

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DİNAMİK YÜK KOŞULLARI ALTINDA ELEKTRİKLİ FORKLİFTLERDE
LİTYUM-İYON BATARYALARIN ŞARJ DURUM TAHMİNİ VE
PERFORMANS ANALİZİ

Hasan Berkay DOĞAN

Danışman

Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

Manisa 2025

HASAN
BERKAY
DOĞAN

DİNAMİK YÜK KOŞULLARI ALTINDA
ELEKTRİKİ FORKLİFTLERDE LİTYUM-İYON BİYATRYALARIN
ŞARJ DURUM TAHMİNİ VE PERFORMANS ANALİZİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Hasan Berkay DOĞAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Hasan Berkay DOĞAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

Bu çalışma, elektrikli forklift uygulamalarında kullanılan Li-ion bataryaların şarj durumu (SOC) tahmini için farklı yöntemlerin karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Geleneksel kurşun-asit bataryalardan farklı olarak Li-ion teknolojisinin çok daha hızlı şarj, bakım gerektirmeme ve uzun döngü ömrü gibi avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, bu bataryaların etkin kullanımı ve güvenli çalışması için Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) hayati öneme sahiptir.

Bu tezde, farklı SOC tahmin yöntemleri (OCV, Coulomb Counting, EKF, UKF, AEKF) hem saha testleri hem de MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde VDI 2198 standardı baz alınarak özelleştirilmiş bir parkur kullanılmış ve 51.2V 554Ah LFP batarya ile çalışan bir forklift kullanılmıştır. Test sırasında akım, gerilim, sıcaklık ve SOC gibi parametreler anbean izlenmiş ve istatistiksel hata metrikleri (MAE, RMSE, MAPE) kullanılarak yöntemlerin başarısı değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, model tabanlı ve hibrit yöntemlerin geleneksel yöntemlere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, elektrikli forkliftlerde Li-ion teknolojisine geçiş sürecinde doğru SOC tahmini için karar vericilere teknik altyapı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Forklift, şarj durumu, SOC tahmini, Li-ion batarya, BYS, Kalman filtresi

2025, 101 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Hasan Berkay DOGAN

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Education

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sezai TASKIN

This thesis presents a comparative analysis of various State of Charge (SOC) estimation methods for lithium-ion batteries used in electric forklift applications. Compared to traditional lead-acid batteries, lithium-ion technology offers advantages such as faster charging, maintenance-free operation, and longer cycle life. Therefore, Battery Management Systems (BYS) play a critical role in the safe and efficient operation of these batteries.

In this study, several SOC estimation techniques (OCV, Coulomb Counting, EKF, UKF, AEKF) were analyzed through both real-world field tests and MATLAB/Simulink-based simulations. The field tests were conducted using a customized track based on the VDI 2198 standard, employing a 51.2V 554Ah LFP battery-powered forklift. Parameters such as current, voltage, temperature, and SOC were continuously monitored, and the estimation accuracy of each method was evaluated using statistical metrics (MAE, RMSE, MAPE).

The results indicate that model-based and hybrid methods outperform traditional approaches in dynamic forklift operations. This study provides a scientific basis for selecting SOC estimation strategies in the transition from lead-acid to lithium-ion battery systems in industrial forklifts.

Keywords: Forklift, state of charge, SOC estimation, lithium-ion battery, BYS, Kalman filter

2025, 101 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, endüstriyel elektrikli forkliftlerde kullanılan Li-ion bataryaların şarj durumu (SOC) tahmini üzerine odaklanmaktadır. Gerçek saha verileri ve simülasyon ortamında uygulanan farklı yöntemlerin karşılaştırmalı analizi ile, enerji verimliliği ve sistem güvenilirliğini artırmaya yönelik katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile bana rehberlik eden, lisansüstü öğrenim sürecimde karşılaştığım tüm zorluklarda desteğini esirgemeyen, akademik ve insani yönüyle bana ilham veren, kendisini tanımaktan büyük bir onur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sezai TAŞKIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yalnızca akademik bir rehber değil, aynı zamanda her anlamda yanımda olarak çalışma sürecimi kolaylaştıran, bilgi birikimi ve yapıcı yönlendirmeleriyle beni destekleyen çok değerli hocam Sayın Öğr. Gör. Osman DEMİRCİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde manevi desteğiyle her zaman yanımda olan, sabrı ve anlayışıyla motivasyonumu korumama katkı sağlayan değerli eşim Ecem İlayda DOĞAN'a ve eğitim hayatım boyunca beni desteklemekten hiç vazgeçmeyen çok değerli aileme teşekkür ederim.

Bu çalışmanın deneysel altyapısının oluşturulması sürecinde tüm olanaklarını kullanmama imkan tanıyan ve değerli katkılarda bulunan İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. A.Ş. yönetimine, Ar-Ge Merkezi Müdürü Sayın Sibel ESERDAĞ'a, Proje Müdürü Sayın Akinori HAZE'ye ve birlikte çalışmaktan gurur duyduğum çalışma arkadaşlarım Fahrettin Kerem KARAHAN, Ahmet BOZARSLAN, Kahraman YÜKSEL, Bilal KOÇ, Arda ALHAN, Alican AKMEŞE ve Hakan KIZIL'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Berkay DOĞAN

Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat Derece
A	Akım
AC	Alternatif Akım
Ah	Amper Saat
AEKF	Uyarlanabilir Genişletilmiş Kalman Filtresi (Adaptive Extended Kalman Filter)
ARIMA	Otokorelasyonlu Entegre Hareketli Ortalama Modeli (Autoregressive Integrated Moving Average)
BESS	Batarya Enerji Depolama Sistemi
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
C	Kapasite
C ₁	Polarizasyon Kapasitansı
CC	Coulomb Sayma Metodu (Coulomb Counting)
CCCV	Sabit Akım-Sabit Gerilim (Constant Current-Constant Voltage)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DEC	Dietil Karbonat
DMC	Dimetil Karbonat
DOD	Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
EC	Etilen Karbonat
ECM	Eşdeğer Devre Modeli
EIS	Hücre Empedans Spektroskopisi
EKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
g/cm ³	Gram/santimetre Küp
GRU	Kapılı Tekrarlayan Birim (Gated Recurrent Unit)
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
HESS	Hibrit Enerji Depolama Sistemi
HPPC	Hibrit Darbe Güç Karakterizasyonu (Hybrid Pulse Power Characterization)
IP	Giriş Koruma Sınıfı (Ingress Protection)
LCA	Yaşam Döngü Analizi
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
Li ⁺	Lityum İyonu
LiC ₆	Lityum Heksakarbonit
LiFePO ₄	Lityum Demir Fosfat
Li-Ion	Lityum İyon
LiPF ₆	Lityum Heksaflorofosfat
LMO	Lityum Manganez Oksit
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
LTSM	Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory)
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)

