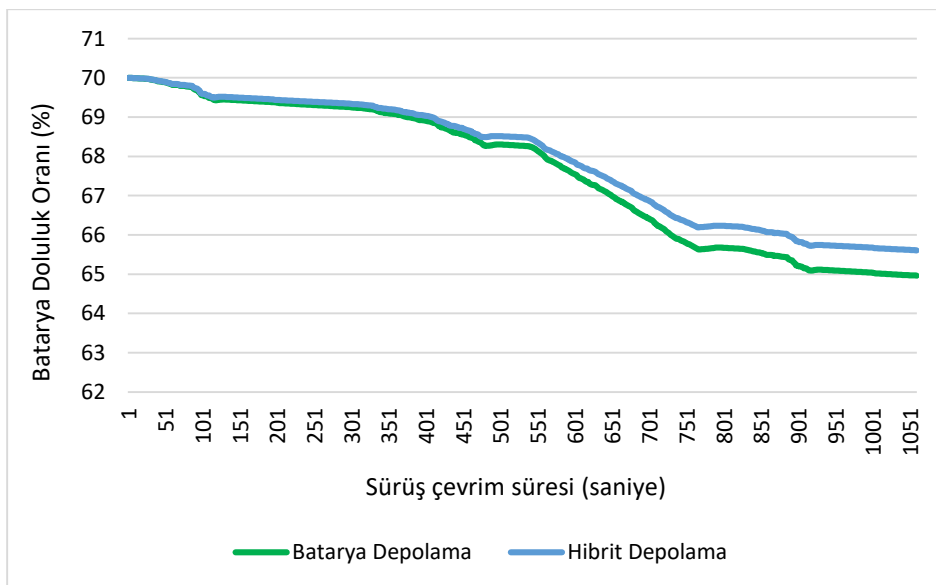
**Şekil 5.10.** Simcenter Flomaster programında batarya sıcaklık ve şarj durumuna bağlı olarak iç direnç değişimi

Simülasyon ortamında farklı dış ortam sıcaklığında ve farklı batarya SoC değerlerinde aracın Avrupa'daki yol koşullarının (NEDC sürüş çevrimi) benzetimi yapılmış ardından batarya ve hibrit depolama sisteminden geçilen akım değerleri incelenmiştir. Simülasyonda modellenen EA ait batarya verileri 95 seri ve 48 paralel bağlı olarak 4560 batarya adedi sisteme tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında 2900 mAh kapasiteye ait bataryalar -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C dış ortam sıcaklıklarında teste edilmiştir. Tüm bu dış ortam sıcaklıklarında EA kabin sıcaklığı 20 °C olarak muhafaza edilmiştir. Simcenter Flomaster programından 20 °C dış ortam sıcaklığında yapılan simülasyon sonucunda alınan akım değerleri batarya başına C değeri olarak hesaplanarak Şekil 5.11'de verilmiştir. Faydalı fren oranı %80 ve batarya başlangıç SoC %70 olarak tanımlanmıştır. Bataryadan geçilen akım değerleri ve faydalı frenlemeden gelen akım değerleri incelendiğinde hibrit depolamalı sistemdeki bataryanın, batarya depolamalı sisteme göre %28,7 oranında daha düşük akım değerlerine maruz kaldığı görülmektedir.

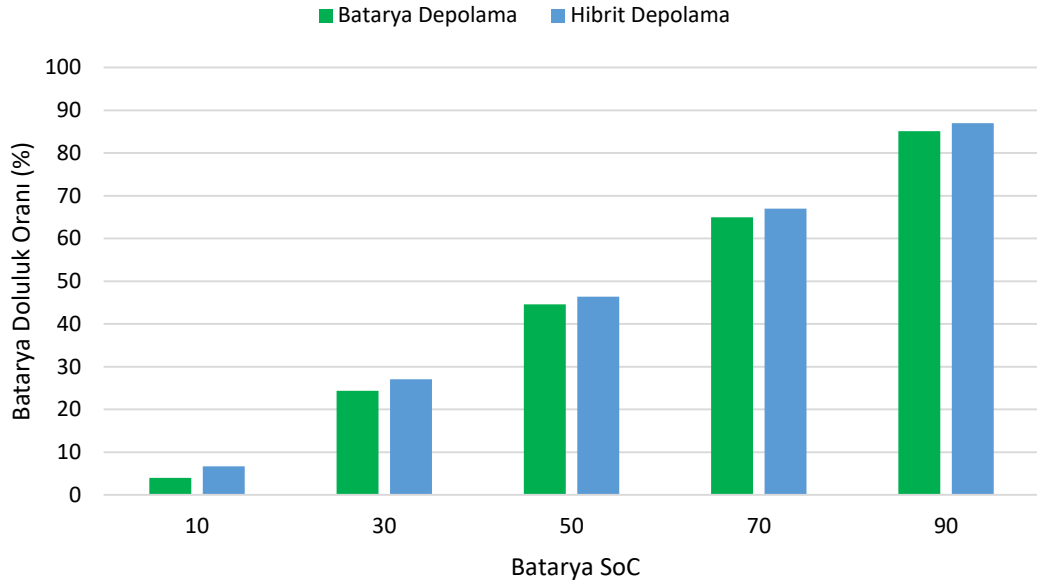


Şekil 5.11. Simcenter Flomaster programında NEDC sürüş çevriminde oluşan akım değerleri

Simcenter Flomaster programında %70 batarya doluluk ve %50 süperkapsitör doluluk oranında teste başlanmıştır. Hibrit depolamalı sistem sürüş çevrimini %4,15 batarya kaybı ile tamamlarken batarya depolamalı sistem %5,02 batarya kaybı ile tamamlamıştır. Şekil 5.12’de sistemlerin çevrim sürüşü süresince SoC değişimini göstermektedir. 20 °C dış ortam sıcaklığında ve bataryanın farklı SoC değerlerinde yapılan sürüş çevrimi sonrasında elde edilen batarya SoC değerleri ise Şekil 5.13’te gösterilmektedir.

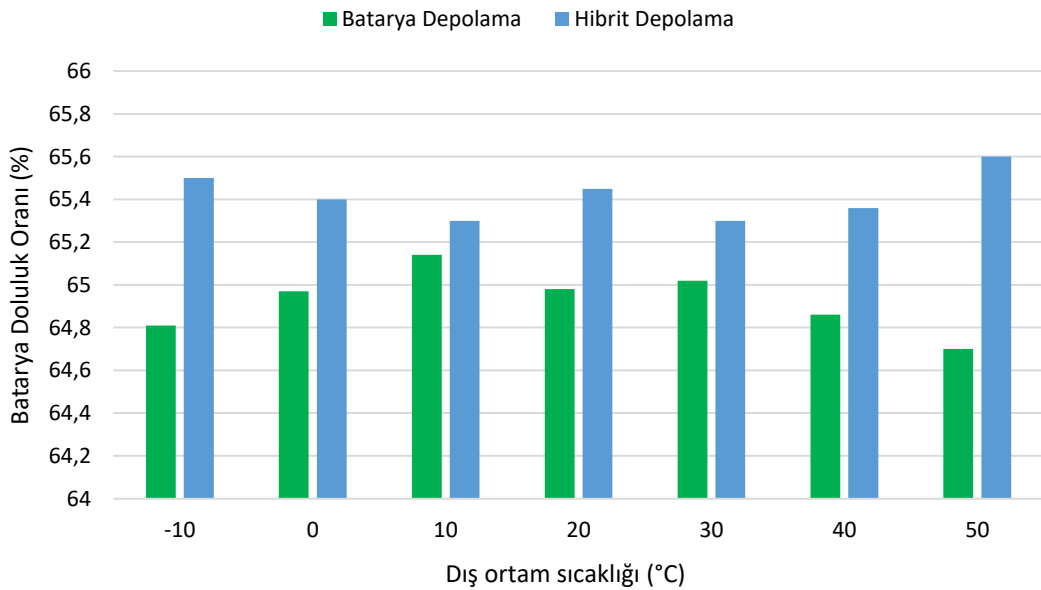


Şekil 5.12. NEDC sürüş çevriminde batarya SoC değişimi



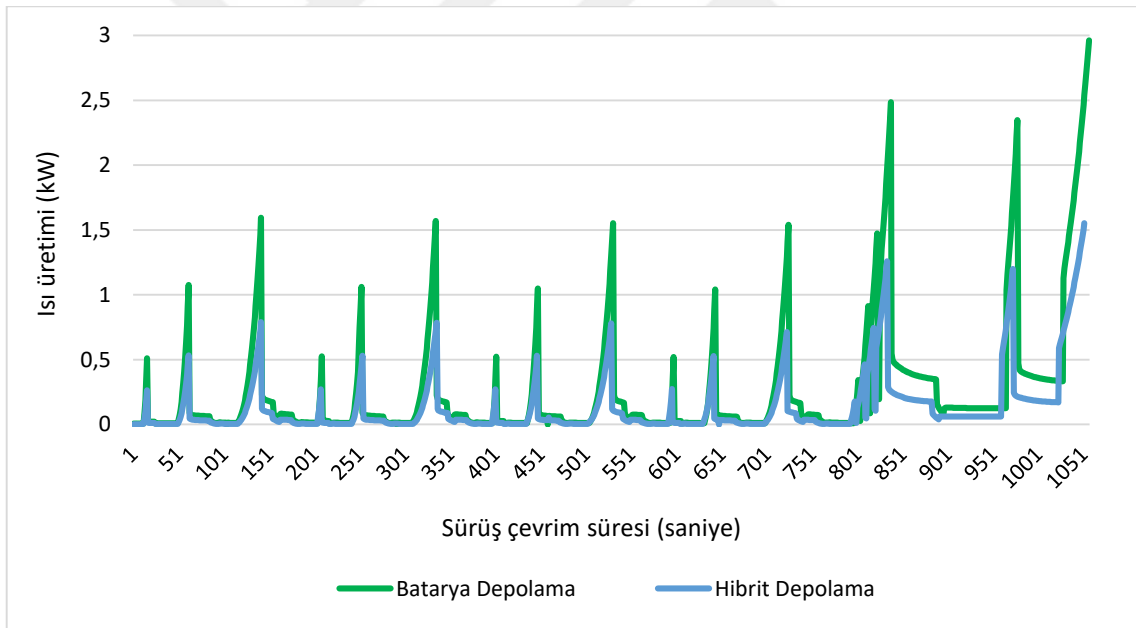
Şekil 5.13. Bataryanın farklı SoC değerlerinde değişimi

Sürüş çevrimine bataryanın farklı SoC oranlarında başlanması ile yüzdelik olarak farklı kazanımlar elde edilmiştir. Bunun nedeni bulanık mantığın farklı SoC oranlarda farklı depolama yöntemlerini seçerek batarya sağlığını korumasından kaynaklanmaktadır. Benzer durum farklı sıcaklık değerleri içinde geçerlidir. Şekil 5.14'te %70 batarya ve %50 süperkapasitör SoC oranında ve farklı dış ortam sıcaklıklarda gerçekleşen sürüş çevrimi sonucunda elde edilen batarya SoC değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Farklı sıcaklık değerlerinde elde edilen batarya SoC

Batarya SoC oranının %10 olduğu durumda sistem bataryanın derin deşarj olmasını engellemek amacıyla süperkapasitörü daha fazla kullanmıştır. Batarya SoC oranı %90 olduğunda da benzer bir durum gerçekleşerek bataryanın tam kapasite şarj olarak güvenlik zafiyeti oluşturması engellenmiştir. Farklı SoC değerlerinin tamamı dikkate alındığında hibrit depolamalı sistemde batarya %20,43 oranında daha az enerji harcamıştır. Dış ortam sıcaklığının değişmesi ile batarya kullanım oranı da değişmiş ve 6 farklı dış ortam sıcaklığında yapılan testlerde batarya kullanım oranı %21,3 oranında azalmıştır. Dış ortam sıcaklığı 50 °C olduğunda sistem batarya kullanımını azalttığı için batarya SoC artış göstermiştir. Batarya kullanımının azalması sonucunda batarya paketinin ürettiği ısı azalmış ve soğutma için harcanan enerji sarfiyatında kazanım sağlanmıştır. Şekil 5.15'te %70 batarya ve %50 süperkapasitör SoC oranında ve 20 °C dış ortam sıcaklığında gerçekleşen sürüş çevrimi süresince batarya paketinin ürettiği ısı enerjisi gösterilmektedir.



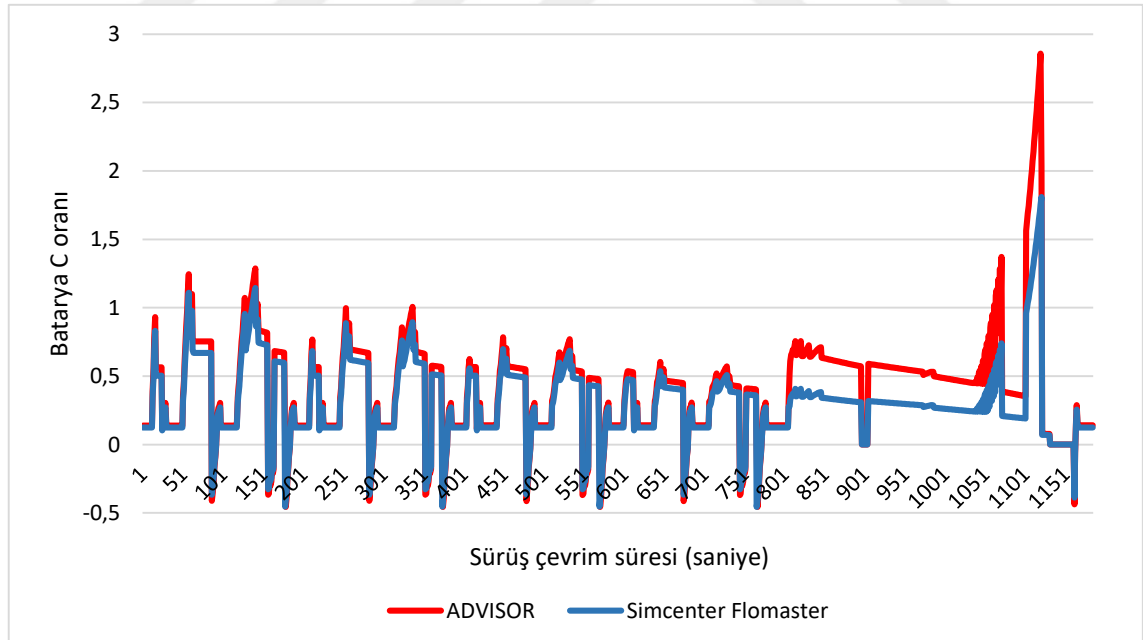
Şekil 5.15. NEDC sürüş çevriminin bataryanın ısı üretimi (kW)

NEDC sürüş çevrimi boyunca hibrit depolama sistemi standart batarya sisteminde göre %46,84 oranında daha az ısı üretmiştir. Bu sayede batarya ısınması sonucunda bataryada oluşacak iç direnç artışının önlenerek batarya sağlığı korunmuştur. Böylece hibrit depolamalı sistem hem araç menziline hem de batarya ömrüne olumlu katkı sağlamıştır. Sürüş çevriminde batarya depolamalı EA'nın menzili faydalı frenleme olmadan 218 km, sadece faydalı frenleme ile 235 km ve hibrit depolamalı kombinasyon

ile aracın menzili 243 km olmuştur. Böylece hem EA'nın menzili artmış hem de bataryanın daha az kullanımından dolayı batarya ömrüne olumlu katkı sağlanmıştır.

### 5.3. Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bulanık mantık ile kontrolü sağlanan hibrit depolamalı sistemin, batarya depolamalı sistem ile karşılaştırılması ADVISOR ve Simcenter Flomaster programlarında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda NEDC sürüş çevrimi kullanılmış ve batarya üzerinde oluşan akım değerleri ve batarya doluluk oranları kıyaslanmıştır. Süperkapasitörler yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasalar da, faydalı frenlemeden gelen anlık enerji talepleri hızlı bir şekilde depolamış ve ani hızlanmalarda anlık enerji taleplerini hızlı bir şekilde karşılamışlardır. Bu sayede batarya üzerindeki tüketim değerleri azalmış ve batarya üzerindeki faydalı frenlemeden depolanan ve harcanan enerjideki yüksek akım değerleri azalarak batarya sağlığı korunmuştur. Şekil 5.16'da ADVISOR ve Simcenter Flomaster programında hibrit depolamalı sistemin batarya üzerinde oluşturduğu akım değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Hibrit depolamalı sistemin batarya üzerinde oluşturduğu akım değerlerinin karşılaştırması

Simcenter Flomaster programı, EA'ya ait tüm bileşen değerlerinde değişiklik yapma olanağı sunması nedeniyle, elde edilen sonuçlar gerçek hayata oldukça yakın bir

uyumluluk sergilemektedir. ADVISOR programı ise batarya başlangıç SoC değerini yalnızca %70 ile başlatmaktadır. Bu nedenle bataryanın farklı SoC değerlerindeki testleri Simcenter Flomaster programında yapılmıştır. Ayrıca farklı dış ortam sıcaklığındaki testler ve bataryanın ısı üretim değerleri Simcenter Flomaster programında gerçekleştirilmiştir. Hibrit depolama sistemli EA'ta batarya üzerinde oluşan akım değerleri ADVISOR programında %29,1 Simcenter Flomaster programında ise %28,7 oranında azalmıştır. Benzer şekilde batarya SoC değerleri ADVISOR programında %7 oranında azalırken, Simcenter Flomaster programında %4,15 azalmıştır. Programlarda batarya SoC sonuçlarının farklı olmasının sebebi ADVISOR programında batarya bileşenine ait tüm parametrelerin ayarlanamadığından kaynaklanmaktadır.