MQTT	Mesaj Sıralaması Telemetry Taşımacılığı (Message Queuing Telemetry Transport)
mS/cm	miliSiemens / santimetre
NCA	Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit
NMC	Nikel Mangan Kobalt Oksit
OCV	Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage)
P2D	Pseudo 2 Yönlü Modeli
Pb	Kurşun
PbO	Kurşun Oksit
PbO₂	Kurşun Dioksit
PbSO₄	Kurşun Sülfat
PE	Polietilen
PID	Oransal – İntegral – Türevsel Denetleyici
PP	Polipropilen
PVDF	Poliviniliden Florür
R	Korelasyon Katsayısı
R₀	Ohmik Direnç
R₁	Polarizasyon Direnci
R²	Belirleme Katsayısı
RC	Direnç-Kapasitör Devresi
RMSE	Kök Ortalama Hata
SEI	Katı Elektrolit Ara Fazı
SLI	Marş, Aydınlatma ve Ateşleme
SOC	Şarj Durumu (State of Charge)
SOH	Sağlık Durumu (State of Health)
SVR	Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression)
UKF	Unscented Kalman Filtresi
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
V	Gerilim
VCU	Araç Kontrol Ünitesi (Vehicle Control Unit)
VDI2198	Venein Deutscher Ingenieure VDI 2198 Standartı
Wh	Watt Saat
τ	Zaman Sabiti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	12 V kurşun-asit otomobil aküsü görüntüsü.....	18
Şekil 2.2	2 V Endüstriyel kurşun-asit akü temel bileşenleri.....	20
Şekil 2.3	PzS tipindeki bir pozitif ızgara	24
Şekil 2.4	Pozitif plaka örneği (gauntlet, ızgara ve aktif malzeme).....	24
Şekil 2.5	Negatif ızgara yapısı	25
Şekil 2.6	Asit yoğunluk ölçüm cihazları.....	27
Şekil 2.7	Endüstriyel akülerde kullanılan separatör görseli.....	28
Şekil 2.8	Li-ion bataryaların tipleri sırasıyla silindirik, prizmatik ve kese tipi [43].....	32
Şekil 2.9	Lityum iyon akü bileşenleri [44]	33
Şekil 2.10	Prizmatik tipindeki LFP hücrenin yapısal bileşenleri [42]	35
Şekil 2.11	Li-ion (LFP) hücre kesitinde elektrolit ve iyon taşıma süreci [45]	38
Şekil 2.12	Hioki 3554 iç direnç ölçüm cihazı.....	48
Şekil 2.13	Şarj durumu tahmin algoritmalarının genel görünümü	52
Şekil 2.14	3 farklı ortam sıcaklığında kaydedilmiş LFP aküler için OCV/SOC grafiği...53	
Şekil 2.15	SOC tahmini için kullanılan EKF, AEKF ve UKF yapılarının genel görünümü	55
Şekil 2.16	Döngü sayısına göre farklı Li-ion batarya kimyalarına sahip bataryaların SOH değişimi [46]	57
Şekil 2.17	Forklift bataryası için kullanılan pasif dengeleme sistemine sahip bir batarya yönetim sistemi	64
Şekil 3.1	Bu tez kapsamında izlenen metodolojik adımları gösteren genel blok diyagramı.....	66
Şekil 3.2	Saha testinde kullanılan STILL RX 20-20P Forklift [47]	70
Şekil 3.3	Saha testi prosedürü	71
Şekil 3.4	Saha testinde kullanılan 51.2V 554Ah Li-ion batarya.....	71
Şekil 3.5	HPPC test profilleri: a) ilk kontrol ve deşarj adımları b) şarj adımları	74
Şekil 3.6	Thevenin eşdeğeri: a) Birinci dereceden, b)İkinci dereceden	75
Şekil 4.1	Forkliftin A noktasındaki yükü kaldırma anı ve forkliftin b noktasındaki yükü kaldırma anı.....	84
Şekil 4.2	VDI 2198 tabanlı test parkurunda test forkliftinden elde edilen akım profili ..84	

Şekil 4.3 VDI 2198 tabanlı test parkurunda test forkliftinin batarya hücre sıcaklık değişimleri.....	85
Şekil 4.4 554Ah LFP bataryanın gerçek C5 kapasite testi sonuçları.....	85
Şekil 4.5 6Ah LFP batarya HPPC testi profili	87
Şekil 4.6 Simulinkte tasarlanan SOC tahmin modeli	89
Şekil 4.7 Deneysel veriler kullanılarak gerçek dinamik yük döngüleri altında SOC tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 4.8 Farklı SOC tahmin algoritmaları performanslarının istatistiksel analizi.....	91
Şekil 4.9 Filtre parametrelerinin hatalı ayarlandığı simülasyon sonucu.....	92

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2.1 Akü malzeme/bileşen oranları.....	21
Tablo 2.2 Yaygın Lityum-İyon Batarya Kimyalarının Karşılaştırması.....	31
Tablo 2.3 LFP akü malzeme/bileşen oranları.....	34
Tablo 2.4 Endüstriyel Uygulamalar İçin LFP ve Kurşun-Asit Akülerin Karşılaştırması.....	43
Tablo 2.5 Örnek batarya parametreleri tablosu	46
Tablo 3.1 Simülasyonda kullanılan hücre ile gerçek saha şartlarında kullanılan hücrenin teknik karşılaştırması	68
Tablo 3.2 Saha testlerinde kullanılan forkliftin teknik özellikleri.....	69
Tablo 4.1 6 Ah LFP hücresi için farklı SOC seviyelerinde gerçekleştirilen HPPC testlerinden elde edilen eşdeğer devre modeli parametreleri.	88

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLolar DİZİNİ	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL BİLGİLER VE TANIMLAMALAR.....	17
2.1 Batarya Enerji Depolama Sistemleri	17
2.2 Elektrikli Forkliftlerde Enerji Depolama Sistemleri	17
2.2.1 Kurşun-Asit Aküler	18
2.2.2 Lityum-İyon Aküler	30
2.3 Batarya Sistemlerinde Kavramsal Temeller ve Hesaplamalar	44
2.3.1 Batarya Elektriksel Parametreleri	44
2.3.2 Kapasite Tanımı ve Hesaplamaları	46
2.3.3 İç Direnç ve Hesaplamaları	48
2.3.4 Şarj Durumu (State of Charge – SOC).....	50
2.3.5 Sağlık Durumu (State of Health – SOH).....	56
2.3.6 Enerji Verimliliği ve Değişkenleri	58
2.3.7 Şarj/Deşarj Prosedürleri.....	60
2.3.8 Batarya Yaşlanma Mekanizmaları ve Modelleme Yaklaşımları.....	61
2.4 Batarya Yönetim Sistemi (BYS) ve Fonksiyonları.....	63
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	66
3.1 Çalışmada Kullanılan Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) Özellikleri	66
3.2 Forklift Uygulaması ve Test Sisteminin Tanıtımı.....	68
3.3 Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Özellikleri.....	72
3.4 Batarya Parametreleri Belirleme Testleri.....	73
3.5 Şarj Durumu (SOC) Tahmin Yöntemlerinin Uygulanması.....	76
3.6 İstatistiksel Analiz Yöntemleri.....	80
4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	82
4.1 Saha Testi Bulguları.....	83
4.2 Batarya Model Parametrelerinin Belirlenmesi	86

4.3	Simölasyon ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması	88
5	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
5.1	Sektörel Bakış ve Teknolojik Beklentiler	94
5.2	Endüstriyel Forklift Uygulamaları İçin BYS Tasarım Önerileri.....	95
5.3	Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar	95
6	KAYNAKÇA	97



1 GİRİŞ

Endüstriyel lojistik sektörü, elektrifikasyonun yaygınlaşmasıyla birlikte önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşümün en belirgin örneklerinden biri, içten yanmalı motorlu forkliftlerden elektrikli modellere geçiştir. Özellikle depo ve üretim gibi kapalı ortamlarda, elektrikli forkliftler daha temiz, sessiz ve verimli bir alternatif sunarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır [1]. Ancak bu araçların güvenli ve verimli çalışması, doğrudan enerji depolama sistemlerinin, yani bataryaların performansına ve yönetimine bağlıdır [2].

Tarihsel olarak, forkliftlerde en yaygın kullanılan batarya tipi kurşun-asit bataryalardır. Düşük ilk yatırım maliyetleri ve yaygın altyapısı nedeniyle tercih edilen bu bataryalar, uzun şarj süreleri, düzenli bakım ihtiyacı (örneğin su takviyesi), düşük enerji yoğunluğu ve görece kısa çevrim ömrü gibi dezavantajlara sahiptir [3]. Bu sınırlamalar, Lityum-iyon (Li-ion) teknolojilerinin forklift uygulamalarında giderek daha fazla benimsenmesine yol açmıştır. Li-ion bataryalar; daha yüksek enerji yoğunluğu, daha kısa şarj süreleri, bakım gerektirmemesi ve daha uzun ömür gibi avantajlara sahiptir [4].

Farklı Li-ion kimyaları arasında, Lityum Demir Fosfat (LFP), forklift gibi endüstriyel uygulamalar için öne çıkmaktadır. LFP bataryalar, yüksek termal stabilite, yüksek güvenlik ve uzun çevrim ömrü sunmaktadır [5]. Ancak bu bataryaların yüksek dinamikliğe sahip, güvenlik kritik ortamlarda tam potansiyeliyle kullanılabilmesi için gelişmiş Batarya Yönetim Sistemleri'ne (BYS) ihtiyaç vardır. BYS'ler; voltaj, akım, sıcaklık gibi batarya parametrelerini anlık olarak izleyerek Şarj Durumu (State of Charge – SOC) ve Sağlık Durumu (State of Health – SOH) gibi kritik bilgileri hesaplamaktadır.

SOC tahmini, özellikle operasyonel sürekliliğin önemli olduğu forklift uygulamalarında hayati öneme sahiptir. Tüketici elektroniği veya binek araçlardan farklı olarak, forkliftler çok vardiyalı sistemlerde çalışmakta ve neredeyse hiç boşta kalmamaktadır. Yanlış SOC tahmini beklenmedik duruşlara, operasyonel aksamalara veya güvenlik risklerine neden olabilir. Geleneksel SOC tahmin yöntemleri olan Açık Devre Gerilimi (OCV) ve Coulomb Sayımı (Coulomb Counting - CC), ideal koşullara

(örneğin dinlenme süresi, doğrusal akım-gerilim tepkisi) dayandığı için bu uygulamalarda genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter - EKF), Unscented Kalman Filtresi (UKF) ve Uyarlanabilir Kalman Filtresi (Adaptive Kalman Filter - AEKF) gibi model tabanlı yaklaşımlar ön plana çıkmıştır.