Süperkapasitör ve batarya kombinasyonlu hibrit depolama sistemi EA'lar için daha etkili enerji yönetimi ve performans artışı sağlar. Bataryada üzerinde oluşan yüksek akım değerlerini sınırlayarak bataryadaki ısınmaları en aza indirir. Bu sayede hibrit depolamalı sistem EA'larda batarya ömürlerinin uzamasına katkı sağlar. NEDC sürüş çevriminden elde edilen akım değerleri Bölüm 6'da Aspilsan 18650 batarya üzerine uygulanarak batarya ömründeki değişimler test edilmiştir.

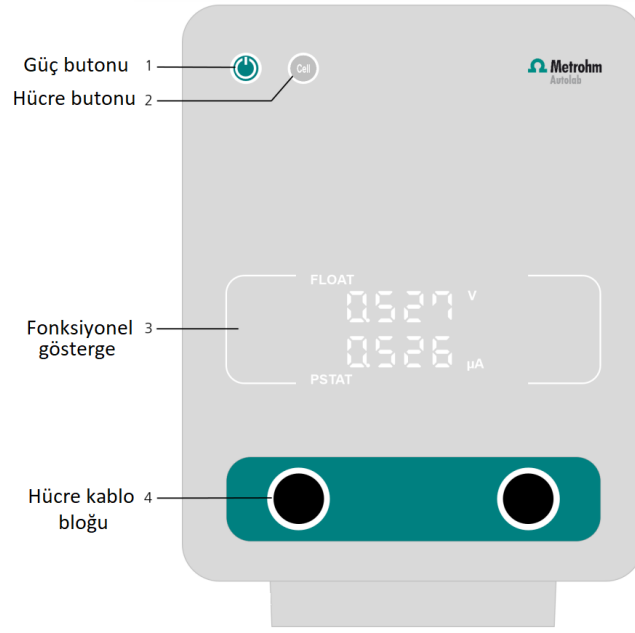
## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında bataryanın deneysel testleri için Metrohm firmasına ait Vionic cihazı kullanılmıştır. Metrohm Vionic, Li-iyon batarya test süreçlerini optimize etmek ve analitik sonuçların güvenilirliğini artırmak için tasarlanmıştır. Bu cihazın yüksek hassasiyeti ve doğruluğu, Li-iyon bataryaların elektrokimyasal özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesine imkan tanır. Cihazın tekrarlanabilir ölçüm yetenekleri, batarya performansının zaman içinde nasıl değiştiğini takip etmemize ve anlamamıza yardımcı olur. Ayrıca Metrohm Vionic'in Li-iyon batarya testindeki kullanım kolaylığı, araştırmacıların test süreçlerini daha verimli hale getirmesine olanak tanır. Otomatik ölçüm modları ve geniş veri analizi seçenekleri, kullanıcıların farklı batarya örneklerini hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirmesini sağlar. Metrohm Vionic cihazının Li-ion batarya testi için sağladığı bu avantajlardan dolayı tez çalışmasında kullanılmasına karar verilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde Metrohm Vionic cihazı tanıtılacak, Aspilsan Li-iyon batarya yaşlandırma testleri yapılacak ve simülasyon ortamında elde edilen veriler doğrultusunda batarya depolamalı ve hibrit depolamalı elektrikli aracın deneysel testleri yapılarak karşılaştırılacaktır.

### 6.1. Metrohm Vionic Cihazı

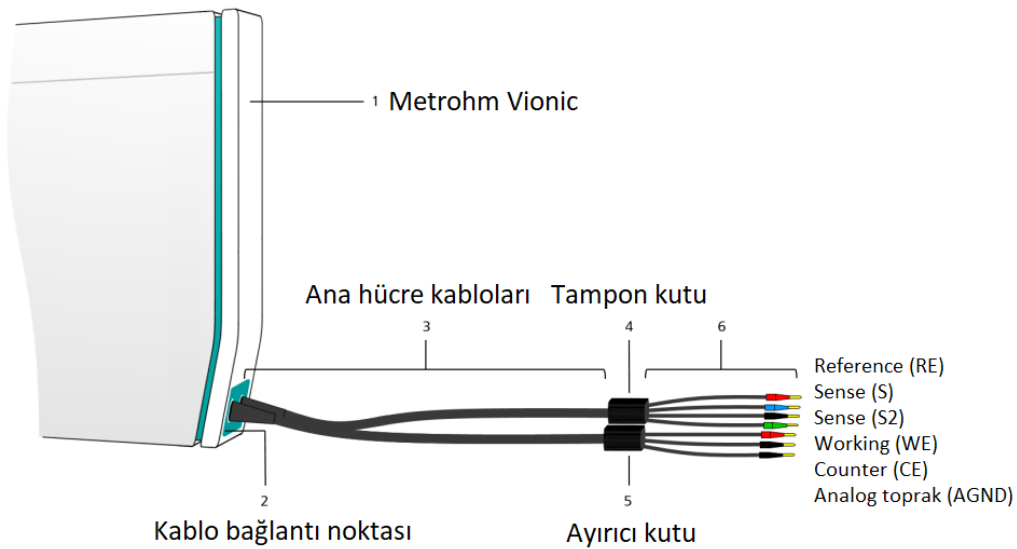
Bu bölümde, Metrohm Vionic cihazının elektrokimyasal deneylerde kullanılan donanım özellikleri verilerek cihaza genel bir bakış sunulmuştur. Metrohm Vionic, Intello yazılımı tarafından desteklenen bilgisayar kontrollü potansiyostatik ve galvanostatik modlarda çalışabilen elektrokimyasal bir cihazdır. Metrohm Vionic; 50V, 6A, 10 MHz empedans spektroskopisi ve 1  $\mu$ s'ye kadar örnekleme aralığı ile çok kapsamlı özellikler sunmaktadır. Cihazın temel blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.





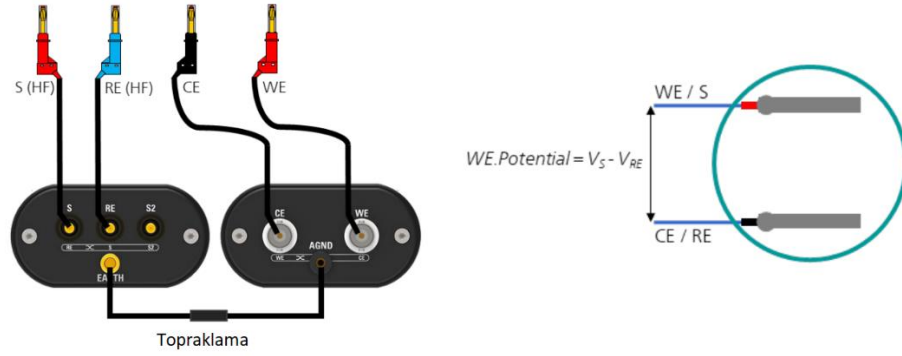
Şekil 6.2. Metrohm Vionic dinamik arayüzü (Metrohm, 2024)

Metrohm Vionic'e güç verilmesi ile dinamik arayüzün tamamı görünür hale gelir. Bu sayede hücreye ait gerilim ve akım değerleri fonksiyonel gösterge panelinden okunabilir. Toplam altı adet hücre bağlantı kablolarına sahip olan cihazda, Li-iyon bataryanın testi için dört kablolu bağlantı gerçekleştirilmektedir. Dört kablolu bağlantı sayesinde batarya testleri daha hassas bir doğrulukta gerçekleştirilir. Şekil 6.3'te cihazın bağlantı kabloları verilmiştir.



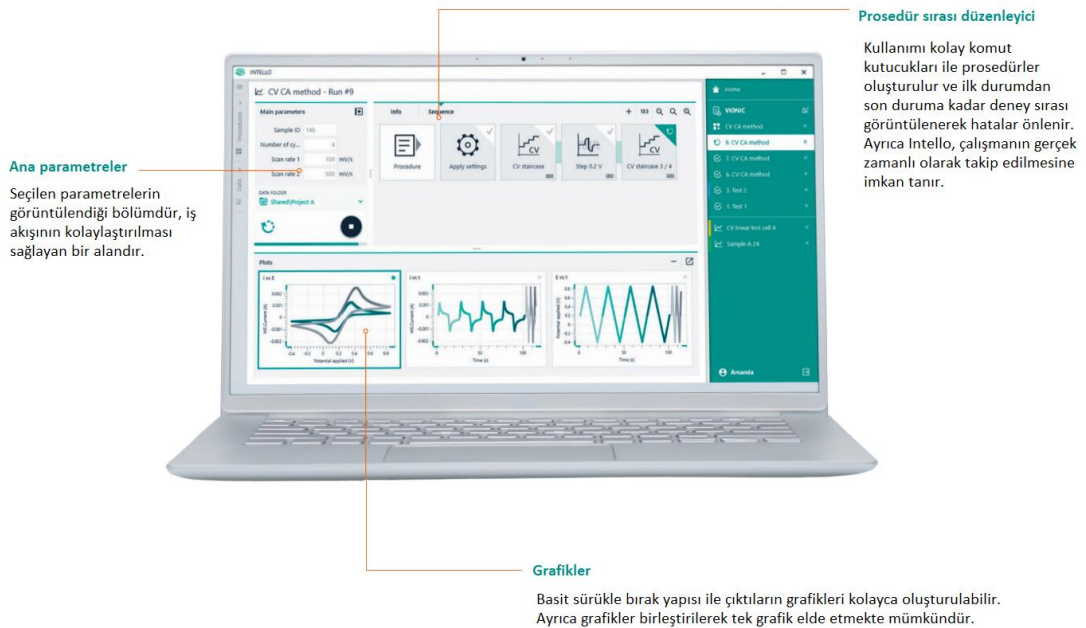
Şekil 6.3. Metrohm Vionic kablo bağlantıları (Metrohm, 2024)

Şekil 6.3'te görülen tampon ve ayırıcı kutuları sayesinde bataryaya gönderilen sinyallerde herhangi bir bozulma ve kayıp olması engellenir. Metrohm Vionic cihazı, bataryaya dört kablolu bir şekilde (WE+S) ve (RE+CE) kablolarıyla bağlanır. Şekil 6.4'te tampon ve ayırıcı kutuların çıkışındaki kablolar verilmiştir.



Şekil 6.4. Metrohm Vionic tampon ve ayırıcı kutularının çıkış kabloları (Metrohm, 2024)

Test edilecek bataryanın bağlantıları tamamlandıktan sonra Intello programında Metrohm Vionic cihazı ile arasındaki bağlantı kurulur. Programda kullanıcı paneli açıldıktan sonra listelenen cihazlardan Vionic ana cihaz alanına sürüklenerek bırakılır. Ardından yapılması istenilen prosedür Intello'da oluşturulur. Şekil 6.5'te Intello yazılımına ait genel bir bakış sunulmuştur.



Şekil 6.5. Metrohm Intello yazılımının genel görünümü (Metrohm, 2024)

Intello'da oluşturulan deneylerin verileri sürekli ve otomatik olarak kaydedilir. Böylece beklenmedik bir bağlantı kopması veya deneyin kesintiye uğraması durumunda veri kayıplarının önüne geçilir. Veri kayıplarını önlemek amaçlı Metrohm Vionic içinde elektrokimyasal verileri 10 milyona kadar kayıt edebilecek bellek bulunmaktadır.

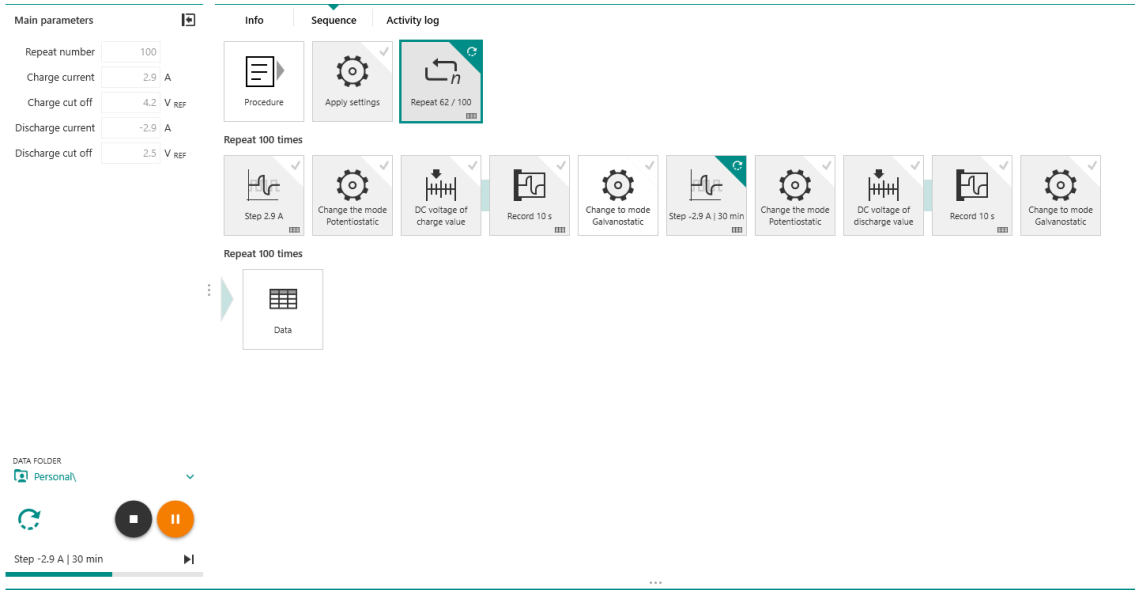
## **6.2. Li-iyon Batarya Yaşlandırma Testi**

Tez çalışmasında faydalı frenleme enerjisinin hibrit depolama sistemlerinde depolanmasının batarya ömründe oluşturacağı değişikliği belirlemek için, başlangıçta bataryanın normal kullanım şartlarında nasıl yaşlandığı izlenmesi gereklidir. Bu aşamada elde edilen sonuçlar, batarya depolamalı ve hibrit depolamalı sistemlerin karşılaştırılmasına katkı sağlayacaktır.

### **6.2.1. Batarya yaşlandırma modeli**

Tez çalışmasında kullanılan Aspilsan 18650 Li-iyon batarya, oda sıcaklığında 1C oranında 500 şarj ve deşarj döngüsüne maruz bırakılarak yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işlemi Metrohm Vionic cihazında yapılmıştır. Yaşlandırma testi, EA kullanıcının kullanım alışkanlıklarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı batarya tamamen şarj ve deşarj edilmemiştir. Metrohm Vionic cihazında şarj ve deşarj işlemlerinde her saniye veri kaydedilmiştir. Batarya şarj olurken 4.2V ve deşarj olurken 2.5V değerinden iki saniye boyunca örnek alınması durumunda bir sonraki adıma geçilmiştir. Bundan dolayı bataryanın maksimum kapasitesinden daha düşük bir kapasite elde edilmiştir. Ancak bu yaşlandırma testi sonucundaki kapasite değerleri, gerçek sürüş koşullarında oluşacak kapasite değerlerine daha yakındır.

Yaşlandırma testi, Metrohm Vionic cihazında tek bir prosedür oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Cihazın potansiyostatik ve galvanostatik modlar arasında geçiş yapma özelliğinden dolayı şarj ve deşarj işlemlerini tek prosedürde oluşturulabilmektedir. Bu sayede bir kere oluşturulan prosedür 500 döngü olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 6.6'da Intello yazılımında oluşturulan batarya yaşlandırma prosedürü gösterilmektedir. Ayrıca bataryanın yaşlandırma aşamasında iç direncinde oluşan değişimleri tespit etmek için 100. çevrim ve 300. çevrimde teste ara verilerek RC3563 iç direnç ölçüm cihazı ile ölçümler yapılmıştır.