Bu tez çalışması, Li-ion bataryalı elektrikli forkliftlerde SOC tahmin yöntemlerinin doğruluğunu dinamik saha koşullarında deneysel ve simülasyon tabanlı olarak karşılaştırmayı amaçlamaktadır. STILL RX20-20 model bir elektrikli forklift ve 51.2 V 554Ah kapasiteli bir LFP batarya paketi kullanılarak Verein Deutscher Ingenieure 2198 (VDI 2198) standardına göre oluşturulmuş bir test parkurunda saha testleri gerçekleştirilmiştir. Test süresince akım, gerilim, sıcaklık ve SOC gibi parametreler endüstriyel BYS üzerinden gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Bunun yanı sıra, MATLAB/Simulink ortamında eşdeğer hücre modelleriyle benzetim çalışmaları yürütülmüş ve SOC tahmin algoritmaları kontrollü ortamda sınanmıştır.

Her bir yöntemin başarımı; Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error - RMSE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) gibi istatistiksel metrikler ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, model tabanlı ve hibrit yöntemlerin özellikle yüksek dinamik yükler ve değişken sıcaklık koşullarında geleneksel yöntemlerden daha doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma, her bir SOC tahmin yönteminin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymanın yanı sıra, BYS tasarımcıları ve forklift üreticileri için enerji yönetimi optimizasyonu, güvenlik, güvenilirlik ve batarya ömrünün artırılması gibi konularda pratik öneriler sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Literatür Taraması

Johnson (2008) tarafından yürütülen bu çalışma, elektrikli forkliftlerin Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas - LPG) tahrikli forkliftlerle kıyaslandığı kapsamla bir yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment - LCA) çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Temel hedef, farklı enerji kaynaklarına sahip

forkliftlerin sera gazı emisyonları, enerji tüketimi ve genel karbon ayak izleri açısından performans farklılıklarını nicel olarak ortaya koymaktır. Çalışmanın başlangıç noktasında, her iki forklift tipi için sistem sınırları ve fonksiyonel birimler belirlenerek, yakıt temini, işletme ve bakım dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsü evreleri modellenmiştir [28].

Elektrikli forkliftler için kullanılan elektrik enerjisinin kaynağının karbon yoğunluğuna göre toplam emisyonlar önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Örneğin, hidroelektrik kaynaklı elektrik kullanan senaryolarda elektrikli forkliftler, LPG'ye göre %70'e varan daha düşük sera gazı salımına sahipken; kömüre dayalı elektrik üretiminde bu avantaj ortadan kalkmaktadır. Ek olarak, elektrikli forkliftlerin daha az hareketli parça içermesi nedeniyle bakım gereksinimleri ve bu bakıma bağlı enerji/emisyon girdileri daha düşüktür.

Çalışmanın bulguları, elektrikli forkliftlerin doğru enerji altyapısıyla desteklendiği takdirde çevresel açıdan son derece avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu noktada enerji depolama sistemlerinin verimliliği, ömrü ve şarj altyapısı kritik öneme sahiptir. Tez çalışmanızda kullanılan Li-ion batarya sistemlerinin sıcaklık ve çevrim performansına dair veriler de, bu çalışmadaki genel karbon ayak izi çıkarsamalarıyla çapraz olarak analiz edilebilir. Ayrıca, ölçülen enerji verimlilikleri ile LCA sonuçları arasında doğrusal bir ilişki kurulabileceği görülmektedir.

Rajaeifar ve arkadaşları (2022) tarafından yayınlanan bu çalışma, elektrikli taşıt bataryalarının tedarik zincirinden geri dönüşüme kadar uzanan süreçteki çevresel ve toplumsal etkilerini sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında, özellikle LFP ve Nikel-Mangan-Kobalt Oksit (Nickel Manganese Cobalt Oxide - NMC) kimyalarının yaşam döngüsü analizi yapılmış, bu iki yaygın Li-ion türü arasındaki farklar ayrıntılandırılmıştır.

Veri toplama aşamasında batarya hücrelerinin bileşen malzemeleri, bu malzemelerin tedarik coğrafyası, taşıma mesafeleri, enerji kullanımı, emisyon katsayıları, su ayak izi ve insan sağlığına etkisi gibi parametreler dikkate alınmıştır. Batarya hammaddelerinden kobalt ve lityum, özellikle Demokratik Kongo Cumhuriyeti

ve Bolivya gibi bölgelerden temin edilmekte olup, bu durum çevresel adalet ve etik sorumluluk konularını da gündeme getirmektedir [29].

Yapılan yaşam döngüsü analizleri sonucunda, LFP bataryaların daha düşük enerji yoğunluğuna rağmen daha düşük karbon ayak izine sahip olduğu; buna karşılık NMC bataryaların daha yüksek performans sağlamasına rağmen kobalt içeriği nedeniyle sosyal sorumluluk riski taşıdığı tespit edilmiştir. Geri dönüşüm aşamasında da LFP bataryaların yapısal basitliği nedeniyle enerji geri kazanımının daha etkin olduğu belirtilmiştir.

Bu bulgular, tez çalışmasında yer alan Li-ion batarya seçimi açısından önemlidir. Özellikle forklift uygulamalarında ağırlık dezavantajının olmaması ve yangın güvenliği gibi faktörler, LFP'nin tercih edilmesini desteklemektedir. Ayrıca, sürekli şarj-deşarj döngüsüne maruz kalan sistemlerde uzun ömürlülük LFP lehine bir parametredir. Rajaeifar et al. çalışması, tez çalışmasına sürdürülebilirlik temelli bir dayanak sunmakta ve seçilen batarya teknolojisinin hem teknik hem de etik boyutunu desteklemektedir.

Xue ve arkadaşları (2022), elektrikli forkliftler için hibrit batarya sistemlerinin (Kurşun-asit + Li-ion) performans ve enerji verimliliği açısından avantajlarını ortaya koymak amacıyla MATLAB/Simulink ortamında ayrıntılı bir modelleme ve simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma, hibrit sistemlerin hem ekonomik hem de teknik faydalarının bir arada sunulup sunulamayacağını irdelemektedir.

Hibrit sistemde kurşun-asit bataryaların yüksek akım dayanımı kullanılırken, Li-ion bileşen ani tüp yük taleplerinde destekleyici rol üstlenmektedir. Simülasyonlarda, kurşun-asit akülerin artan sıcaklık ile birlikte iç dirençlerinin artması nedeniyle voltaj çökmeleri meydana geldiği görülmüş, Li-ion bileşenin devreye girmesiyle gerilim stabilitesinin sağlandığı raporlanmıştır. Model, direnç-kapasitör (RC) devresi esaslı bir yapı ile kurularak, farklıdeşarj oranları ve çevrim sayıları için sistem davranışı öngörülmüştür [30].

Elde edilen sonuçlarda, hibrit sistemlerin özellikle değişken yük profillerinde enerji verimliliğini %6,2 oranında artırdığı, ancak soğutma ihtiyacının %15

seviyelerinde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, kurşun-asit modüllerin sıcaklık duyarlılığı nedeniyle, tüm sistemin ömrü Li-ion modüle bağlı olarak sınırlandırılmaktadır.

Tez çalışmasında benzer şekilde Li-ion sistemlerin değişken yük altındaki davranışları analiz edileceği için, bu hibrit sistemin verimlilik ve voltaj regülasyonu bulguları özellikle SOC tahmin modellerinizin kalibrasyonu için önemlidir. Ayrıca bu makale, dinamik test protokollerinde (VDI 2198 gibi) farklı batarya kombinasyonlarının sistem stabilitesi üzerine etkisini modelleyerek, tez çalışmasındaki saha testleri ile karşılaştırma yapma imkânı sunmaktadır

Kim ve arkadaşları (2021), çinko-iyon bataryaların gelişen enerji depolama teknolojilerindeki yerini ortaya koymak amacıyla geniş kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirmiştir. Bu batarya sistemlerinin Li-ion bataryalara göre bazı temel avantajları, özellikle düşük maliyet, çevre dostu üretim süreci ve yangın güvenliği ekseninde değerlendirilmiştir. Çinko-iyon bataryalar, su bazlı elektrolit kullandıklarından dolayı termal kaçak (thermal runaway) riski minimum düzeyde olup yanma veya patlama gibi emniyet risklerini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum, özellikle iç mekân forklift uygulamalarında ve kapalı depo alanlarında kritik önem arz etmektedir.

Çalışmada, çinko-iyon hücrelerin enerji yoğunluğu yaklaşık 100 Wh/kg olarak belirlenmiş olup bu değer, günümüz LFP bataryalarına kıyasla %30–40 daha düşüktür. Ancak, batarya üretiminde kullanılan çinko, dünya genelinde yaygın olarak bulunmakta ve kobalt gibi kritik minerallere olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca anot tarafında çinko metal kullanımı, Lityum-metal veya grafit anoda göre daha yüksek teorik kapasite sağlamaktadır (820 mAh/g), ancak dendrit oluşumu ve elektrot bozulması gibi sorunların çözülmesi gerekmektedir [31].

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen döngüsel testlerde, çinko-iyon bataryaların 1000 çevrime kadar kararlı performans gösterdiği, ancak yüksek akım altında kapasite kaybının hızlandığı tespit edilmiştir. SOC tahmini açısından, sabit voltaj profiline sahip bu bataryalar, OCV tabanlı yöntemlerde avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma çinko-iyon teknolojisinin güvenlik, maliyet ve sürdürülebilirlik parametreleri açısından endüstriyel forklift uygulamaları için alternatif

bir çözüm sunabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak enerji yoğunluğu düşüklüğü ve çevrim ömrü limitasyonları nedeniyle kısa vadede yalnızca sınırlı güç gereksinimi olan sistemlerde uygulanabilirliği öngörülmektedir. Tez çalışmasında değerlendirilen güvenli SOC sınırları ve hücre seçimi bağlamında, çinko-iyon sistemler ilerideki alternatifler arasında değerlendirilebilir.

Paul ve çalışma arkadaşları (2020), Li-ion batarya sistemlerinin süper kapasitör destekli hibrit konfigürasyonlarla birleştirilmesi halinde, forklift gibi yüksek akım dalgalanması içeren uygulamalarda enerji yönetiminin optimize edilebileceğini öne sürmüştür. Çalışma, hibrit enerji depolama sistemlerinin (Hybrid Energy Storage Systems -HESS) dinamik yük altında batarya yıpranmasını nasıl azalttığını ve sistem performansını nasıl geliştirdiğini göstermek amacıyla MATLAB/Simulink platformunda modelleme ve simülasyon gerçekleştirmiştir [32].

Önerilen sistemde, süper kapasitörler ani güç taleplerini karşılayarak Li-ion hücreler üzerindeki yükü hafifletmektedir. Böylece Li-ion bataryaların hem ısı yükleri azalmış hem de çevrim ömürleri uzamıştır. Hibrit sistemin kontrol algoritması, yük profiline göre akım paylaşımı yaparak SOC eşitlemesi ve enerji optimizasyonunu gerçek zamanlı olarak sağlamaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre, yalnızca Li-ion sistem ile kıyaslandığında hibrit yapıda termal kayıpların %8 oranında azaldığı, ortalama hücre sıcaklığının 3°C daha düşük seyrettiği ve SOC değişim eğrilerinin daha kararlı olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca çalışmada, sistemin farklı SOC başlangıç seviyelerinde tepkisi incelenmiş ve düşük SOC seviyelerinde süper kapasitör katkısının enerji dengelemesine daha fazla yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, tez çalışmasında kullanılan düşük SOC aralıklarındaki hata analizi ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Hibrit sistemin özellikle düşük sıcaklık ve ani yük geçişi gibi zorlayıcı senaryolarda SOC tahmin algoritmalarının performansını artırdığı belirtilmiştir. Bu bağlamda Paul et al. (2020) çalışması, tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen SOC tahmin performansı karşılaştırmalarına teorik ve sayısal katkı sağlamaktadır. Forklift gibi çevrimsel kullanımın yoğun olduğu sistemlerde hibrit yapılar ile model tabanlı SOC hesaplama arasındaki korelasyon bu çalışma ile desteklenmiş ve literatüre kazandırılmıştır.

Demirci ve arkadaşları (2024), Li-ion batarya sistemlerinde kullanılan farklı SOC tahmin yöntemlerini sistematik biçimde sınıflandırarak doğruluk, hata birikimi, hesaplama yükü ve saha uygulanabilirliği açısından karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmiştir [26].

Simülasyonlarda, sabit sıcaklık ve düşük akım senaryolarında OCV yöntemi %96'nın üzerinde tahmin doğruluğu sağlarken; yüksek akım ve değişken sıcaklık koşullarında hata oranı %12'ye kadar yükselmiştir. Bu nedenle sadece OCV'ye dayalı modellerin saha uygulamalarında güvenilirliği sorgulanmaktadır. Buna karşılık, EKF tabanlı modellerin hata birikimi açısından daha başarılı olduğu, ancak model parametrelerinin doğru belirlenmediği durumlarda sapma yapabildiği tespit edilmiştir. Özellikle AEKF algoritması, çevrimsel öğrenme yeteneği ile bataryanın yaşlanma etkilerini hesaba katarak zamanla değişen iç direnç, kapasite ve RC parametrelerine uyum sağlayabilmiştir. Deneysel çalışmalarda, AEKF tabanlı tahminin, test edilen 277 Ah'lık LFP hücrede %1.1 MAE ve %1.5 RMSE ile en düşük hata oranına sahip olduğu raporlanmıştır. UKF yönteminin ise karmaşık sistemlerde stabilitesi daha yüksek olsa da, hesaplama maliyetinin diğer yöntemlere göre %25 daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma, tez çalışmasında yer alan farklı SOC tahmin algoritmalarının Simulink ortamında modellenip saha verisi ile test edilmesi sürecine doğrudan katkı sağlamaktadır. Demirci et al.'nın bulguları, yüksek doğruluk için sadece bir algoritmaya bağlı kalmadan çevrim içi öğrenme kabiliyeti olan yöntemlerin tercih edilmesi gerektiğini desteklemektedir. Ayrıca AEKF'nin batarya parametrelerinin güncellenmesini mümkün kılması, adaptif modelleme yönünde atılan adımlar açısından oldukça değerlidir. Ha ve arkadaşları (2017) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, Li-ion batarya sistemlerinde güvenli kullanım sınırlarını tanımlayarak, hücrelerin aşırı şarj ve aşırı deşarj koşullarına karşı korunmasını sağlayacak gömülü tanı algoritmaları geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, farklı sıcaklık ve akım koşullarında batarya davranışı detaylı şekilde incelenmiş ve bu verilere dayanarak gerçek zamanlı arıza tespiti yapabilen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, batarya sisteminin voltaj, akım ve sıcaklık değişimlerini sürekli olarak izleyerek, hücrelerin güvenli sınır değerlerin dışına çıkması durumunda müdahale etmektedir [33].

Testlerde, 18650 formatındaki 2.6 Ah kapasiteli NMC hücreler 1C oranında deşarj edilerek hücre sıcaklığının 40°C'yi aşması durumunda algoritmanın müdahale süresi ölçülmüştür. Geliştirilen sistem, aşırı sıcaklık veya voltaj durumlarını 0.5 saniyeden daha kısa sürede tespit edip, şarj veya deşarj devresini keserek batarya güvenliğini sağlamıştır. Ayrıca, model üzerinden gerçekleştirilen senaryolarda, hücre voltajının 4.25 V değerini aşması durumunda sistemin koruma protokolü devreye girmekte ve BYS kontrol katmanı üzerinden haberleşme ağına uyarı göndermektedir.

Çalışmada ayrıca model tabanlı bir yaklaşım kullanılarak batarya içerisindeki termal yayılım ve lokal ısınma alanları simüle edilmiş ve hücreler arasındaki sıcaklık farkının batarya performansına etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hücreler arası 4°C'lik sıcaklık farkı bile voltaj farklarını %1.8 oranında artırmakta ve bu da SOC dengesizliğine yol açmaktadır.