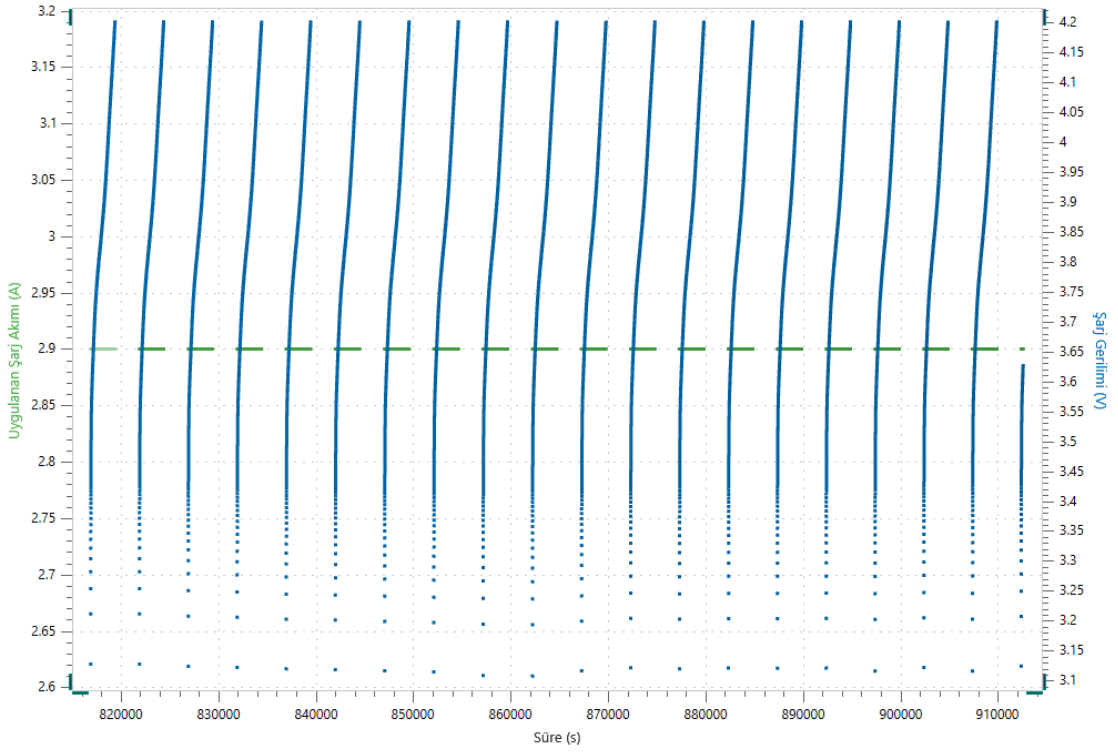


**Şekil 6.6.** Metrohm Intello yazılımında oluşturulan batarya yaşlandırma prosedürü

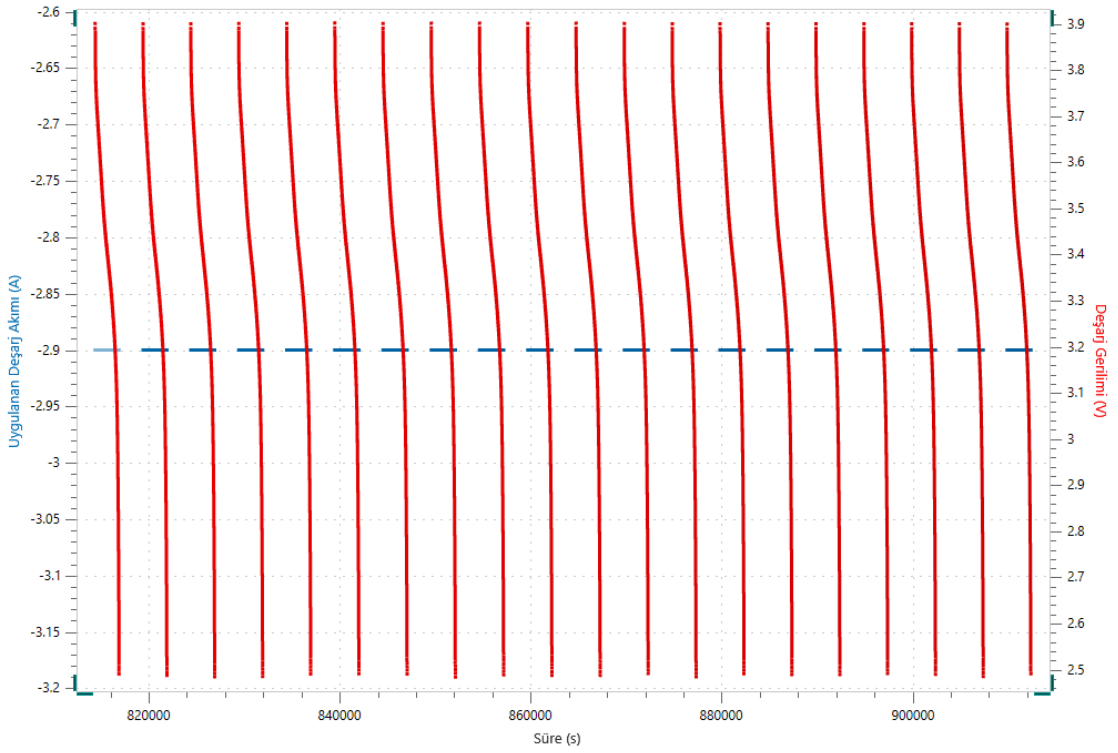
Bu aşamada test edilen batarya fabrikadan geldiği doluluk oranı ile 1C oranında bir kere şarj ve deşarj işlemi yapılmış ardından yaşlandırma aşamasına alınmıştır. Batarya sabit akım ve sabit gerilim (CC-CV) metoduna uygun olarak şarj edilmiştir. Prosedür öncelikle potansiyostatik modda şarj işlemine ile başlamış 4.2V gerilimde iki örneklem alınması halinde galvanostatik moda geçiş yapılarak gerilim sabit tutulmuş ve 10 saniye boyunca değişken akım değeri ile şarj işlemine devam edilmiştir. Bu sürenin tamamlanmasının ardından aynı işlem deşarj aşaması içinde uygulanmıştır. Gerilim ve akım değerlerindeki değişimler her bir saniyede bir kayıt edilecek şekilde ayarlanmıştır.

### 6.2.2. Batarya performansının izlenmesi

Batarya yaşlandırma testinin tamamlanması ile 3 milyondan fazla veri elde edilmiştir. Bu veriler sayesinde bataryada döngü sayısına bağlı kapasite değişimi, zamana bağlı gerilim depolama kapasitesi ve aralıklı yapılan ölçümler ile iç direnç değişimi gibi önemli değişimler kayıt edilmiştir. Bataryanın 280. ve 300. çevrimler arasında şarj ve deşarj performansları Şekil 6.7 ve 6.8’de verilmiştir.

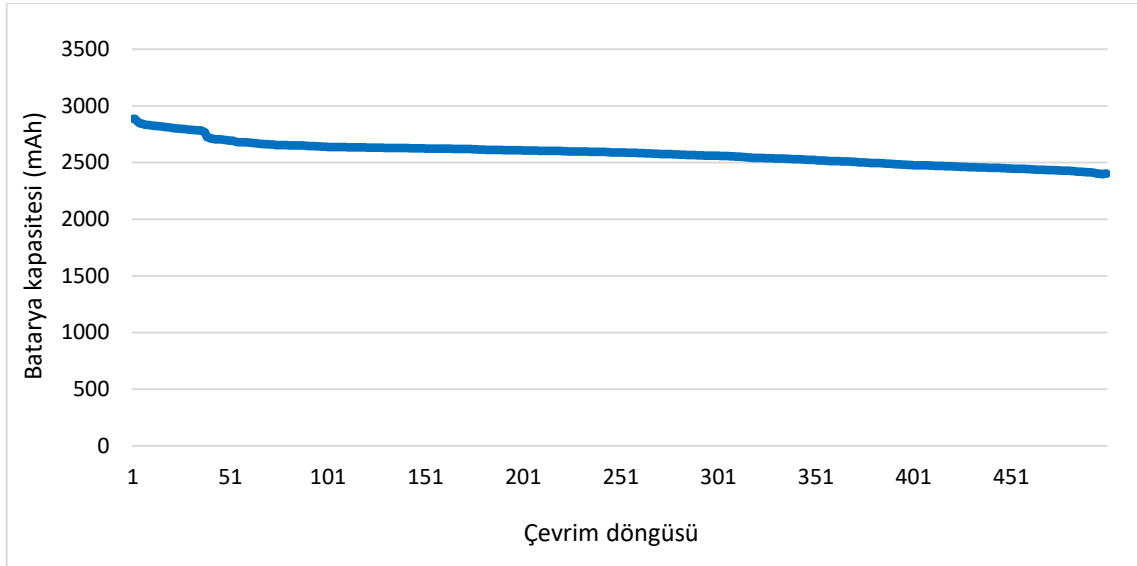


Şekil 6.7. Aspilsan 18650 Li-iyon bataryanın şarj eğrisi



Şekil 6.8. Aspilsan 18650 Li-iyon bataryanın deşarj eğrisi

EA kullanıcısının kullanım alışkanlıklarına benzer şarj ve deşarj işlemlerinde batarya kapasitesi 2886 mAh olarak ölçülmüş, 500 çevrim sonunda %16,77'lik bir kapasite kaybı ile 2402 mAh olmuştur. Şekil 6.9'da batarya yaşlandırma testinde batarya kapasitenin değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 6.9.** Yaşlandırma testi sonucunda bataryanın kapasite değişimi

İç direnç, bir bataryanın kalitesini ve kullanım ömrü boyunca göstereceği performansı yansıtan kritik bir özelliktir. Batarya iç direncinin yükselmesi sonucunda, batarya verimi azalır ve erken arızalanma eğilimi artar. Yüksek iç empedans, kullanım sırasında aşırı ısı üretme eğilimindedir, bu da bataryanın termal kaçak yapması durumunda güvenlik sorunlarına yol açabilir. İç direncin ölçülmesi, EA'ta potansiyel arıza riski taşıyan batarya hücrelerini tanımlamanın etkili bir yoludur. Yaşlandırma testi boyunca ölçülen batarya iç direnci Tablo 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.9'daki kapasite değişimi ve Tablo 6.1'deki iç direnç değişimi incelendiğinde batarya sağlığındaki bozulmanın ilk yüz çevrimde daha fazla olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.1.** Batarya iç direnç değişimi

Çevrim döngüsü	İç direnç (mΩ)
Başlangıç	16,60
100	24,80
300	25,30
500	26,90

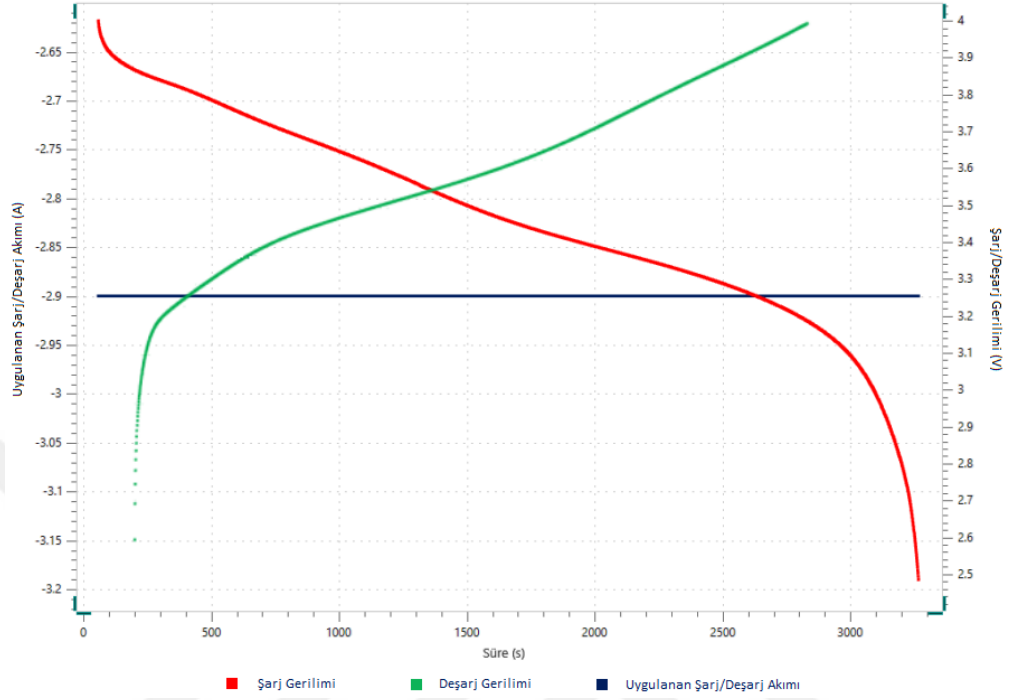
### 6.2.3. Batarya yaşlanması için tahmin modeli geliştirme

EA'ın sürüş esnasında sürekli değişen akım değerleri ve değişen ortam sıcaklığından dolayı bataryadaki yaşlanma oranı her araç için farklı olmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle bataryanın kapasitesini doğru tahmin etmek üzerine yoğunlaşmıştır (Di Luca ve ark., 2023; El Marghichi ve ark., 2023). Ancak yalnızca batarya kapasite kestirimi ile batarya sağlığını tahmin etmek doğru sonuçlar vermeyebilir. Yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için batarya kapasitesinin yanı sıra batarya şarj ve deşarj davranışlarının da incelenmesi gereklidir. Bu kapsamda Metrohm Vionic cihazında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen şarj ve deşarj verileri ile batarya çevrim döngüsü tahmin modeli geliştirilmiştir. Çalışma Matlab ortamında “Regresyon Öğrenici Uygulaması” (RLA) aracı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Aracın içerisinde regresyon modellerini eğitmek ve doğrulamak için birçok yöntem vardır. RLA içerisinde bulunan Gauss süreç regresyonu (GPR), karar ağaçları, destek vektör makineleri (SVM) ve sinir ağı modelleri kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Gauss süreç regresyonu modelinde doğruluk oranı yüksek olmasına rağmen uygulamaya bağlı olarak sonuçların yorumlanması zor olabilir. Karar ağacı modelinde veriler küçük parçalara bölünerek öğrenme sağlanır. Bu model aşırı uyum sorunu oluşturarak ezberleme yapmasını önlemek için ağacın büyümesi durdurulur veya ağaçtaki gereksiz kısımlar çıkartılır (Qian ve ark., 2023). SVM modelinde giriş verileri sınıflara ayrılarak sınıflar arasındaki sınırlar öğrenilmeye çalışılır. Modelin doğrusal verilerde yorumlanması kolaydır ancak doğruluk oranı düşüktür. Sinir ağı ise yapay zeka alanında kullanılan insan beyninin yapısına benzer şekilde tasarlanmış denetim veya denetimsiz olarak öğrenme sağlayabilen bir modeldir. Modelin katman sayısı ve nöronları optimize edilerek yüksek doğrulukta tahmin gerçekleştirilmesi doğrusal veya doğrusal olmayan veriler için uygundur.

Bu çalışmada modelin eğitilmesinde üç girdi ve bir çıktı parametresi kullanılmıştır. Girdi parametreleri her bir şarj ve deşarj döngülerinin 400. ve 600. saniyeleri arasındaki gerilim farkı ve kapasitesi değeridir. Bu aralıktaki değerlerin seçilme nedeni çevrim döngüsüne bağlı olarak şarj ve deşarj eğrilerinde en yüksek değişimin bu saniyeler arasında olmasıdır (Şekil 6.10). Çıktı parametresi ise bu değerlere karşılık gelen çevrim döngü sayısıdır. Geliştirilen tahmin modeli sayesinde bir şarj ve

deşarj döngüsü yapılan EA'ta kullanıma bağlı olarak bataryanın çevrim döngü sayısı ve batarya sağlığı hakkında bir bilgi elde edilecektir.



Şekil 6.10. Bataryanın şarj vedeşarj esnasında gerilim değışimi

Laboratuvar çalışmasında elde edilen veriler Matlab'da RLA ortamına eklenerek modeller eğitilmiştir. RLA ortamına eklenen veriler Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Batarya yaşlandırma testinde elde edilen veriler

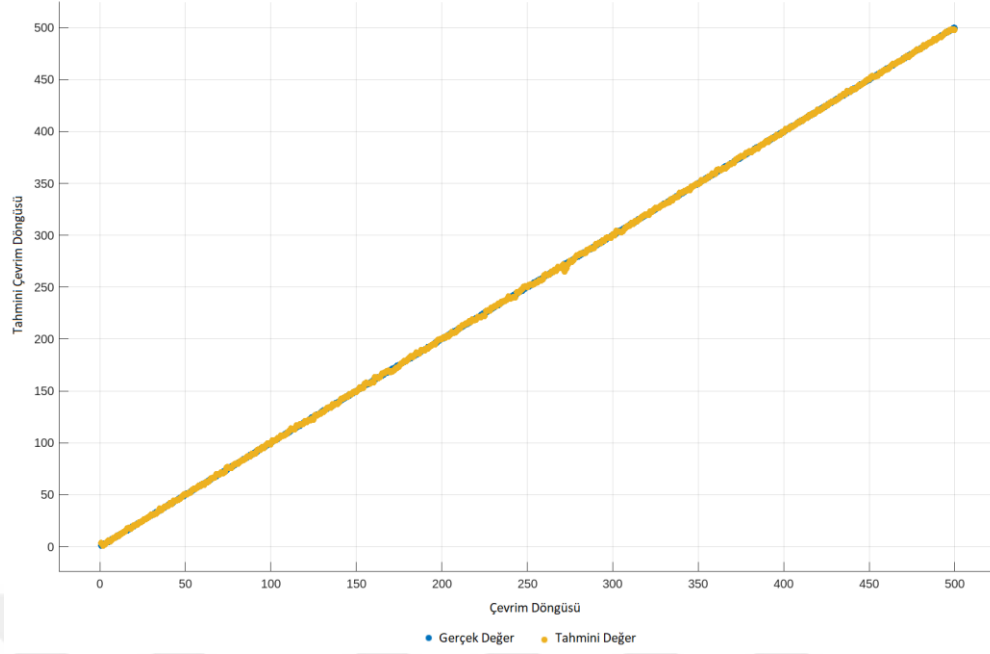
Deşarj farkı (V)	Şarj farkı (V)	Kapasite (mAh)	Çevrim döngüsü
0,061860561	0,052286148	2886	1
0,060992241	0,052347183	2884	2
0,060992241	0,052802563	2867	3
0,060513973	0,053014278	2851	4
0,060016632	0,053123951	2842	5
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0,052522182	0,069480419	2402	499
0,052511692	0,069616318	2402	500

Matlab RLA ortamına girilen veriler doğrultusunda modellerin eğitimi yapılmış ve verilerin %5'lik kısmı rastgele seçilerek test aşamasında kullanılmıştır. Eğitilen modellerden en iyi sonucu GPR modelinde exponential ve matern 5/2 algoritmaları vermiştir. En kötü sonuç ise SVM modelinde gerçekleşmiştir. Eğitilen modellerin karşılaştırması Tablo 6.3'da sunulmuştur.