Bu çalışma, tez çalışmasında değerlendirilen SOC tahmin algoritmalarının güvenli çalışabileceği voltaj ve sıcaklık limitlerini belirleme açısından son derece önemlidir. Ayrıca, gömülü sistem temelli güvenlik algoritmalarının batarya izleme sistemleriyle entegrasyonu, sizin üzerinde çalıştığınız forklift BYS uygulamaları için örnek teşkil etmektedir. Ha ve arkadaşlarının yaklaşımı, özellikle hızlı yanıt süresi ve termal analiz temelli önleyici stratejileriyle, yüksek güçlü uygulamalarda BYS tasarımı için referans niteliği taşımaktadır. Nath ve Rajpathak (2022) tarafından yapılan bu çalışma, Li-ion batarya sistemlerinin uzun vadeli verimliliğini etkileyen önemli bir problem olan hücreler arası SOC dengesizliği konusuna odaklanmaktadır. Çalışmada, özellikle çok hücreli batarya paketlerinde voltaj farklılıkları ve SOC sapmalarının neden olduğu enerji kayıplarını ve sistem verimsizliklerini azaltmaya yönelik dengeleme (balancing) algoritmaları geliştirilmiştir. Bu kapsamda hem pasif hem de aktif dengeleme yöntemleri incelenmiş; simülasyon ortamında ve deneysel olarak değerlendirilmiştir [34].

Pasif dengeleme yöntemleri, aşırı şarj olan hücrelerin üzerindeki fazla enerjiyi direnç üzerinden ısıya çevirerek dağıtırken, aktif dengeleme yaklaşımları bu fazla enerjiyi diğer hücrelere transfer ederek sistemin toplam verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Çalışmada kullanılan aktif dengeleme devreleri arasında kapasitif

transfer devresi, buck-boost (azaltıcı-yükseltici) dönüştürücü tabanlı enerji transferi ve çok aşamalı dengeleme algoritmaları yer almaktadır. Her bir yöntemin eşzamanlı hücre gerilimi düzenleme, tepki süresi ve termal kayıplar bakımından performansları karşılaştırılmıştır.

Aktif dengeleme sistemlerinin, SOC farklarını %6.5 seviyesinden %1.2 seviyesine düşürdüğü gösterilmiştir. Ayrıca 200 çevrimlik bir test senaryosunda pasif balanslı sistemin kapasite kullanım oranı %83.7 iken, aktif balans uygulanan sistemde bu oran %91.5 olarak ölçülmüştür. Bu bulgu, sistem verimliliği ve batarya ömrü açısından önemli bir gelişmedir. Dengeleme algoritmalarının gömülü BYS yazılımına entegre edilmesi ile birlikte sistemin otomatik olarak her çevrimde SOC eşitlemesi yapabildiği raporlanmıştır.

Bu çalışma, tez çalışmasında analiz edilen hücre voltaj ve SOC verilerinin değerlendirilmesinde önemli bir perspektif sunmaktadır. Özellikle saha verilerinizde hücreler arası farkların zamanla arttığı ve bu durumun SOC tahmin doğruluğunu etkilediği göz önüne alındığında, Nath & Rajpathak (2022) çalışması, aktif balans uygulamalarının modelleme sürecine dahil edilmesi için değerli bir literatür dayanağı oluşturmaktadır.

Abronzini ve çalışma arkadaşları (2019), BYS’lerde sıcaklık eşitsizliğinin hücreler arası performans farklarına ve uzun vadeli kapasite kaybına neden olduğunu tespit etmiş ve bu sorunu çözmek amacıyla gelişmiş bir termal izleme ve yönetim sistemi önermiştir. Çalışmada, 48V’luk bir Li-ion batarya modülünün sıcaklık profili detaylı olarak modellenmiş ve çok noktalı sıcaklık sensörleriyle toplanan veriler kullanılarak batarya içi termal dağılım analizi gerçekleştirilmiştir [35].

Yapılan deneylerde, farklı yerleşimlerdeki hücreler arasında 3°C’ye kadar sıcaklık farkı oluştuğu ve bu farkın tekrarlayan çevrimlerde 6°C seviyelerine kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık farkları, hücreler arası şarj/deşarj akımı dağılımını bozmakta ve bu da SOC sapmalarına ve bazı hücrelerin aşırı stres altında çalışmasına neden olmaktadır. Çalışmada, bu durumun önlenmesi amacıyla her hücreye özel Oransal – İntegral – Türevsel Denetleyici (Proportional–Integral–Derivative

Controller – PID) kontrollü aktif soğutma sistemi önerilmiş ve bu sistemin klasik fan tabanlı homojen soğutma yöntemine göre %23 daha iyi sıcaklık dengelemesi sağladığı gösterilmiştir.

Ayrıca, hücre sıcaklığı ile iç direnç arasındaki ilişki analiz edilerek, sıcaklığı yüksek hücrelerde %12'ye kadar daha yüksek iç direnç oluştuğu ve bunun SOC hesaplamalarında voltaj tabanlı tahmin hatalarını artırdığı belirtilmiştir. Bu nedenle sıcaklık farklılıklarının SOC tahmini algoritmaları üzerindeki etkileri sayısal olarak modellenmiş ve sıcaklık kompanzasyonlu SOC tahmin algoritması önerilmiştir.

Bu çalışma, tez çalışmasında değerlendirilen SOC tahmin algoritmalarının doğruluğunu artırmak için önerilen sıcaklık referanslı modellemeyi doğrudan desteklemektedir. Ayrıca, batarya modül yerleşimlerinin termal denge üzerindeki etkisini göstermesi açısından, fiziksel paketleme stratejileri ile model doğruluğu arasındaki ilişkiye dikkat çekmektedir. Forklift gibi sık çevrimli çalışan sistemlerde sıcaklık eşitleme algoritmalarının, SOC dengesizliğini minimize ederek sistem verimliliğini artıracığı sonucuna varılmıştır.

Huotari ve çalışma arkadaşları (2021), Li-ion batarya sistemlerinde SOH tahmini için zaman serisi tahminleme yöntemlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, özellikle sahadan toplanmış hücre verileri kullanılarak, farklı makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının uzun dönemli batarya sağlık tahminlerinde ne ölçüde başarılı olduğu ortaya konmuştur. Kullanılan yöntemler arasında Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM), Kapılı Tekrarlayan Birim (Gated Recurrent Unit - GRU), Otokorelasyonlu Entegre Hareketli Ortalama Modeli (Autoregressive Integrated Moving Average – ARIMA), Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression - SVR) ve Rastgele Orman Algoritması (Random Forest) gibi modeller yer almaktadır [36] [24].

Veri setleri, hücre voltajı, sıcaklık, iç direnç ve kapasite verilerini içerecek şekilde yapılandırılmış; tüm modeller aynı giriş parametreleri ile eğitilmiş ve test edilmiştir. Performans metrikleri olarak MAE, RMSE ve MAPE kullanılmıştır. Sonuçlara göre, LSTM modelleri hem kısa dönem hem de uzun dönem tahminlerde en

düşük MAE ve RMSE değerlerini sağlamış; örneğin 500 çevrimlik bir test seti için MAE değeri %1.02, RMSE değeri ise %1.36 olarak raporlanmıştır. Bu değerler, diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlara kıyasla %15–25 daha iyi performansa işaret etmektedir.

GRU algoritmasının da benzer şekilde zaman serisi öğrenme konusunda başarılı sonuçlar verdiği ancak LSTM'ye kıyasla daha hızlı eğitildiği gözlemlenmiştir. Öte yandan klasik regresyon yöntemleri olan ARIMA ve SVR, batarya yaşlanma süreçlerinin doğrusal olmayan karakteristiklerini yakalamakta yetersiz kalmış ve RMSE değerleri %3'ün üzerinde seyretmiştir.

Bu çalışma, MATLAB ortamında gerçekleştirilecek SOC tahmin modellerinin performansını değerlendirme süreci açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Özellikle Simulink veri tabanı üzerinde yürütülen benzetimlerde, LSTM tabanlı algoritmaların uygulanması ile gerçek saha verilerine daha yakın tahmin çıktıları elde edilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca, batarya parametrelerinin zamanla değişimini modelleyerek adaptif algoritmaların geliştirilmesi açısından Huotari et al. çalışması güçlü bir dayanak sunmaktadır.

Salameh ve arkadaşlarının çalışması (1992), kurşun-asit bataryaların matematiksel modellemesi üzerine klasikleşmiş bir yaklaşım sunmakta ve batarya davranışlarını Thévenin eşdeğer devre modeli ile açıklamaktadır. Çalışmada geliştirilen model, sadece bataryanın anlık akım-gerilim ilişkisini değil, aynı zamanda sıcaklık, self-deşarj etkisi ve zamanla değişen iç direnç gibi dinamik parametreleri de hesaba katarak çok boyutlu bir yapıya sahiptir [37].

Modelin doğrulama süreci, üretici verileriyle kıyaslanarak gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamında yapılan çevrim testleriyle desteklenmiştir. Testlerde, kurşun-asit batarya 13 A sabit akımla iki farklı senaryoda deşarj edilmiş ve ardından şarj edilmiştir. İlk senaryoda, batarya 10.5 V gerilim eşiğine kadar deşarj edilmiş, 0°C ortamda 12 saat bekletildikten sonra 15.8 V sabit gerilim limitiyle şarj edilmiştir. İkinci senaryoda ise 11.65 V'a kadar deşarj edilmiş, ardından 13 V'a kadar şarj edilip 35°C sıcaklıkta

bekletilmiştir. Bu iki senaryo karşılaştırıldığında, düşük sıcaklıkta şarj veriminin azaldığı, yüksek sıcaklıkta ise self-deşarj etkisinin belirginleştiği gözlemlenmiştir.

Matematiksel modelin çıktıları, deneysel sonuçlarla büyük oranda örtüşmekte olup, özellikle batarya voltajı ve deşarj süresi tahminlerinde ortalama hata %2'nin altında kalmıştır. Thévenin modeli kapsamında kullanılan direnç (R_0 , R_1) ve kapasitans (C_1) parametreleri, zaman sabiti ($\tau = R_1 \cdot C_1$) üzerinden dinamik yanıt süresiyle ilişkilendirilmiş ve bu parametrelerin sıcaklıkla birlikte değiştiği gösterilmiştir. Bu yönüyle model, farklı çevresel koşullar altında batarya davranışının simülasyonu için oldukça esnek bir yapı sunmaktadır.

Bu çalışma, tez çalışmasında ele alınan eşdeğer devre modellemeleri ve RC parametre çıkarımı süreçleri açısından tarihsel bir temel teşkil etmektedir. Özellikle Li-ion sistemler için geliştirilen RC modellerin öncülü niteliğindeki bu yapı, modern Simulink tabanlı benzetimlerde kullanılan modelleme stratejileri ile büyük benzerlik taşımaktadır. Ayrıca, sıcaklık ve self-deşarj etkisinin model içerisine entegre edilmesi, sizin dinamik SOC tahmin algoritmalarınıza altyapı sağlayacak önemli bir bileşen sunmaktadır.

Zhang ve çalışma arkadaşlarının (2024) 2024 yılında yayımladığı bu derleme, Li-ion batarya hücrelerinin modellemesine yönelik çok ölçekli (multi-scale) yaklaşımları sistematik biçimde ele alarak, fiziksel düzeyde (mikroskobik) başlayıp hücre, modül ve paket düzeyine kadar uzanan model yapılarını kapsamlı biçimde incelemektedir. Çalışma, özellikle bataryaların yapısal özelliklerinin performans ve güvenlik üzerindeki etkisini modelleme perspektifinden değerlendirmesiyle öne çıkmaktadır.

Makalede ele alınan ilk ölçek, parçacık düzeyinde (particle-scale) modellemedir. Bu modelleme türü, anot ve katot materyallerinin iç yapısını, partikül boyutu dağılımını, iyon difüzyonu ve elektron iletimi gibi alt süreçleri atomik veya moleküler düzeyde çözümlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, klasik Fick difüzyon denklemleri, Butler–Volmer kinetiği ve Poisson–Nernst–Planck yaklaşımları kullanılarak hücre içi elektrokimyasal davranış detaylandırılmıştır. Bu tür modeller özellikle Katı Elektrolit

Ara Fazı (Solid Electrolyte Interphase - SEI) tabakasının oluşumu, elektrot bozulması ve performans kaybı mekanizmalarını tahmin etmede önemlidir [38].

İkinci olarak hücre düzeyi modellemeler ele alınmıştır. Burada amaç, tam bir hücrenin akım-gerilim, kapasite ve ısı üretimi gibi makroskobik tepkilerini simüle etmektir. Termal modellerle entegre edilen bu yapılar, hücre içi sıcaklık gradyanlarını ve bu gradyanların batarya verimliliğine olan etkilerini analiz edebilmektedir. Hücre modellemesi kapsamında eşdeğer devre modelleri (ECM) ile fiziksel temelli Pseudo 2 yönlü model (P2D) modeller karşılaştırılmıştır. ECM modeller düşük hesaplama yükü ve gerçek zamanlı tahmin avantajı sağlarken; P2D modeller hücre içi iyon ve elektron dağılımı ile reaksiyon hızlarını detaylıca çözümleyebilmektedir.

Üçüncü düzey ise modül ve paket ölçeğindeki modellerdir. Bu modeller, birden fazla hücrenin elektriksel ve termal bağlantısını içeren sistemleri temsil eder. Çalışmada, hücreler arası termal eşitleme, paket düzeyinde BYS optimizasyonu ve sıcaklık kaynaklı dengesizliklerin SOC ve SOH üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Ayrıca farklı hücre yerleşim stratejilerinin (ör. prizmatik, silindirik, kese) paket davranışına etkisi sayısal olarak modellenmiştir.

Bu çok ölçekli modelleme yaklaşımı, tez çalışmasında kullanılan hücre modelleme, parametre tahmini ve SOC algoritmalarının çok yönlü bir şekilde geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle hücre içi sıcaklık ve iyon dağılımının göz önüne alınması, model doğruluğunu artırmakta; Simulink platformuna taşınabilirliği sayesinde saha verileriyle karşılaştırmalı simülasyonlar yürütülebilmektedir. Zhang et al. (2024) çalışması, batarya modelleme sürecinde ölçekler arası bağlantıların nasıl kurulduğunu göstererek hem fiziksel hem hesaplamalı modelleme için üst düzey bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Moura ve arkadaşları (2017) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, Li-ion batarya sistemlerinde SOC ve SOH tahmini için kısmi diferansiyel denklemlere dayalı fiziksel modellerin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Çalışmada, özellikle P2D model yapısı detaylı olarak ele alınmış, bu yapının batarya hücresi boyunca iyon

yoğunluğu ve potansiyel dağılımını zaman ve konuma bağlı olarak çözüme kavuşturduğu vurgulanmıştır.

P2D modelinin temelinde, negatif ve pozitif elektrot bölgelerinde iyonların difüzyonunu temsil eden Fick yasaları, elektriksel potansiyelin çözümüne yönelik Poisson denklemleri ve reaksiyon kinetiklerinin simülasyonunu sağlayan Butler-Volmer ifadeleri bulunmaktadır. Bu matematiksel yapı, hücre boyunca oluşan konsantrasyon gradyanlarını detaylı şekilde tanımlamakta ve bu sayede hem anlık hem de uzun dönemli batarya davranışlarının modellenmesine imkân tanımaktadır [39].

Moura et al., bu modeli hem sabit akımla (CC) hem de değişken profil altında (darbeli yük – HPPC testleri) çalıştırarak, farklı SOC seviyelerinde potansiyel farklarının ve iç direnç artışlarının zamana bağlı değişimini analiz etmiştir. Modelin çıktıları, deneysel verilerle yüksek korelasyon göstermiş olup %1'in altında MAE ile SOC tahmini gerçekleştirmiştir. Ayrıca, modelin SOH tahmini için de türevi alınmış parametrelerin (örneğin difüzyon katsayısı, maksimum kapasite) zaman içindeki değişimi kullanılmış ve yaşlanma etkilerinin başarılı şekilde izlendiği belirtilmiştir. Bu model, tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon tabanlı SOC karşılaştırmaları için referans olabilecek düzeyde fiziksel temelli yüksek doğruluk sunmaktadır. Özellikle RC modellemeye kıyasla daha karmaşık olsa da, uzun vadeli sistem ömrü modellemesi için gereklidir. MATLAB/Simulink ortamına aktarıldığında hesaplama süresi artmakla birlikte, batarya yaşlanma ve termal etkilerin eşzamanlı izlenebilmesi gibi avantajlar sunmaktadır.

Schimpe ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, farklı Li-ion kimyalarının hücre düzeyinde detaylı şekilde modellenmesini ve karşılaştırmalı analizini kapsamaktadır. Çalışmada LFP, NMC, Lityum Kobalt Oksit (Lithium Cobalt Oxide - LCO) ve Lityum Manganer Oksit (Lithium Manganese Oxide - LMO) gibi yaygın batarya kimyalarının elektriksel, termal ve ömür performansları hücre ölçeğinde modellenmiştir. Modelleme sürecinde ECM ve fiziksel temelli P2D modelleri karşılaştırılmış; her kimya için özgün parametre setleri belirlenmiştir. Bu parametreler arasında OCV eğrileri, sıcaklığa bağlı iç direnç değişimleri, kapasite bozulma eğilimleri ve termal yayılma katsayıları yer almaktadır [40].