**Tablo 6.3.** Matlab RLA'da eğitilen modellerin karşılaştırması

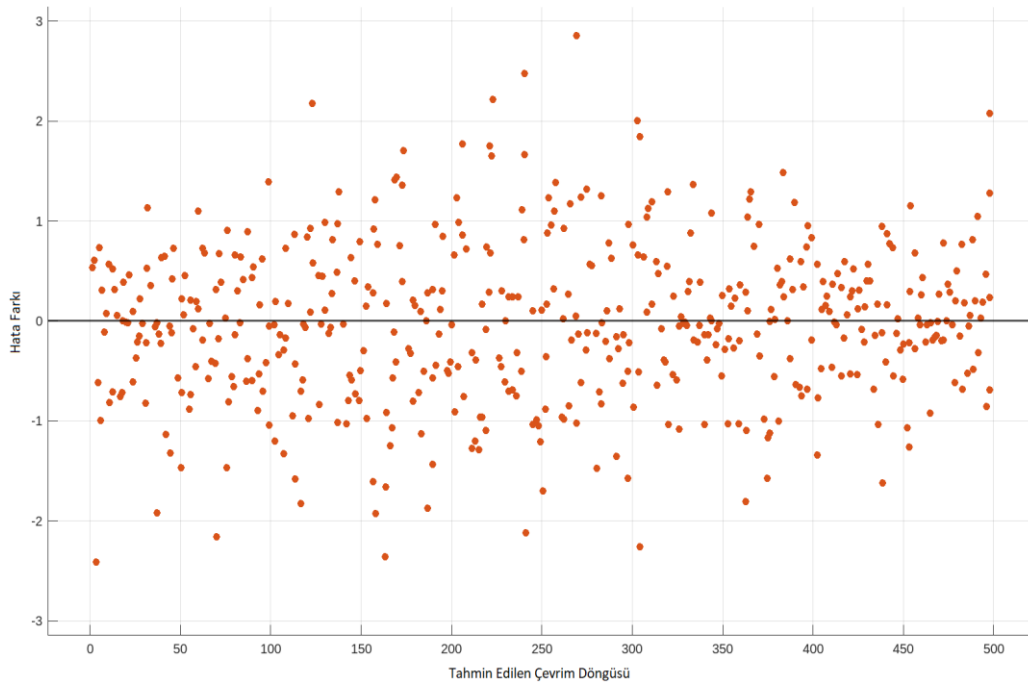
Model Tipi	Algoritma	RMSE	MSE	R <sup>2</sup>
GPR	Exponential GPR	0,78934	0,62306	0,99997
GPR	Matern 5/2 GPR	1,27112	1,61575	0,99992
GPR	Rational Quadratic GPR	1,32369	1,75216	0,99992
Sinir Ağı	Wide Neural Network	1,43468	2,05831	0,99990
GPR	Squared Exponential GPR	1,57305	2,47448	0,99988
Sinir Ağı	Bilayered Neural Network	1,65157	2,72767	0,99987
Sinir Ağı	Medium Neural Network	1,92674	3,71234	0,99982
Sinir Ağı	Narrow Neural Network	2,31617	5,36466	0,99974
Karar Ağacı	Fine Tree	3,27360	10,71644	0,99949
Karar Ağacı	Fine Tree	3,27360	10,71644	0,99949
Karar Ağacı	Medium Tree	6,74987	45,56072	0,99782
SVM	Cubic SVM	10,35268	107,17797	0,99488
SVM	Quadratic SVM	11,08394	122,85368	0,99413
SVM	Medium Gaussian SVM	12,98858	168,70318	0,99194
SVM	Coarse Gaussian SVM	15,82111	250,30747	0,98804
SVM	Fine Gaussian SVM	17,80777	317,11677	0,98485
Karar Ağacı	Coarse Tree	18,59313	345,70439	0,98348
SVM	Linear SVM	40,77290	1662,42901	0,92058

Tablo 6.3 incelendiğinde bataryanın çevrim döngüsünü tahmin etmek konusunda başarılı olan modeller GPR ve sinir ağı modelleridir. Hata değerlerinde RMSE ve MSE değerlerinin sıfıra yaklaşması R<sup>2</sup> değerinin ise bir değerine yaklaşması modelin uygunluğunu göstermektedir. Bu bağlamda GPR modelinin exponential algoritması en iyi yaklaşımı sağlamıştır. Bu modelin gerçek değerler ve tahmin değerlerini gösteren grafiği Şekil 6.11'de verilmiştir.



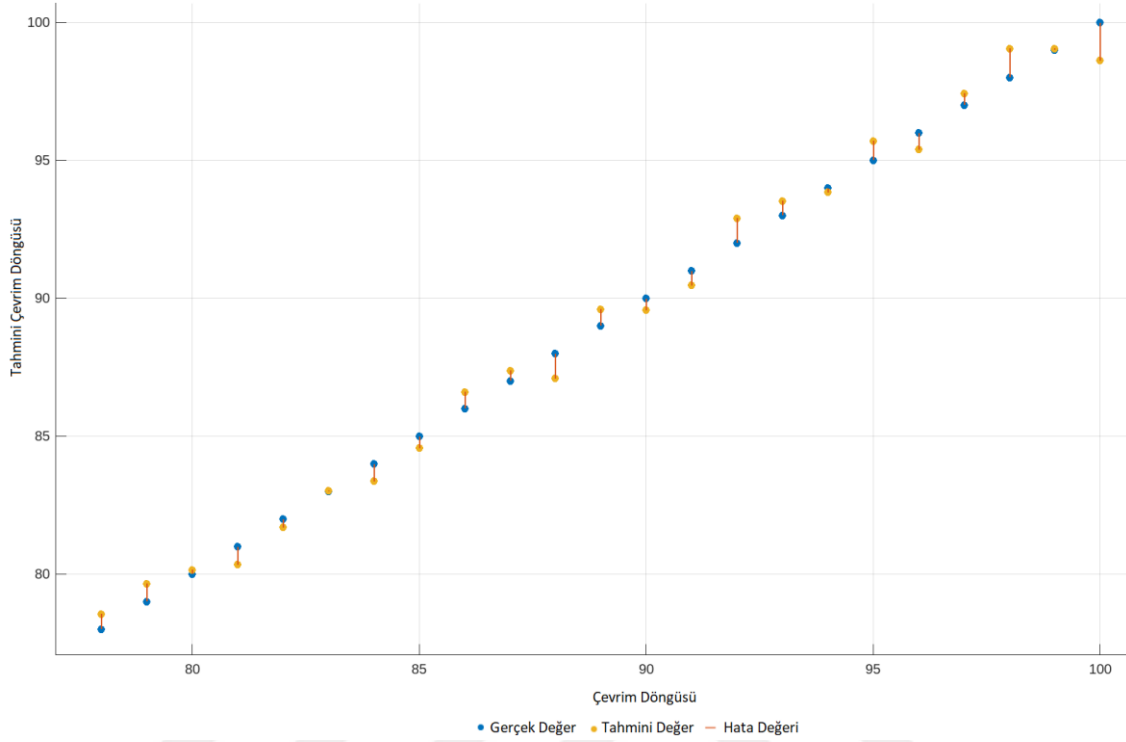
**Şekil 6.11.** Exponential GPR'de alınan sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırması

Exponential GPR oldukça iyi başarı göstermiş ve gerçek tahmin değerlerinden en fazla 2,8 çevrim döngüsü hata farkı oluşmuştur. Tüm çevrimlerde istikrarlı bir tahmin işlemi yapmıştır. Tahmin işlemlerinde oluşan hata farklarının daha net anlaşılması için Şekil 6.12'de verilmiştir.



**Şekil 6.12.** Exponential GPR'de alınan sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırması

Hata farklarının gerçek değerler ile karşılaştırılmalı olarak gösterimi Şekil 6.13'te verilmiştir.



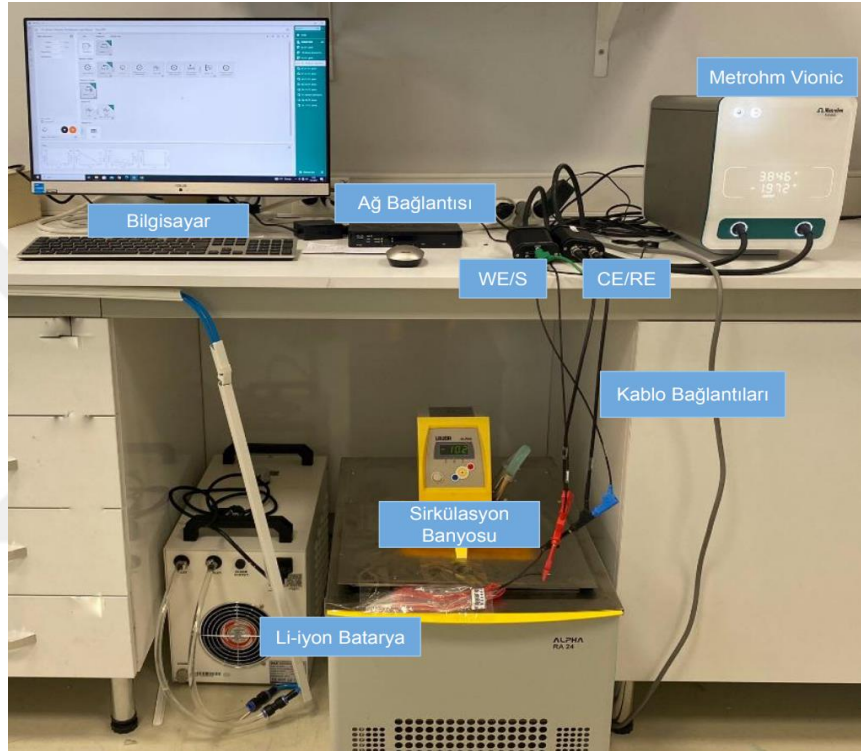
Şekil 6.13. Gerçek ve tahmini değerler arasında oluşan hata farkı

Aracın şarj edilme yöntemi ve kullanım şartlarının farklılık göstermesi bataryanın farklı oranlarda eskimesine neden olur. Bu yüzden araç içerisinde sunulan standart şarj edilme sayısı bataryanın ömrü hakkında doğru bilgi vermez. Bataryanın yüksek akım değerlerinde şarj-deşarj edilmesi ve farklı ortam koşullarında kullanımı bataryanın ömrünü etkileyen en önemli etmenlerdir. Bu bağlamda geliştirilen model ile EA kullanıcılarının batarya ömrü hakkında doğru bilgi alması sağlanmıştır.

### 6.3. Batarya Depolamalı Sistemin Testi

Faydalı frenlemenin batarya üzerinde oluşturacağı etkileri incelemek için Bölüm 5'te simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarından elde edilen EA verileri bu bölümde bataryaya uygulanarak değişimin gerçek sonuçlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde de batarya yaşlandırma testinde olduğu gibi Metrohm Vionic cihazı kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yedi farklı sürüş çevrimi yapılarak batarya davranışları test edilmiştir. -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C,

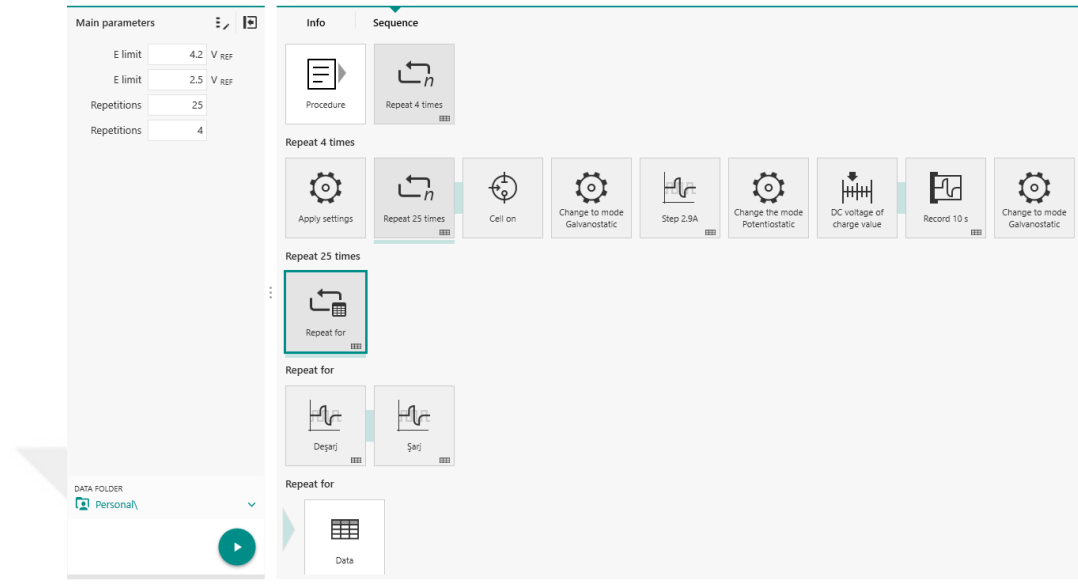
30 °C, 40 °C ve 50 °C sıcaklıklarda sürüş esnasında EA'tan çekilen akım ve faydalı frenleme ile depolanan akım değerleri Metrohm Vionic cihazı ile bataryaya uygulanmıştır. Bataryanın bu ortam sıcaklıklarına maruz kalması için ısıtma ve soğutma özellikli sirkülasyon banyosu kullanılmıştır. Böylece istenilen sıcaklık değerinin bataryaya homojen bir şekilde uygulanması sağlanmıştır. Şekil 6.14'te batarya depolamalı ve hibrit depolamalı sistemlerin testinin gerçekleştirildiği deney düzeneği ortamı verilmiştir.



**Şekil 6.14.** Batarya depolamalı sistemin deney düzeneği

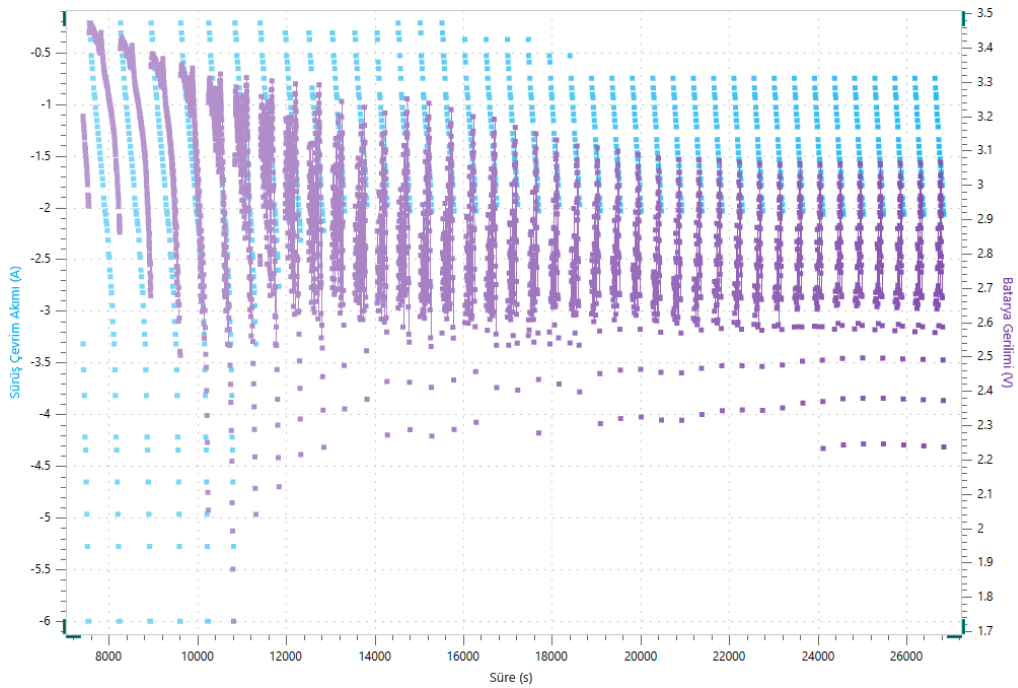
Intello yazılımında deneyin prosedürü oluşturulmuş ve Siemens Simcenter Flomaster programında elde edilen veriler prosedüre tanımlanmıştır. Prosedür toplam 700 sürüş çevrim döngüsünden oluşmaktadır. Her 100 çevrim döngüsünde ortam sıcaklığı yeniden ayarlanmıştır. Simülasyon programından elde edilen bu değerler programa tanımlanarak test işlemi başlatılmıştır. Prosedür de ilk aşama EA'ın sürüş çevrimine başladığı deşarj durumudur. Daha sonra sürüş çevriminde oluşan faydalı frenleme akımları bataryaya şarj akımı olarak uygulanır. Test aşamasında bataryadan 2.5V ve altında iki defa örnek alınması durumunda prosedürde bir sonraki adıma otomatik olarak geçilir ve batarya 1C oranında 4,2V'a kadar şarj edilerek yeniden test aşamasına hazır hale gelir. Ardından test aşaması kaldığı yerden devam ederek ilk 100 çevrim tamamlanır.

Benzer aşamalar diğer ortam sıcaklıklarında da uygulanmıştır. Şekil 6.15'te batarya ve hibrit depolamalı sistemin test prosedürü verilmiştir.

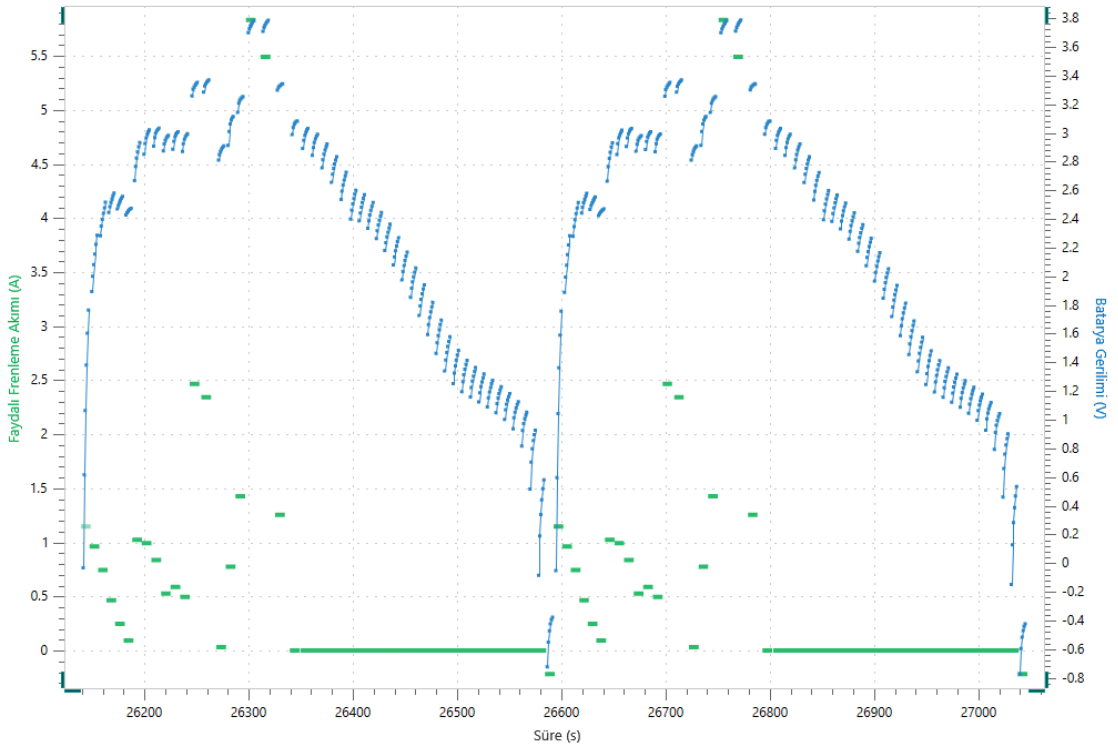


Şekil 6.15. Batarya ve hibrit depolamalı sistemin test prosedürü

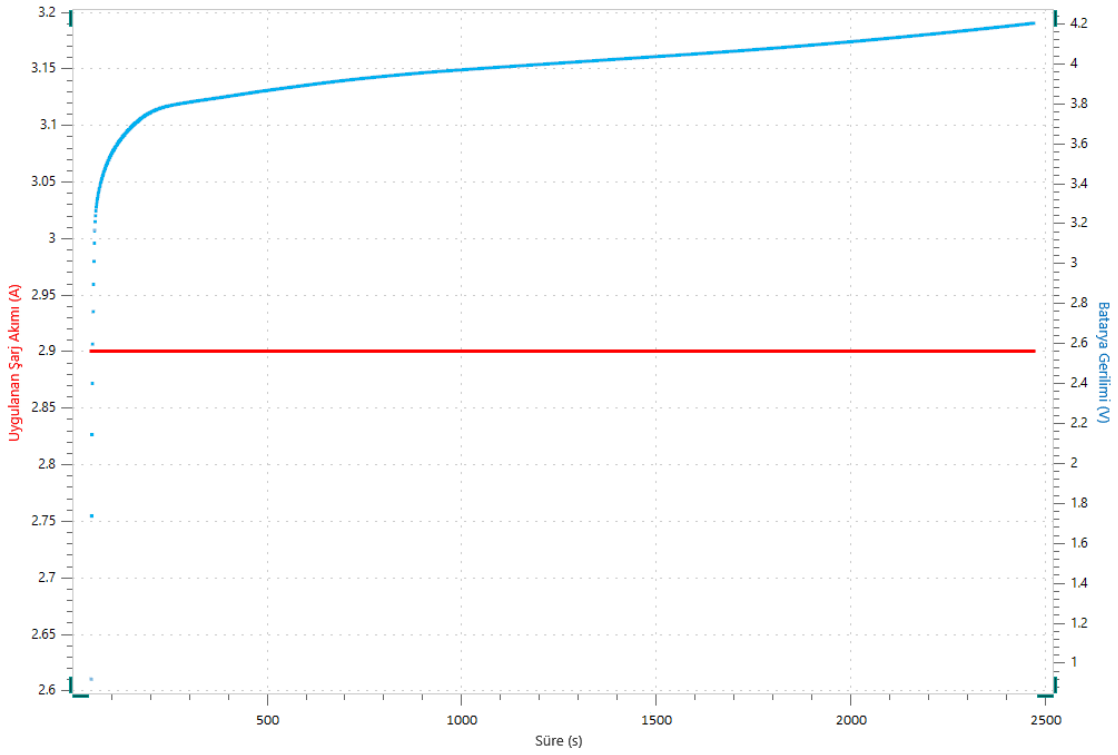
Metrohm Vionic cihazında bataryanın sürüş çevrimi esnasında akım-gerilim değişimi (Şekil 6.16 ve 6.17'de) ve  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen testin sonundaki bataryanın şarj grafiği (Şekil 6.18) verilmiştir.



Şekil 6.16. EA bataryasının sürüş esnasındaki akım ve gerilimi



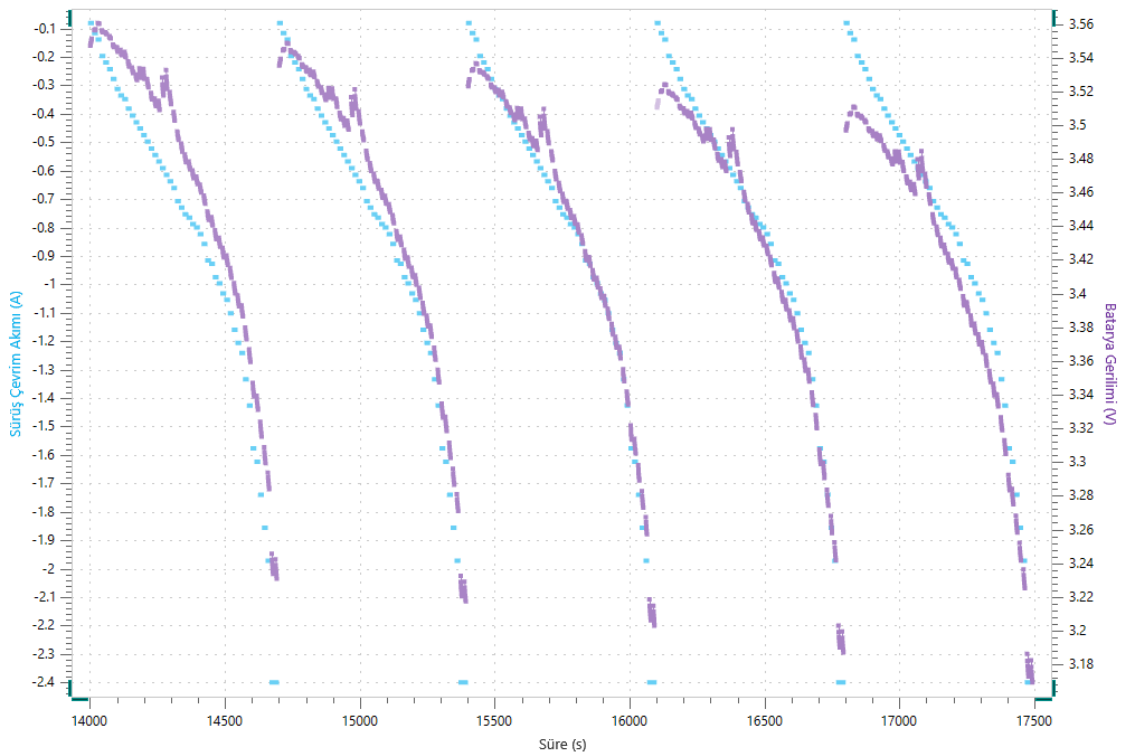
Şekil 6.17. EA bataryasına depolanan faydalı frenleme enerjisinin akım değerleri



Şekil 6.18. Batarya depolamalı EA'nın 100. çevrim sonunda batarya şarj grafiği

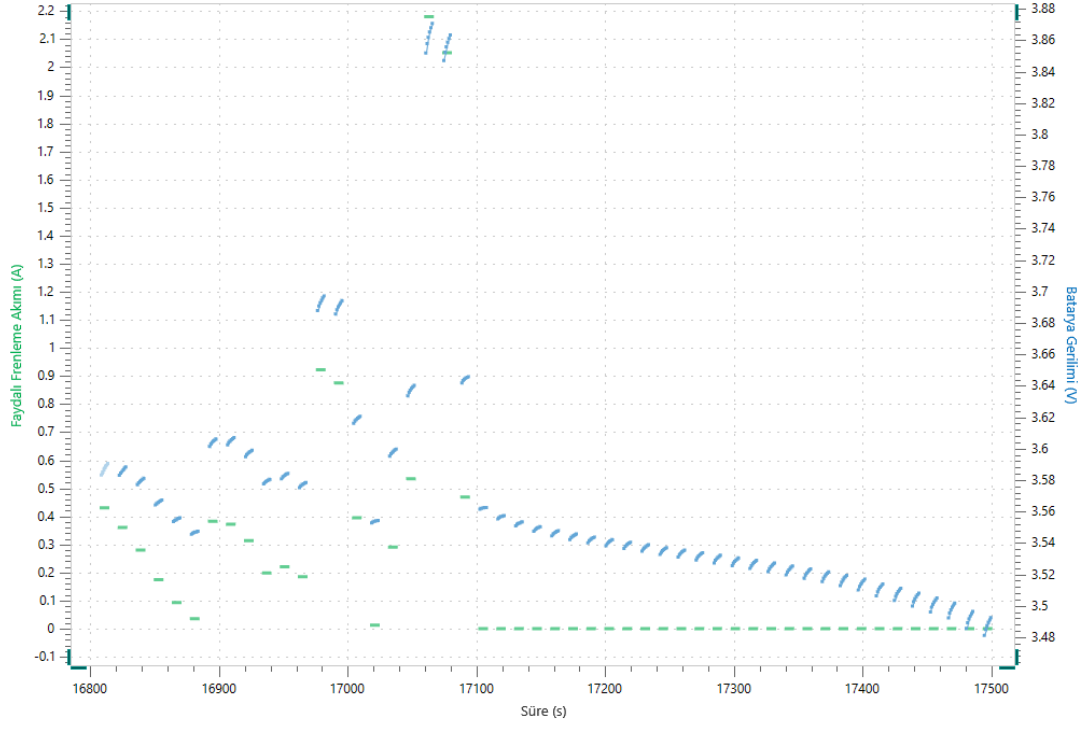
#### 6.4. Hibrit Depolamalı Sistemin Testi

Hibrit depolamalı sistemde de aynı deney düzeneği ve aynı prosedür kullanılmıştır. Bu aşamada bulanık mantık kontrolcüsü ile tasarlanan hibrit depolamalı sistemin simülasyon verileri Intello yazılımına girilmiştir. Deneyin devamındaki aşamalar, batarya depolamalı sistem ile kıyaslamak amacıyla benzer şekilde sürdürülmüştür. Hibrit depolamalı sistemde bataryanın  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sürüş çevrimi esnasında akım-gerilim değişimi (Şekil 6.19 ve 6.20'de) ve gerçekleştirilen testin sonundaki bataryanın şarj grafiği (Şekil 6.21) verilmiştir.

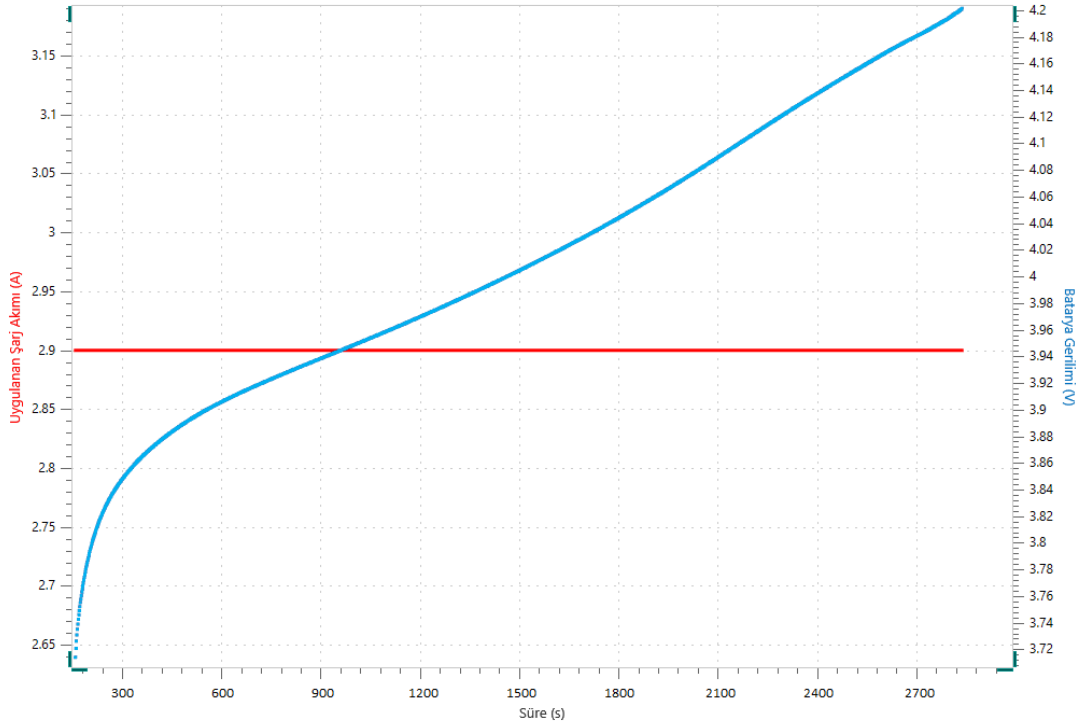


Şekil 6.19. Hibrit depolamalı EA bataryasının sürüş esnasındaki akım ve gerilimi

Şekil 6.19 ve 6.20 incelediğinde tasarlanan bulanık mantık kontrollü hibrit depolamalı EA'nın hem sürüş esnasında bataryadan çekilen akım değerleri hem de faydalı frenlemeden gelen enerjinin bataryaya depolanması esnasındaki akım değerleri batarya depolamalı sisteme kıyasla azalmıştır.