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 0.5C, 1C ve 2C deşarj testlerinde, LFP hücrelerin özellikle termal kararlılık ve çevrim ömrü açısından diğer kimyalara göre üstün olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin 2C oranında yapılan testlerde LFP hücrelerin sıcaklık artışı 8.2°C ile sınırlı kalırken, NMC hücrelerde bu artış 14.5°C'ye kadar ulaşmıştır. Ayrıca, LCO hücrelerin enerji yoğunluğu en yüksek olmasına rağmen ısı üretimi ve iç direnç artışına karşı daha savunmasız olduğu saptanmıştır.

ECM modellerinin, hızlı hesaplama avantajı sayesinde Simulink gibi gerçek zamanlı platformlara uygulanabilirliği vurgulanmış; ancak LFP gibi daha yavaş kinetik yapıya sahip hücrelerde P2D model kullanımının doğruluğu artırdığı belirtilmiştir. Çalışma, hücre yapısının ve kimyasal bileşimin model seçimindeki etkisini ayrıntılı olarak ortaya koymuş, hücre tipi ve uygulama senaryosuna göre model tercihinin yapılması gerektiğini öne sürmüştür [23].

Bu makale, tez çalışmasında kullanılan hücrelerin (örneğin LFP) parametrelerine dayalı modelleme sürecini doğrudan desteklemektedir. Ayrıca, Simulink platformunda ECM ile gerçekleştirilen simülasyonların hangi hücre kimyası için ne kadar doğru sonuç verdiğinin anlaşılmasını kolaylaştıracak sayısal karşılaştırmalar içermektedir. LFP hücrelerin sıcaklık etkisine karşı dayanıklı yapısı da, forklift uygulamalarındaki güvenlik ve doğruluk talepleriyle birebir örtüşmektedir.

Barai ve arkadaşlarının (2018) çalışması, Li-ion bataryalarda iç direnç ölçüm yöntemlerinin doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve uygulama koşullarına göre farklılığını detaylı biçimde incelemiştir. Özellikle Hücre Empedans Spektroskopisi (EIS), Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC), Doğru Akım (DC) yükleme ve Alternatif Akım (AC) sinyal yöntemleri, aynı hücre üzerinde farklı çevrimlerde test edilerek karşılaştırılmıştır. Çalışmada 18650 tipi hücreler kullanılmış; testler 25 °C sabit sıcaklıkta ve 3 farklı SOC seviyesinde (30%, 60%, 90%) gerçekleştirilmiştir. HPPC yönteminde, 10 saniyelik akım darbeleri uygulanarak gerilim düşümü üzerinden R0 ve R1 değerleri hesaplanmış; EIS yöntemi ile 10 mHz - 10 kHz aralığında kompleks empedans spektrumu elde edilmiştir. Sonuçlar, HPPC yöntemi ile elde edilen iç dirençlerin SOC'ye oldukça duyarlı olduğunu ve düşük SOC seviyelerinde daha yüksek değerler verdiğini ortaya koymuştur [41].

AC sinyal yöntemiyle 1 kHz'de elde edilen iç direnç, R0 bileşeni ile yüksek korelasyon göstermiş; ancak bu yöntemin RC parametreleri çözümlemede yetersiz kaldığı belirtilmiştir. EIS yöntemi ise tüm direnç bileşenlerini (ohmik, polarizasyon, geçici direnç) ayrı ayrı ortaya koyabilmesi açısından en detaylı çözümü sunmuştur. Ancak test süresinin uzunluğu ve özel donanım ihtiyacı nedeniyle sahada uygulanabilirliği sınırlıdır.

Barai et al. çalışması, tez çalışmasında HPPC test verileri üzerinden ECM parametrelerinin çıkarılması süreci için doğrudan teknik dayanak sağlamaktadır. Özellikle test süresinin kısa olması ve endüstriyel ortamlarda kolayca uygulanabilmesi nedeniyle HPPC yönteminin saha uygulamalarında tercih edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada değinilen sıcaklık ve SOC bağımlılıkları, parametrik modelleme doğruluğu açısından dikkate alınmalıdır.

Bu tez çalışmasında, elektrikli forklift uygulamalarında kullanılan Li-ion bataryaların SOC tahminine yönelik kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın temel amacı, farklı SOC tahmin algoritmalarının (OCV, CC, EKF, UKF ve AEKF) doğruluklarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Gerçek saha verileri üzerinden analizler gerçekleştirilecek, aynı yük profilleri laboratuvar ortamında eşdeğer hücrelere uygulanarak simülasyon doğrulamalarının yapılması amaçlanmaktadır.

Bu sayede hem deneysel hem de benzetim tabanlı sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş, tahmin algoritmalarının çeşitli koşullardaki performansı ayrıntılı biçimde ortaya konulması düşünülmektedir. Ayrıca, elde edilen bulgular sektörel olarak yoğun çevrimde çalışan forklift bataryaları için daha güvenilir enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2 GENEL BİLGİLER VE TANIMLAMALAR

Elektrikli forkliftlerde kullanılan enerji depolama sistemleri, performans, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle Li-ion bataryalar, geleneksel kurşun-asit sistemlere göre daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun çevrim ömrü ve daha kısa şarj süreleri gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu çalışmada kullanılan batarya sisteminin teknik temellerini daha iyi kavrayabilmek adına, öncelikle batarya türleri, yapısal bileşenler, forklift uygulamalarındaki görev profilleri ve kullanılan terminolojilere dair temel bilgiler sunulacaktır.

2.1 Batarya Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisinin ihtiyaç duyulan anda kullanılabilmesi için geçici olarak depolanmasını sağlayan teknolojilerdir. Günümüzde bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, mobilite çözümleri ve sanayi uygulamaları açısından kritik bir öneme sahiptir. Elektrikli forkliftler gibi hareketli endüstriyel araçlarda ise enerji depolama sistemleri, aracın tüm tahrik ve yardımcı sistemlerinin sürekliliğini sağlamakla görevlidir. Bu bağlamda, elektro-kimyasal depolama sistemleri (özellikle şarj edilebilir bataryalar) en yaygın kullanılan çözümler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılan kurşun-asit ve Li-ion teknolojilerine odaklanılarak enerji depolama sistemlerinin temel ilkeleri ve kullanım alanları detaylandırılacaktır.

2.2 Elektrikli Forkliftlerde Enerji Depolama Sistemleri

Elektrikli forkliftler, içten yanmalı motorlu muadillerine kıyasla daha düşük işletme maliyetleri, daha az bakım gereksinimi ve sıfır emisyon avantajları sayesinde endüstriyel taşıma ve istifleme operasyonlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu araçların performansını ve operasyonel sürekliliğini doğrudan etkileyen temel unsur ise kullanılan enerji depolama sistemidir. Forkliftlerde enerji, genellikle şarj edilebilir batarya sistemleri ile sağlanır ve bu sistemler; enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj süresi, güvenlik ve maliyet gibi kriterler açısından uygulamaya özel olarak seçilir. Günümüzde en yaygın kullanılan batarya teknolojileri kurşun-asit ve Li-ion temellidir. Bu alt başlık altında, forkliftlerde tercih edilen enerji depolama teknolojilerinin teknik özellikleri ve uygulama avantajları detaylı şekilde ele alınacaktır.

2.2.1 Kurşun-Asit Aküler

Bu tez çalışmasında, elektro-kimyasal enerji depolama sistemleri içerisinde tarihsel olarak en köklü geçmişe ve günümüzde hâlâ yaygın bir kullanım alanına sahip olan kurşun-asit aküler göz önünde bulundurulmuştur. İlk defa 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Planté tarafından keşfedilen kurşun-asit aküler, enerji depolama teknolojileri alanında geliştirilen ilk şarj edilebilir batarya tipi olma özelliğini taşımaktadır. Aradan geçen uzun sürede, kurşun-asit teknolojisi sürekli olarak evrilmiş gerek malzeme bilimi gerekse üretim süreçleri açısından birçok iyileştirme ile bugünkü endüstriyel formuna ulaşmıştır [6].