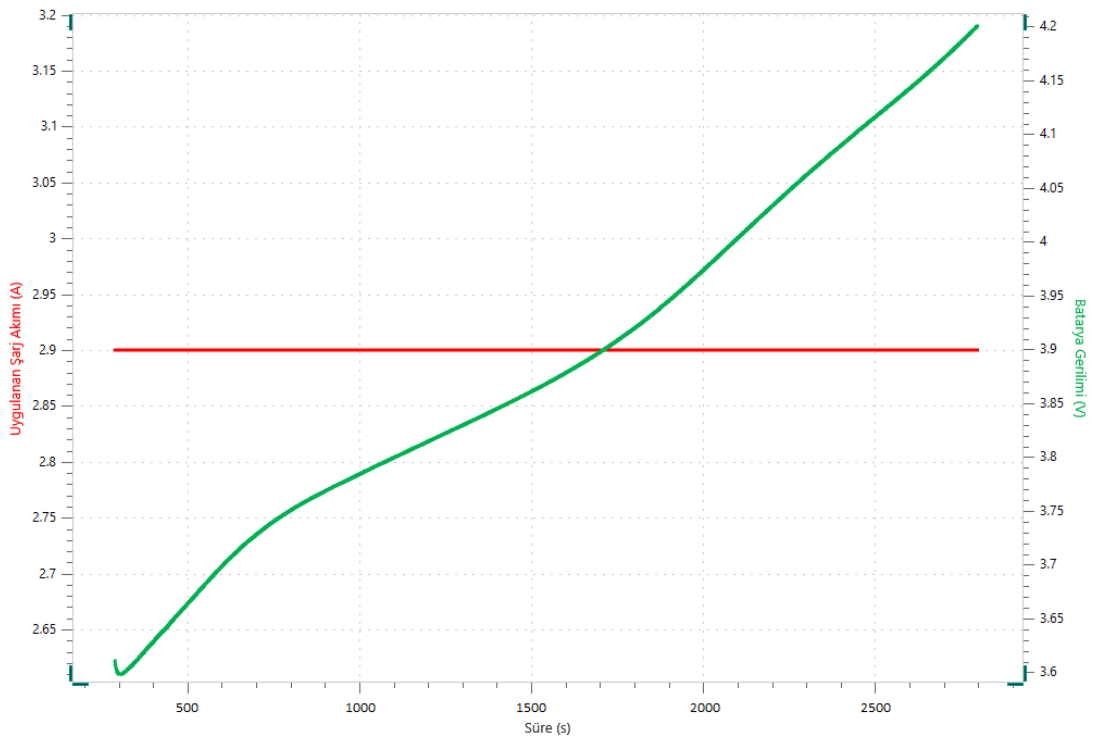


Şekil 6.20. Hibrit depolamalı EA bataryasına depolanan faydalı frenleme enerjisinin akım değerleri

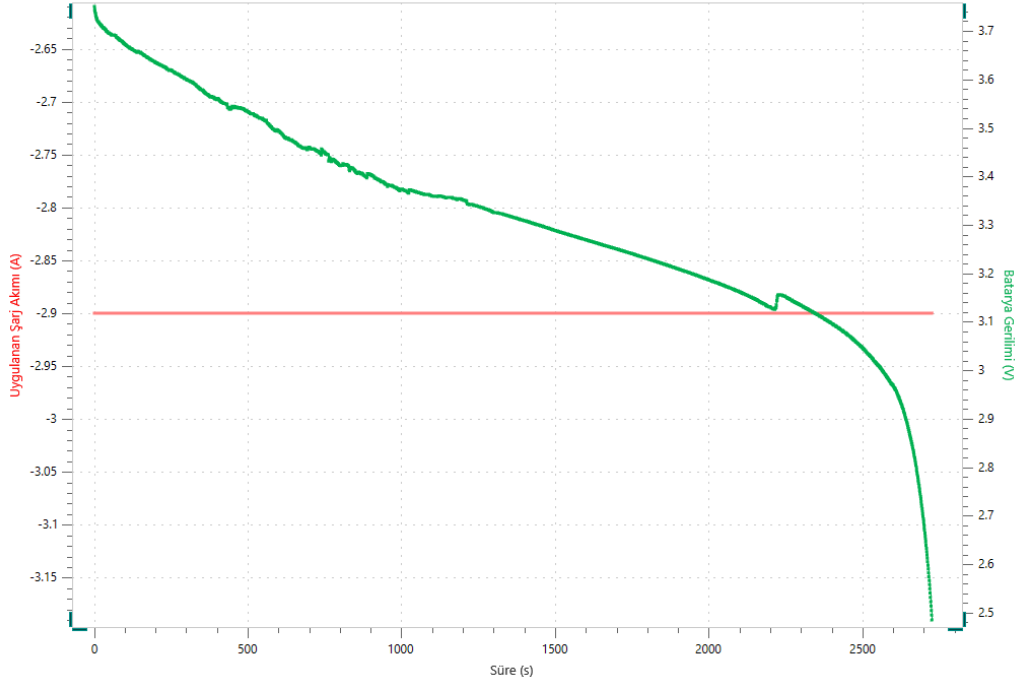


Şekil 6.21. Hibrit depolamalı EA'nın 100. çevrim sonunda batarya şarj grafiği

DeneySEL testleri tamamlanan batarya depolamalı ve hibrit depolamalı sistemlerin karşılaştırması kapasite deneyleri ile yapılmıştır. Bataryalara Şekil 6.6'daki prosedür uygulanmış ve son durumda kapasiteleri hesaplanmıştır. Batarya depolamalı sistemde Li-iyon bataryanın kapasitesi 2414 mAh iken hibrit depolamalı sistemdeki Li-iyon bataryanın kapasitesi 2491 mAh olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan hibrit depolamalı sistem sayesinde batarya kapasitesi %3,09 oranında iyileştirilmiştir. Bu sayede EA kullanıcılarının uzun vadede daha az sıklıkla şarj etme ihtiyacı oluşacak ve batarya daha kararlı performansta çalışacaktır. Bunun yanı sıra batarya sağlığında yaşanan bu iyileşme düzenli bakım ve servis maliyetlerini azaltacaktır. Tasarlanan sistemin avantajı daha net görebilmek için yapılan batarya yaşlandırma testinde 2414 mAh kapasite bataryanın 490. çevriminde elde edilirken 2491 mAh kapasite 387. çevriminde elde edilmiştir. Bu durumda hibrit depolamalı sistem kullanıcılara 103 çevrim daha uzun kullanım ömrü sunmaktadır. EA'ta 500 çevrim döngüsü sonunda batarya kapasitesinin %83,23'ü kullanılabilir duruma gelmiştir. Bu durumda bulanık mantık kontrollü hibrit depolamalı sistem ortalama 500 çevrim döngüsüne sahip EA bataryaları için %20 oranında daha uzun kullanım ömrü sunmaktadır. Şekil 6.22 ve 6.23'te batarya depolamalı sistem testinin sonunda bataryanın şarj ve deşarj grafiğini gösterilmektedir.

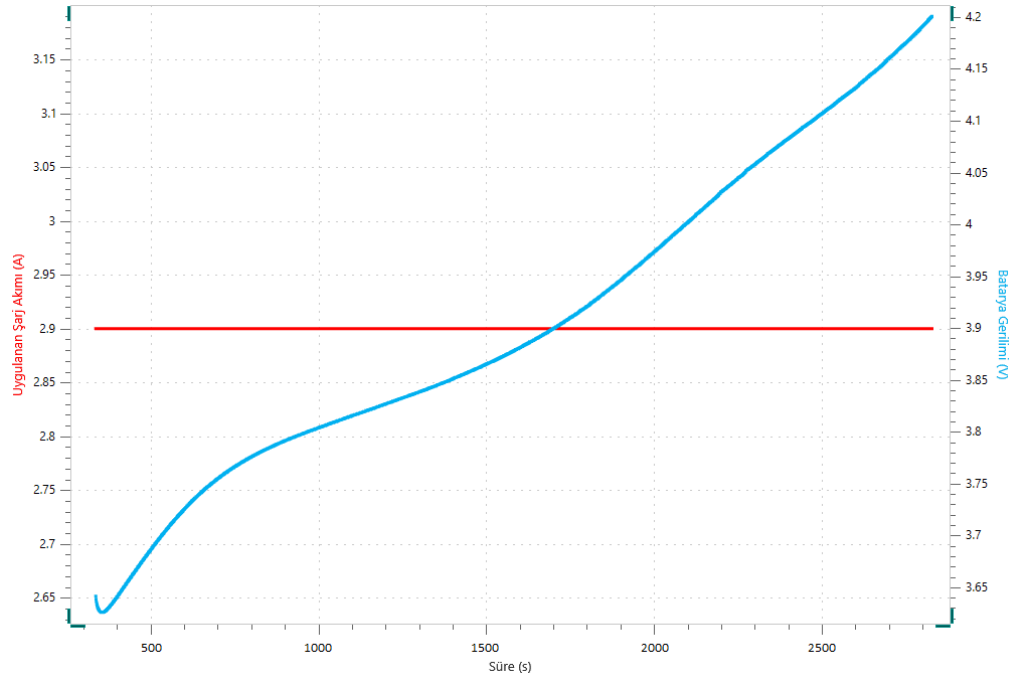


Şekil 6.22. Batarya depolamalı sistem testinin sonundaki şarj grafiği

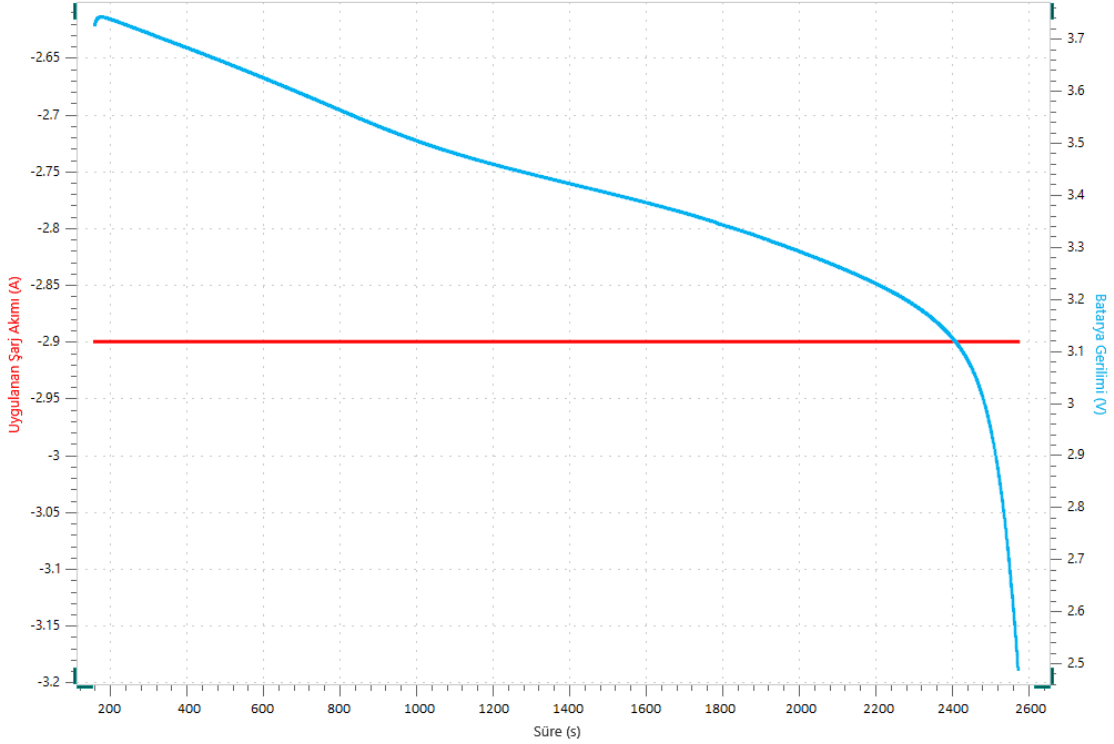


Şekil 6.23. Batarya depolamalı sistem testinin sonundaki deşarj grafiği

Hibrit depolamalı sistem testinin sonunda da batarya depolamalı sistem için uygulanan aynı prosedür uygulanmıştır. Şekil 6.24 ve 6.25'te hibrit depolamalı sistem testinin sonunda bataryanın şarj ve deşarj grafiğini gösterilmektedir.



Şekil 6.24. Hibrit depolamalı sistem testinin sonundaki şarj grafiği



Şekil 6.25. Hibrit depolamalı sistem testinin sonundaki deşarj grafiği

Batarya depolamalı ve hibrit depolamalı sistem arasındaki farklılık yalnızca batarya kapasitesinde olmamıştır. Batarya depolamalı sistemde, yüksek akım değerleriyle faydalı frenleme enerjisinin depolanması ve ani güç talepleri nedeniyle bataryadan yüksek akım çekilmesi, bataryadaki bozulma sürecini hızlandırmıştır. Şekil 6.23 incelendiğinde batarya depolamalı sistemde deşarj işleminin düzensiz olduğu görülmektedir. Gerilim ve akım değişim grafiğinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu dalgalanmalar bataryada meydana gelen kimyasal değişimlerden kaynaklanmakta ve bataryada korozyona yol açarak bataryanın veriminde azalmalara sebep olmaktadır. Bulanık mantık kontrollü hibrit depolamalı sistem ile bu durumun önüne geçilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde deşarj işleminin daha kararlı olarak tamamlandığı görülmektedir. Bu durumda tasarlanan sistem hem kapasite kaybında iyileşme sağlanmış hem de batarya deşarjında oluşan dalgalanmalar önlenmiştir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Artan çevresel kaygılar ve pazar talebi nedeniyle EA'ların popülaritesinde belirgin bir artış olmuştur. Ancak, elektrokimyasal enerji depolama sistemleri henüz yakıt bazlı araçlarla rekabet edememektedir. Bunun ana nedenlerinden biri, enerji depolama sistemlerinin yeniden tasarlanmasını gerektiren batarya sistemlerinin sınırlı ömrüdür. Bu bağlamda hibrit depolama sistemindeki, süperkapasitörler bataryalar için bir çözüm sunmaktadır. Ancak batarya/süperkapasitör sistemlerinin kurulumu, iki farklı elektrokimyasal güç kaynağının entegrasyonundan daha karmaşıktır. Her bir elektrokimyasal hücrenin şarj veya deşarj zamanlaması, dikkatle yönetilmesi gereken önemli bir faktördür. Bu tez çalışmasında, EA'larda kullanılan faydalı frenleme sisteminin olumsuz etkilerini azaltmak için batarya/süperkapasitör sistemlerinin tasarımı yapılarak batarya sağlığının iyileştirilmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaca uygun olarak, bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak farklı sıcaklıklarda, SoC'lerde ve akımlarda bataryanın performansı değerlendirilerek bir enerji depolama sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan model öncelikli ADVISOR ve Siemens Simcenter Flomaster simülasyon programlarında test edilmiştir. Ardından laboratuvar ortamında Metrohm Vionic cihazında sürüş kontrol sistemi tasarlanarak batarya testleri yapılmıştır. Bu bölümde tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların bilimsel sonuçlar ışığında, bu çalışmanın ticari katkıları irdelenmiştir. Ayrıca bu tez çalışması temel referans alınarak gelecekte yapılabilecek çalışmalara ışık tutabilecek önerilerde bulunulmuştur.

### 7.1. Bilimsel Sonuçlar ve Ticari Katkılar

Bu tez çalışmasında tasarlanan hibrit depolamalı sistem, faydalı frenleme esnasında EA performansını desteklemede, aynı zamanda bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlamada ve enerji kullanımını optimize etmede dikkate değer katkılar sağlamıştır. Hem ADVISOR hem de Siemens Simcenter Flomaster programları kullanılarak simüle edilen NEDC sürüş döngülerinde hibrit depolamalı sistem, batarya kapasite kaybında önemli azalmalar göstermiştir. Faydalı frenleme esnasında kullanılan hibrit depolama sisteminde, ADVISOR programında batarya depolama sisteminin %15,64'lük batarya kaybına kıyasla %7,28'lik ve Siemens Simcenter Flomaster programında bataryanın %5,02'lik kaybına kıyasla %4,15'lik kayda değer SoC

iyileştirmesi görülmüştür. Batarya kapasitesinin daha az kullanımı sağlanarak batarya ömrünün uzamasına pozitif katkı sağlanmıştır. Ayrıca hibrit depolama sistemi, batarya üzerindeki akım değerlerinin ADVISOR programında %29,1 ve Siemens Simcenter Flomaster programında %28,7 oranında azaltılması sağlamıştır. Bu azalmalar, batarya üzerindeki yüksek akım streslerini etkili bir şekilde hafifletmiştir. Ayrıca Siemens Simcenter Flomaster programında yapılan testler ortalama batarya kullanım oranında %21,3'lük önemli bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda sıcaklık değişimleri de önemli bir rol oynamış ve NEDC sürüş döngüsü sırasında hibrit depolama sistemi, bataryanın ısı üretiminde %46,84'lük kayda değer bir azalma göstermiştir. Hibrit depolamalı sistem, sıcaklık artışlarını önleyerek iç dirençteki artışı azaltarak etkili bir koruyucu rol oynamış ve böylece bataryanın ömrüne ve sağlığına olumlu katkıda bulunmuştur.

Simülasyon testlerinin ardından bataryada sağlanan iyileştirmeleri belirlemek için laboratuvar testleri yapılmıştır. Faydalı frenleme esnasında hibrit depolamalı sistemin batarya üzerinde yaptığı iyileştirmeleri daha net olarak ortaya çıkarmak için öncelikle batarya yaşlandırma testi yapılmıştır. Aspilsan marka 18650 silindirik Li-iyon (NMC) batarya 25 °C'de 1C oranında 500 çevrim şarj ve deşarj edilerek yaşlandırma testine tâbi tutulmuştur. Yaşlandırma testi sonucunda bataryanın kapasitesi %16,77'lik kayıp ile 2402 mAh olmuştur. Ardından batarya sağlığı için Metrohm Vionic cihazında NEDC sürüş çevrimi modeli ile deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneğinde NEDC sürüş çevrimini farklı ortam sıcaklığında test etmek için ısıtma ve soğutma özellikli sirkülasyon banyosu kullanılmıştır. Hem batarya depolamalı sistemde hem de hibrit depolamalı sistemde yedi farklı sıcaklık değerinde gerçekleştirilen testler sonucunda batarya kapasite ölçümleri yapılmıştır. Batarya depolamalı bir sistemde, 2414 mAh kapasiteye sahip olan Li-iyon bataryanın hibrit depolamalı sistemdeki kapasitesi 2491 mAh olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan hibrit depolamalı sistem sayesinde batarya kapasitesinde %3,09 oranında bir iyileşme sağlanmış olduğu görülmüştür. Bu iyileşme, EA kullanıcılarının bataryalarını uzun vadede daha seyrek şarj etmelerini sağlayarak, bataryanın daha kararlı bir performans sergilemesine olanak tanıyacaktır. Ayrıca, batarya sağlığındaki bu iyileşme, düzenli bakım ve servis maliyetlerini de azaltacaktır. Tasarlanan sistemin avantajlarını daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla yapılan batarya yaşlandırma testinde, 2414 mAh kapasiteli batarya 490. çevrimde %83,61 oranında kapasitesini korurken, 2491 mAh kapasiteli batarya ise 387. çevrimde aynı kapasiteyi

elde etmiştir. Bu durum, hibrit depolamalı sistemin kullanıcılara 103 çevrim daha uzun bir kullanım ömrü sunduğunu göstermektedir. Böylece hibrit depolamalı bir EA bataryasının 30.000 km daha fazla kullanılabilir olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, hibrit depolamalı sistemin kullanılması, batarya kapasitesinde ve performansında belirgin bir iyileşme sağlayarak, kullanıcıların batarya ömrünü uzatmakta ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır.

Aracın şarj edilme yöntemi ve kullanım koşullarının farklılık göstermesi, bataryanın çeşitli oranlarda eskimesine neden olmaktadır. Bu nedenle, araç içerisinde sunulan standart şarj edilme sayısı, bataryanın ömrü hakkında kesin bilgi sağlamamaktadır. Bataryanın yüksek akım değerlerinde şarj ve deşarj edilmesi ile farklı çevresel koşullarda kullanımı, bataryanın ömrünü etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen model, EA kullanıcılarının batarya ömrü hakkında daha doğru ve güvenilir bilgi edinmelerini sağlamaktadır. Modelin temel amacı, bataryanın şarj ve deşarj işlemlerinde maruz kaldığı akım değerleri ile çevresel koşulları dikkate alarak, bataryanın ömrünü daha doğru bir şekilde tahmin etmektir. En iyi doğruluk tahmin sonucunun alındığı “Exponential GPR” algoritması sayesinde, kullanıcılar bataryalarının mevcut durumu ve beklenen ömrü hakkında ayrıntılı bilgiye sahip olabilecek, böylece batarya sağlığına yönelik daha bilinçli kararlar alabileceklerdir. Sadece bir şarj ve deşarj döngüsü ile modelden elde edilen veriler, EA üreticileri için de önemli bir kaynak teşkil etmekte olup, batarya performansını optimize etme ve ürün geliştirme süreçlerine katkıda bulunacaktır.

Bu tez çalışması batarya sağlığını iyileştirerek EA kullanıcıları için önemli maliyet avantajları sağlar. Batarya ömrünün uzaması, batarya bakım masraflarını azaltır ve batarya değiştirme süresini uzatır. Ayrıca, bataryaların daha uzun süre optimum performansta çalışabilmesi, araçların genel performansını ve güvenilirliğini artırır. Bu durum, kullanıcı memnuniyetini artırarak EA’ların tercih edilme oranını artırır. Daha uzun ömürlü bataryalar, araçların ikinci el değerini artırır ve bu da tüketiciler için EA’ları daha tercih edilebilir hale getirir. Üreticiler için ise bu teknolojik ilerlemeler EA’ların rekabet gücünü artırarak pazar payını genişletme fırsatı sunar.

Batarya üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması EA’ların çevresel sürdürülebilirliğine de önemli katkılarda bulunur. Daha uzun ömürlü bataryalar, daha az

atık üretilmesine ve çevreye daha az zarar verilmesine yardımcı olur. Faydalı frenlemenin bulanık mantık denetleyicisi ile depolanması enerji verimliliğini artırır. Böylece, EA'ların menzili artar ve kullanıcıların şarj ihtiyaçları azalır. Ayrıca, tez çalışmasında ele alınan yöntem, EA'ların güvenilirliğini ve kullanıcı deneyimini artırarak sektördeki inovasyon kapasitesini güçlendirecektir. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında elde edilen bilimsel sonuçlar, ticari üreticilere yol gösterici nitelikte önemli veriler sunmaktadır.

## 7.2. Araştırmacılara Yönelik Öneriler

Bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılar gelecekte batarya sağlığını iyileştirmek için batarya çevrim döngüsüne bağlı olarak şarj ve deşarj esnasında maksimum ve minimum SoC değerlerini optimize eden bir çalışma yapabilir. Batarya sağlığını iyileştirmenin bir diğer yöntemi ise güç sistemi ve motordaki verimin artırılmasıdır. Bu bağlamda çok branşlı bir çalışma geliştirilerek batarya sağlığı daha da iyileştirilmesi sağlanabilir.

Enerji depolama ve dağıtım teknolojileri de önemli bir araştırma alanıdır. Süperkapasitörlerin bataryalarla birlikte kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemleri, faydalı frenleme sırasında bataryalara gelen yüksek akım değerlerini azaltırlar. Bu tez çalışmasında kullanılan süperkapasitörlerin kapasitesinin artırılması hem maliyet hem de ağırlık olarak dezavantaj oluşturmaktadır. Bundan dolayı gelecek çalışmalar, yeni enerji depolama sistemleri üzerine kimyasal çözümler araştırılarak batarya ve süperkapasitörlerin ağırlığı azaltılabilir ve enerji yoğunluğu artırılabilir. Gelecekteki çalışmalar, bu hibrit sistemlerin verimliliğini artırmak ve entegrasyonunu kolaylaştırmak üzerine yoğunlaşmalıdır.

Gelişmiş frenleme algoritmaları, faydalı frenleme sistemlerinin performansını artırmak için kritik bir rol oynar. Adaptif frenleme algoritmaları, araç ve yol koşullarına göre frenleme kuvvetini dinamik olarak ayarlayarak enerji geri kazanımını optimize edebilir. Yapay zeka teknikleri ile gelişmiş kontrol stratejileri oluşturularak, faydalı frenleme ve enerji yönetimini daha da verimli hale getirebilir. Böylece, bu alanda yapılacak araştırmalar sayesinde, faydalı frenlemeden elde edilen enerjinin verimliliğinin artması ve batarya sağlığının korunmasına pozitif katkı sağlayabilir.

Son olarak bu tez çalışması yalnızca bilimsel bulgular sunmakla kalmayıp, aynı zamanda araştırmacılar için de önemli bir yol gösterici niteliği taşımaktadır. EA'lar için motor, lastik, kütle ve araca özgü diğer parametreler üzerinde yapılacak iyileştirmelerin, araç performansı üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik genel çerçeve sunulmuştur. Bu bağlamda, EA üzerindeki değişikliklerin olası sonuçları ve aracın verimliliği üzerindeki pozitif etkileri öngörmek mümkün olabilir. Bu tez çalışması ışığında, araştırmacılar araç parametrelerini optimize ederek, daha uzun menzilli, verimli ve sürdürülebilir EA'lar geliştirme sürecine katkıda bulunabilirler. Böylece araştırmacılar EA'ların günlük yaşamda daha yaygın kullanımını teşvik ederek, mevcut taşıtların çevreye bıraktığı sera gazı emisyonlarını azaltmaya ve daha çevreci, yeşil taşıtların üretilmesine de katkı sağlayabilirler.



## KAYNAKLAR

- Abbasi, A., Xu, Y., Khezri, R., Etesami, M., Lin, C., Kheawhom, S., & Lu, Y., 2022, Advances in characteristics improvement of polymeric membranes/separators for zinc-air batteries. *Materials Today Sustainability*, 18, 100126.
- Alaee, P., Bems, J., & Anvari-Moghaddam, A., 2023, A Review of the Latest Trends in Technical and Economic Aspects of EV Charging Management. *Energies*, 16(9), 3669.
- Alonso, J. M., Castiello, C., & Mencar, C., 2015, Interpretability of fuzzy systems: Current research trends and prospects. Springer handbook of computational intelligence, 219-237.
- Altas, I. H., 2017, Fuzzy Logic Control in Energy Systems with design applications in MATLAB (R)/Simulink (R). Institution of Engineering and Technology.
- Alvarado, J., Schroeder, M. A., Zhang, M., Borodin, O., Gobrogge, E., Olguin, M., Ding, M. S., Gobet, M., Greenbaum, S., Meng, Y. S., & Xu, K., 2018, A carbonate-free, sulfone-based electrolyte for high-voltage Li-ion batteries. *Materials Today*, 21(4), 341–353.
- Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V., 2017, A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430.
- Angundjaja, C. Y., Wang, Y., & Jiang, W., 2021, Power Management for Connected EVs Using a Fuzzy Logic Controller and Artificial Neural Network. *Applied Sciences*, 12(1), 52.
- Armenta-Déu, C., & Boucheix, B., 2023, Evaluation of lithium-ion battery performance under variable climatic conditions: Influence on the driving range of electric vehicles. *Future Transportation*, 3(2), 535–551.
- Aslam, M. K., Niu, Y., Hussain, T., Tabassum, H., Tang, W., Xu, M., & Ahuja, R., 2021, How to avoid dendrite formation in metal batteries: Innovative strategies for dendrite suppression. *Nano Energy*, 86, 106142.
- Aspilsan, ASPİLSAN INR18650A28 Lityum İyon Şarj Edilebilir Hücre, <https://www.aspilsan.com/cozumler/uretimini-yaptigimiz-sarj-edilebilir-lityum-iyon-pil/inr18650a28/> [Ziyaret Tarihi: 25 Haziran 2024].
- Ayob, A., Ansari, S., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Saad, M. H. M., 2022, SOC, SOH and RUL Estimation for Supercapacitor Management System: Methods, Implementation Factors, Limitations and Future Research Improvements. *Batteries*, 8(10), 189.

- Beaume, R., & Midler, C., 2009, From technology competition to reinventing individual ecomobility: new design strategies for electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 9(2), 174-190.
- Bělohávek, R., Dauben, J. W., & Klir, G. J., 2017, Fuzzy logic and mathematics: a historical perspective. Oxford University Press.
- Bergveld, H. J., 2001, Battery management systems: Design by modelling.
- Bhattacharyya, R., & Mukherjee, S., 2020, Fuzzy membership function evaluation by non-linear regression: An algorithmic approach. *Fuzzy information and engineering*, 12(4), 412-434.
- Biçer, E., Mazman, Muhsin., Kaypmaz, Cem., & Uzun, D., 2021, Li-iyon Piller ve Uygulamaları, Nobel Yayınları, Ankara.
- Boopathi, S., & Kanike, U. K., 2023, Applications of Artificial Intelligent and Machine Learning Techniques in Image Processing. In *Handbook of Research on Thrust Technologies Effect on Image Processing*, IGI Global, 151-173.
- Buriboev, A., & Muminov, A., 2022, Computer state evaluation using adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(23), 9502.
- Cannarella, J., Liu, X., Leng, C. Z., Sinko, P. D., Gor, G. Y., & Arnold, C. B., 2014, Mechanical properties of a battery separator under compression and tension. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(11), F3117–F3122.
- Chan, C. C., & Chau, K. T., 2001, Modern electric vehicle technology. Oxford University Press.
- Chen, L., & Shaw, L. L., 2014, Recent advances in lithium–sulfur batteries. *Journal of Power Sources*, 267, 770-783.
- Chen, T., & Dai, L., 2013, Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors. *Materials Today*, 16(7-8), 272-280.
- Cheng Zhang, Y. I., Wei, L., Shen, X., & Liang, H., 2009, Study of supercapacitor in the application of power electronics. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, (6), 508-517.
- Cheng, H., Shapter, J. G., Li, Y., & Gao, G., 2021, Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 57, 451–468.
- Choi, S. S., & Lim, H. S., 2002, Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO<sub>2</sub>. *Journal of Power Sources*, 111(1), 130-136.
- Chombo, P. V., & Laonual, Y., 2020, A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649.

- Chrenko, D., Fernandez Montejano, M., Vaidya, S., & Tabusse, R., 2022, Aging study of in-use lithium-ion battery packs to predict end of life using black box model. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(13), 6557.
- Costa, C. M., Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Castro, H., Campo, F. J. D., & Lanceros-Méndez, S., 2021, Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials*, 37, 433–465.
- Cui, G., 2020, Reasonable design of high-energy-density solid-state lithium-metal batteries. *Matter*, 2(4), 805-815.
- Çelikyılmaz, A., & Turkşen, I. B., 2009, Modeling uncertainty with fuzzy logic. *Studies in fuzziness and soft computing*, 240(1), 149-215.
- Çetin, M.S., Güler H., & Gençoğlu, M. T., 2021, Fuzzy Logic Based Battery Control System Design for Electric Vehicles, *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 1-4, Elazig, Turkey.
- Danuta, H., & Juliusz, U., 1962, Electric dry cells and storage batteries. In U.S. Patent (No. 3043896).
- Das, R., Sen, S., & Maulik, U., 2020, A survey on fuzzy deep neural networks. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(3), 1-25.
- de Campos Souza, P. V., 2020, Fuzzy neural networks and neuro-fuzzy networks: A review the main techniques and applications used in the literature. *Applied soft computing*, 92, 106275.
- DeMers, S.M., 2008, Mechanical and Regenerative Braking Integration for a Hybrid Electric Vehicle, Master of Thesis, *University of Waterloo*, Waterloo, Ontario, Canada, 14-38.
- Demir, A., 2022, Paris Anlaşması ve 26. Taraflar Konferansı (COP 26)'nda Türkiye Değerlendirmesi: Yükümlülükler ve Sorumluluklar. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, 15 (2) , 162-170.
- Denai, M. A., Palis, F., & Zeghib, A., 2004, ANFIS based modelling and control of non-linear systems: a tutorial. In *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE*, 3433-3438.
- Deng, D., 2015, Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418.
- Di Luca, G., Di Blasio, G., Gimelli, A., & Misul, D. A., 2023, Review on battery state estimation and management solutions for next-generation connected vehicles. *Energies*, 17(1), 202.
- DiLeo, R. A., Castiglia, A., Ganter, M. J., Rogers, R. E., Cress, C. D., Raffaele, R. P., & Landi, B. J., 2010, Enhanced capacity and rate capability of carbon nanotube based anodes with titanium contacts for lithium ion batteries. *Acs Nano*, 4(10), 6121-6131.

- Doughty, D. H., & Roth, E. P., 2012, A general discussion of Li ion battery safety. *The Electrochemical Society Interface*, 21(2), 37–44.
- Dubois, D., & Prade, H., 1980, Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy sets and systems*, 3(1), 37-48.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A., 2004, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*. CRC Press.
- Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T., 2021, State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 109(6), 967–984.
- El Marghichi, M., Loulijat, A., Dangoury, S., Chojaa, H., Abdelaziz, A. Y., Mossa, M. A., Hong, J., & Geem, Z. W., 2023, Enhancing battery capacity estimation accuracy using the bald eagle search algorithm. *Energy Reports*, 10, 2710–2724.
- Etacheri, V., Marom, R., Elazari, R., Salitra, G., & Aurbach, D., 2011, Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3243-3262.
- Fabiyi, S. D., 2019, A review of unsupervised artificial neural networks with applications. *International Journal of Computer Applications*, 181(40), 22-26.
- Finegan, D. P., 2016, X-ray imaging of failure and degradation mechanisms of lithium-ion batteries UCL (University College London).
- Furukawa, N., 1994, Development and commercialization of nickel-metal hydride secondary batteries. *Journal of power sources*, 51(1-2), 45-59.
- Gao, Y., & Ehsani, M., 2002, Investigation of battery technologies for the army's hybrid vehicle application. *Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference*, 3 (1), 1505-1509, IEEE.
- Gao, Y., Moghbelli, H., Ehsani, M., Frazier, G., Kajs, J., & Bayne, S., 2003, Investigation of high-energy and high-power hybrid energy storage systems for military vehicle application. *SAE transactions*, 1843-1850.
- Genta, G., 2004, *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*. World Scientific, Warrendale, Pennsylvania.
- Golebiewski, W., & Lisowski, M., 2018, Theoretical analysis of electric vehicle energy consumption according to different driving cycles. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 421, 022010.
- González-Gil, A., Palacin, R., & Batty, P., 2013, Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy conversion and management*, 75, 374-388.

- Goodenough, J. B., & Park, K. S., 2013, The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167–1176.
- Goodenough, J. B., 2015, Energy storage materials: A perspective. *Energy Storage Materials*, 1, 158–161.
- Goodnight, N., & VanGelder, K., 2018, Automotive Braking Systems. Master Automotive Technician Series, Jones and Bartlett.
- Gökçe, C., 2015, Elektrikli yol taşıtlarında bulanık mantık tabanlı tam elektrikli frenlemenin geliştirilmesi ve uygulanması, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-56.
- Gökçe C., Üstün Ö., & Yeksan A.Y., 2013, Dynamics and Limits of Electrical Braking, *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'13)*, Bursa, Türkiye.
- Greibe, P., 2008, Determination of Braking Distance and Driver Behaviour Based on Braking Trials. In *Proceedings of the 87th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington DC.
- Gu, Y., 2023, Rational Design of Nanoelectrodes for Highly Efficient Lithium-Ion Batteries. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 29, 168-174.
- Gurz, M., Baltacıoğlu, E., Hames, Y., & Kaya, K., 2017, The meeting of hydrogen and automotive: a review. *International journal of hydrogen energy*, 42(36), 23334-23346.
- Halderman, J. D., & Martin, T., 2008, Hybrid and Alternative Fuel Vehicles. Pearson.
- Heisler, H., 1999, Vehicle and Engine Technology. Butterworth-Heinemann, Woburn, Massachusetts.
- Hu, J., Jiang, X., Jia, M., & Zheng, Y., 2018, Energy Management Strategy for the Hybrid Energy Storage System of Pure Electric Vehicle Considering Traffic Information. *Applied Sciences*, 8(8), 1266.
- Hua, X., Zeng, J., Li, H., Huang, J., Luo, M., Feng, X., Xiong, H., et al., 2023, A Review of Automobile Brake-by-Wire Control Technology. *Processes*, 11(4), 994. MDPI AG.
- Hussain, S., Ali, M. U., Park, G.-S., Nengroo, S. H., Khan, M. A., & Kim, H.-J., 2019, A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Management System for Battery–Supercapacitor Hybrid Electric Vehicles. *Energies*, 12(24), 4662.
- IEA – International Energy Agency, <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles> , [Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2024].
- Iancu, I., 2012, A Mamdani type fuzzy logic controller. *Fuzzy logic-controls, concepts, theories and applications*, 15(2), 325-350.

- Jang, J. S., 1996, Input selection for ANFIS learning. In Proceedings of IEEE 5th international fuzzy systems, IEEE, 1493-1499.
- Jiang, B., Zhang, X., Wang, Y., & Hu W., 2021, Regenerative Braking Control Strategy of Electric Vehicles Based on Braking Stability Requirements. *Int.J Automot. Technol.* 22, 465–473.
- Jin, L., Gupta, M. M., & Nikiforuk, P. N., 1996, On adaptive fuzzy systems with sinusoidal membership functions. *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1), 4983–4988.
- Jingang, G., Junping, W., & Binggang, C., 2009, Regenerative braking strategy for electric vehicles, *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 864-868, Xi'an, China.
- Kandel, A., & Lee, S. C., 1979, *Fuzzy Switching and Automata– Theory and Applications*, Crane Russak, New York.
- Kangkang, Z., Jianqiu, L., Minggao, O., Jing, G., & Yan, M., 2011, Electric braking performance analysis of PMSM for electric vehicle applications. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 5, 2596–2599.
- Karaboğa, D., & Kaya, E., 2019, Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, 52, 2263-2293.
- Kartal M.R., Çetin E., & Dalbadan F., 2016, Sürüş çevrimlerinin batarya tüketimi, emisyon ve batarya durumu faktörleri bazında karşılaştırılması. *8.Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, 1-10.
- Karahan, B. D., 2016, Engineering M-Si (M: Ag, Cu) thin films as negative electrodes for lithium ion batteries, *Doktora Tezi, İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul, 5-14.
- Khalid, A., Kashif, S. A. R., Ain, N. U., Awais, M., Ali Smieee, M., Carreño, J. E. M., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., & Khan, B., 2023, Comparison of Kalman filters for state estimation based on computational complexity of Li-ion cells. *Energies*, 16(6), 2710.
- Kim, C., Yang, K. S., Kojima, M., Yoshida, K., Kim, Y. J., Kim, Y. A., & Endo, M., 2006, Fabrication of electrospinning-derived carbon nanofiber webs for the anode material of lithium-ion secondary batteries. *Advanced Functional Materials*, 16(18), 2393-2397.
- Kosko, B., & Burgess, J. C., 1998, *Neural networks and fuzzy systems*.
- Kulkarni, S., & Honwadkar, K., 2016, Review on classification and clustering using fuzzy neural networks. *International Journal of Computer Applications*, 136(3), 18-23.
- Kupchyn, A., Komarov, V., Borokhvostov, I., Bilokur, M., Kuprinenko, A., Mishchenko, Y., Bohdanovych, V., & Kononov, O., 2022, Determining the accuracy for fuzzy

- logic technology foresight model. *Cybernetics and Systems Analysis*, 58(3), 382–391.
- Landi, B. J., Ganter, M. J., Cress, C. D., DiLeo, R. A., & Raffaele, R. P., 2009, Carbon nanotubes for lithium ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 2(6), 638–654.
- Lee, B.-S., 2020, A review of recent advancements in electrospun anode materials to improve rechargeable lithium battery performance. *Polymers*, 12(9), 2035.
- Lee, J. S., Tai Kim, S., Cao, R., Choi, N. S., Liu, M., Lee, K. T., & Cho, J., 2011, Metal–air batteries with high energy density: Li–air versus Zn–air. *Advanced Energy Materials*, 1(1), 34–50.
- Li, B., Wang, Y., Jiang, N., An, L., Song, J., Zuo, Y., & Xia, D., 2020, Electrolytic-anion-redox adsorption pseudocapacitance in nanosized lithium-free transition metal oxides as cathode materials for Li-ion batteries. *Nano Energy*, 72, 104727.
- Li, Z., Guo, D., Liu, Y., Wang, H., & Wang, L., 2020, Recent advances and challenges in biomass-derived porous carbon nanomaterials for supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 397, 125418.
- Liao, F., Molin, E., & van Wee, B., 2017, Consumer preferences for electric vehicles: a literature review. *Transport Reviews*, 37(3), 252–275.
- Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., & Sedlaříková, M., 2018 Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of energy storage*, 17, 224–227.
- Lin, C.-T., & Lu, Y.-C., 1996, A neural fuzzy system with fuzzy supervised learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics: A Publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, 26(5), 744–763.
- Lin, C.-T., 1995, A neural fuzzy control system with structure and parameter learning. *Fuzzy Sets and Systems. An International Journal in Information Science and Engineering*, 70(2–3), 183–212.
- Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Han, X., 2014, Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116, 1001–1010.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1–13.
- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S., 2017, Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2(4), 1–16.
- Martellucci, L., & Giannini, M., 2021, Regenerative braking experimental tests and results for formula student car. *Journal of Transportation Technologies*, 11(01), 78–89.

- Meng, X., Xu, Y., Cao, H., Lin, X., Ning, P., Zhang, Y., Garcia, Y. G., & Sun, Z., 2020, Internal failure of anode materials for lithium batteries — A critical review. *Green Energy & Environment*, 5(1), 22–36.
- Metrohm – Metrohm Vionic Analytical instruments and equipment, [https://www.metrohm.com/tr\\_tr/products/electrochemistry/vionic-powered-by-intello.html#pagesegment\\_270744159](https://www.metrohm.com/tr_tr/products/electrochemistry/vionic-powered-by-intello.html#pagesegment_270744159) [Ziyaret Tarihi: 19 Temmuz 2024].
- Mitra, U., Arya, A., & Gupta, S., 2024, Comparative analysis of hybrid electric vehicle on different performance metrics using ADVISOR 2.0. *In Lecture Notes in Electrical Engineering*, 153–167, Springer Nature Singapore.
- Nakamura, E., Soga, M., Sakai, A., Otomo, A., & Kobayashi, T., 2002, Development of electronically controlled brake system for hybrid vehicle. Technical report, Toyota Motor Corporation, SAE Technical Paper Series.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G., 2015, Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264.
- Notten, P. H., het Veld, J. O., & Van Beek, J. R. G., 2005, Boostcharging Li-ion batteries: A challenging new charging concept. *Journal of Power Sources*, 145(1), 89-94.
- Omar, N., Firouz, Y., Monem, M. A., Samba, A., Gualous, H., Coosemans, T. C., & Van Mierlo, J., 2014, Analysis of nickel-based battery technologies for hybrid and electric vehicles. *In Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering*. Elsevier.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. F., 2021, Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *GU J Sci, Part A*, 8(2), 276-298.
- Pal, S. K., De, R. K., & Basak, J., 2000, Unsupervised feature evaluation: a neuro-fuzzy approach. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11(2), 366–376.
- Peng, J., Wu, D., Lu, P., Wang, Z., Du, Y., Wu, Y., & Wu, F., 2023, High-safety, wide-temperature-range, low-external-pressure and dendrite-free lithium battery with sulfide solid electrolyte. *Energy Storage Materials*, 54, 430-439.
- Peng, X., Peng, L., Wu, C., & Xie, Y., 2014, Two dimensional nanomaterials for flexible supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 43(10), 3303-3323.
- Petrovic, S., 2021, Nickel–cadmium batteries. *Battery Technology Crash Course: A Concise Introduction*, 73-88.
- Peukert, W., 1897, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 20 (1), 287-288.
- Prasanth, B., Paul, R., Kaliyaperumal, D., Kannan, R., Venkata Pavan Kumar, Y., Kalyan Chakravarthi, M., & Venkatesan, N., 2023, Maximizing Regenerative Braking Energy Harnessing in Electric Vehicles Using Machine Learning Techniques. *Electronics*, 12(5), 1119.

- Putois, F., 1995, Market for nickel-cadmium batteries. *Journal of Power Sources*, 57(1-2), 67-70.
- Qian, L., Xuan, L., & Chen, J., 2023, Battery SOH estimation based on decision tree and improved support vector machine regression algorithm. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1-13.
- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C., 2013, High energy density metal-air batteries: a review. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(10), A1759.
- Raman, S. R., Cheng, K.-W. (Eric), Xue, X.-D., Fong, Y.-C., & Cheung, S., 2021, Hybrid Energy Storage System with Vehicle Body Integrated Super-Capacitor and Li-Ion Battery: Model, Design and Implementation, for Distributed Energy Storage. *Energies*, 14(20), 6553.
- Rodrigues, M. T. F., Babu, G., Gullapalli, H., Kalaga, K., Sayed, F. N., Kato, K., & Ajayan, P. M., 2017, A materials perspective on Li-ion batteries at extreme temperatures. *Nature energy*, 2(8), 1-14.
- Ruan, J., Walker, P. D., Watterson, P. A., & Zhang, N., 2016, The dynamic performance and economic benefit of a blended braking system in a multi-speed battery electric vehicle. *Applied Energy*, 183, 1240–1258.
- Sakti, I., 2014, Methodology of fuzzy logic with mamdani fuzzy models applied to the microcontroller. In 2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, IEEE, 93-98.
- Sarmah, S., Lakhanlal, Kakati, B. K., & Deka, D., 2023, Recent advancement in rechargeable battery technologies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 12(2), e461.
- Sasaki, T., Ukyo, Y., & Novák, P., 2013, Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature materials*, 12(6), 569-575.
- Sayed, K., Abdel-Khalek, S., Zakaly, H. M. H., & Aref, M., 2022, Energy Management and Control in Multiple Storage Energy Units (Battery–Supercapacitor) of Fuel Cell Electric Vehicles. *Materials*, 15(24), 8932.
- Schmidt-Rohr, K., 2018, How batteries store and release energy: Explaining basic electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 95(10), 1801–1810.
- Sehrawat, P., Abid, A., Islam, S. S., Mauger, A., & Julien, C. M., 2020, Nanostructured graphene oxide-based hybrids as anodes for lithium-ion batteries. *C – Journal of Carbon Research*, 6(4), 81.
- Simon, P., & Gogotsi, Y., 2008, Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854.

- Song, C., Shao, Y., Song, S., Chang, C., Zhou, F., Peng, S., & Xiao, F., 2017, Energy Management of Parallel-Connected Cells in Electric Vehicles Based on Fuzzy Logic Control. *Energies*, 10(3), 404.
- Song, L., Hu, C., Xiao, Y., He, J., Lin, Y., Connell, J. W., & Dai, L., 2020, An ultra-long life, high-performance, flexible Li–CO<sub>2</sub> battery based on multifunctional carbon electrocatalysts. *Nano Energy*, 71, 104595.
- Sugeno, M., 1985, An introductory survey of fuzzy control. *Information sciences*, 36 (1-2), 59-83.
- Sun, Y. K., 2020, Promising all-solid-state batteries for future electric vehicles. *ACS Energy Letters*, 5(10), 3221-3223.
- Şen, M., & Özcan, M., 2023, A novel method for SoC estimation of lithium-ion batteries based on Kalman filter in electric vehicle. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(5), 1–6.
- Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R., 2024, A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles. *Next Sustainability*, 3(100036).
- Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R., 2024, Fuzzy logic-based energy management system for regenerative braking of electric vehicles with hybrid energy storage system. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 14(7), 3077.
- Şen, M., Yiğiter, M. S., & Özcan, M., 2023, Why are consumers switching to electric vehicles? Analyzing consumers preferences for electric vehicles. *Case Studies on Transport Policy*, 14(101108), 1-6.
- Ting, T. O., Man, K. L., Lim, E. G., & Leach, M., 2014, Tuning of Kalman filter parameters via genetic algorithm for state-of-charge estimation in battery management system. *The Scientific World Journal*.
- Tsukamoto, Y., & Terano, T., 1977, Failure diagnosis by using fuzzy logic. *1977 IEEE Conference on Decision and Control Including the 16th Symposium on Adaptive Processes and A Special Symposium on Fuzzy Set Theory and Applications*, 1390-1395.
- Turkmen, A. C., Solmaz, S., & Celik, C., 2017, Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1066–1071.
- URL-1, [https://en.wikipedia.org/wiki/Master\\_cylinder](https://en.wikipedia.org/wiki/Master_cylinder), [Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2023].
- URL-2, <https://article.murata.com/en-sg/article/basic-lithium-ion-battery-4> [Ziyaret Tarihi: 11 Temmuz 2023].
- URL-3, <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures> [Ziyaret Tarihi: 12 Temmuz 2023]

- URL-4, [https://www.gripper.com.uy/IATA\\_Lithium.pdf](https://www.gripper.com.uy/IATA_Lithium.pdf) [Ziyaret Tarihi: 7 Haziran 2023].
- URL-5, [https://www.mpoweruk.com/lithium\\_failures.htm](https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm) [Ziyaret Tarihi: 27 Haziran 2023].
- URL-6, <https://www.togg.com.tr/> [Ziyaret Tarihi: 28 Ekim 2023].
- Vidyanandan, K. V., 2019, Batteries for Electric Vehicles. IEEE.
- Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S. I., & Sun, J., 2019, A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131.
- Wang, Y., & Chen, Y., 2014, A Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems for Traffic Flow Prediction. *J. Comput.*, 9(1), 12-21.
- Wang, Z., Yuan, J., Zhu, X., Wang, H., Huang, L., Wang, Y., & Xu, S., 2021, Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: A comparison study. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 484-498.
- Wang, Z., Zhou, L., & Lou, X. W. D., 2012, Metal oxide hollow nanostructures for lithium-ion batteries. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 24(14), 1903–1911.
- Warner, J. T., 2019, Lithium-Ion Battery Chemistries: A Primer. Elsevier.
- Wen, J., Zhao, D., & Zhang, C., 2020, An overview of electricity powered vehicles: Lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency. *Renewable Energy*, 162, 1629-1648.
- Winter, M., Barnett, B., & Xu, K., 2018, Before Li-ion batteries. *Chemical reviews*, 118(23), 11433-11456.
- Xie, P., Yuan, W., Liu, X., Peng, Y., Yin, Y., Li, Y., & Wu, Z., 2021, Advanced carbon nanomaterials for state-of-the-art flexible supercapacitors. *Energy Storage Materials*, 36, 56-76.
- Xu, K., 2004, Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical reviews*, 104(10), 4303-4418.
- Yan, G., Liu, D., Li, J., & Mu, G., 2018, A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1).
- Yang, S., Zhou, S., Hua, Y., Zhou, X., Liu, X., Pan, Y., & Wu, B., 2021, A parameter adaptive method for state of charge estimation of lithium-ion batteries with an improved extended Kalman filter. *Scientific reports*, 11(1), 5805.

- Yang, Y., Luo, C., & Li, P., 2017, Regenerative Braking Control Strategy of Electric-Hydraulic Hybrid (EHH) Vehicle. *Energies*, 10(7), 1038.
- Yao, W., Armstrong, A. R., Zhou, X., Sougrati, M. T., Kidkhunthod, P., Tunmee, S., & Cheng, H. M., 2019, An oxalate cathode for lithium ion batteries with combined cationic and polyanionic redox. *Nature communications*, 10(1), 3483.
- Yıldırım, I. D., Ammar, A. U., Buldu, M., Mısırlıoğlu, F. B., & Erdem, E., 2021, Strategies to reach ultrahigh capacitance values for supercapacitors: materials design. *Turkish Journal of Physics*, 45(4), 178-184.
- Yueying, Z., Hao, W., & Zhang, J., 2020, Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles Based on Optimization of Switched Reluctance Generator Drive System, in *IEEE Access*, vol. 8, 76671-76682.
- Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zangeneh, M., Aghajari, E., & Forouzanfar, M., 2020, A survey: Fuzzify parameters and membership function in electrical applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 8, 1040-1051.
- Zhang, G., Wei, X., Tang, X., Zhu, J., Chen, S., & Dai, H., 2021, Internal short circuit mechanisms, experimental approaches and detection methods of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110790.
- Zhang, J., Lu, X., Xue, J., & Li, B., 2008, Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus. *World Electric Vehicle Journal*, 2(4), 363–369. MDPI AG.
- Zhang, M., & Fan, X., 2020, Review on the state of charge estimation methods for electric vehicle battery. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 23.
- Zhang, S. S., 2007, A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 164(1), 351–364.
- Zhao, X., Li, L., Wang, X., Mei, M., Liu, C., & Song, J., 2019, Braking force decoupling control without pressure sensor for a novel series regenerative brake system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(7), 1750–1766.
- Zile, M., 2020, Intelligent and adaptive control. *Microgrid Architectures, Control and Protection Methods*, 423-446.
- Zulkifli, S. A., & Dali, M. A. M., 2017, Development of vehicle powertrain simulation module by interfacing Matlab-ADVISOR to LabVIEW. *2017 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*, 128–133.