Günümüzde kurşun-asit aküler; otomotiv sektöründe marş, aydınlatma ve ateşleme sistemlerinde (SLI), endüstriyel taşıma araçlarında (özellikle forkliftler ve yer temizleme makineleri), kesintisiz güç kaynaklarında (UPS), telekom altyapılarında, sinyalizasyon sistemlerinde ve yenilenebilir enerji destekli enerji depolama çözümlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu geniş uygulama yelpazesi, kurşun-asit akülerin hem teknik uygunluğu hem de ekonomik avantajları ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 2.1 12 V kurşun-asit otomobil aküsü görüntüsü

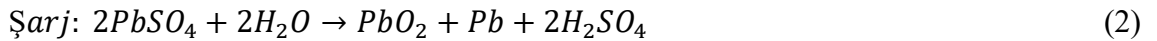
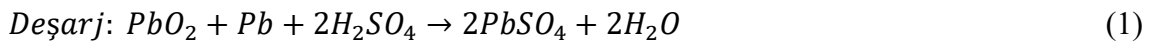
Teknolojinin görece olarak düşük maliyetli oluşu, geniş çapta erişilebilirliği, kolay üretilebilirliği, olgunlaşmış ve global ölçekte yaygınlaşmış üretim altyapısına sahip olması; kurşun-asit aküleri halen tercih edilir kılmaktadır. Ayrıca yüksek akım verme yetenekleri, düşük iç dirençleri sayesinde ani enerji ihtiyaçlarına cevap verebilmeleri, bazı uygulamalar için vazgeçilmez olmalarını sağlamaktadır. Özellikle

kısa sürede yüksek akım gerektiren marş motorları gibi sistemlerde kurşun-asit aküler halen Li-ion gibi modern alternatiflerle rekabet edebilir durumdadır.

Diğer yandan, kurşun-asit akülerin neredeyse %98 oranında geri dönüştürülebilir bir yapıya sahip olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Geri dönüşüm süreci sayesinde hem kurşun hem de polipropilen gibi değerli malzemelerin tekrar kullanıma kazandırılması mümkün olmakta, bu da doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına ve atık yönetiminin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle kurşun-asit aküler, hem ekonomik hem de çevresel açıdan döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyum göstermektedir. Ancak bu olumlu özelliklerine rağmen, uygun şekilde toplanmayan, taşınmayan veya geri dönüştürülmeyen kurşun-asit aküler çevre ve insan sağlığı açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Özellikle kurşun, ağır metal olması nedeniyle toprak, su ve hava kaynaklarını kalıcı şekilde kirlitebilmekte; bu da hem ekosistem hem de halk sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Ayrıca, akü içerisindeki sülfürik asit sızıntıları toprağın pH dengesini bozarak tarım alanlarını verimsiz hâle getirebilirken, yanlış şarj uygulamaları sırasında açığa çıkan hidrojen gazı da patlayıcı özellik göstermektedir. Dolayısıyla, kurşun-asit akülerin geri dönüştürülebilirliği önemli bir çevresel avantaj sağlasa da, bu avantajın ancak doğru atık yönetimi, yasal denetimler ve güvenli geri dönüşüm altyapıları ile birlikte anlam kazandığı unutulmamalıdır.

2.2.1.1 Tanım ve Çalışma Prensipleri

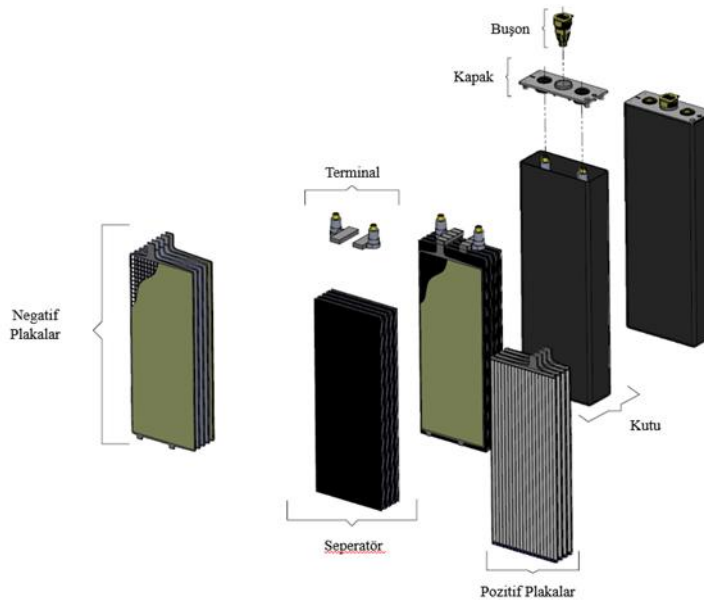
Kurşun-asit akü, pozitif elektrot olarak kurşun dioksit (PbO_2), negatif elektrot olarak ise sünger kurşun (Pb) kullanılarak çalışan ikincil (şarj edilebilir) bir batarya sistemidir. Elektrolit olarak seyreltik sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi kullanılır. Deşarj sürecinde hem pozitif hem de negatif elektrotlar kurşun sülfata ($PbSO_4$) dönüşürken elektrik enerjisi açığa çıkar. Şarj işlemiyle bu dönüşüm tersine çevrilir ve elektrotlar eski haline geri döner: [6]



Bu reaksiyon sırasında elektronların dış devredeki akışı, enerji sağlanmasını mümkün kılar. Kurşun-asit aküler, bu yönüyle elektro-kimyasal enerji dönüşüm sistemlerinin temel örneklerinden biridir. Bu tez çalışmasında elektrikli forkliftlerde kullanılan kurşun asit akü türü olan endüstriyel aküler hakkında detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıkta verilmiştir.

2.2.1.2 Endüstriyel Akü Yapısal Bileşenleri

Endüstriyel kurşun-asit aküler, temel olarak bir dizi elektro-kimyasal bileşenden oluşur. Pozitif elektrotu oluşturan pozitif plaka (PbO_2), deşarj sırasında kurşun sülfata dönüşerek elektron verir. Negatif plaka (Pb) ise süngerimsi yapısıyla yüksek yüzey alanı sunar ve elektronları alarak reaksiyon verimini artırır. Bu iki elektrotun doğrudan temas ederek kısa devre yapmasını önlemek amacıyla, aralarına mikro gözenekli yapıya sahip polimer esaslı separatörler yerleştirilir. Bu separatörler, iyonların serbestçe geçişine izin verirken elektriksel yalıtımı sağlar. Elektrolit olarak kullanılan sulu sülfürik asit çözeltisi ise iyon iletkenliğini sağlar ve şarj-deşarj döngüleri boyunca konsantrasyonu değişiklik gösterir. Tüm bu iç bileşenler, genellikle kimyasallara karşı dirençli polipropilen (PP) gibi plastik malzemelerden üretilmiş kutu ve kapaklarla çevrelenerek korunur. Akünün elektriksel bağlantısını sağlamak üzere kollektörler ve terminaller kullanılır. Bu bileşenlerin her biri akünün performansını doğrudan etkiler. Örneğin, pozitif plakadaki aktif madde dökülmesi veya elektrolit yoğunluğundaki değişim, kapasite kaybına neden olabilir.



Şekil 2.2 2 V Endüstriyel kurşun-asit akü temel bileşenleri

Kurşun-asit aküler, farklı işlevsel bileşenlerin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle yapılandırılır. Bu bileşenlerin her biri, akünün enerji depolama kapasitesi, çevrim ömrü ve genel performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Tablo 2.1’de, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan 4 PzS (Tübüler Plaka-Panzerplatte Zelle) 500 tipinde bir kurşun-asit akünün yaklaşık malzeme ve bileşen oranları verilmektedir. Bu oranlar, akünün yapısal ve kimyasal bütünlüğünü sağlamak üzere optimize edilmiştir ve akü tasarımında dikkate alınması gereken önemli mühendislik parametrelerini yansıtmaktadır.

Tablo 2.1 Akü malzeme/bileşen oranları

Malzeme/Bileşen	Yaklaşık Ağırlık Oranı (%)
Aktif Malzeme (Pb,PbO ₂)	45-50
Izgaralar	25-30
Elektrolit (H ₂ SO ₄)	10-15
Kutu-Kapak (PP veya PE)	4-6
Separatör	1-2
Terminal	1-2

2.2.1.2.1 Plakalar

Endüstriyel kurşun-asit akülerde plakalar, enerji depolama kapasitesini ve çevrim ömrünü belirleyen temel elektrot bileşenlerdir. Bu tür akülerde pozitif ve negatif olmak üzere iki farklı plaka tipi bulunur ve her biri özgün bir yapıya sahiptir. Özellikle traksiyoner uygulamalarda, pozitif plakalar tübüler (boru tipi) yapıdadır ve bu tasarım, aktif maddenin yerinde kalmasını sağlayarak uzun çevrim ömrü ve derin deşarj dayanımı sunar.

Tübüler pozitif plakalar, merkezi bir kurşun alaşımlı taşıyıcı (spine) çevresine yerleştirilmiş dikey tüplerden oluşur. Bu tüpler, polietilen veya cam elyaf esaslı gözenekli yapılarla sarılır ve içerisine PbO bazlı aktif madde doldurulur. Böylece aktif madde, mekanik olarak sabitlenmiş olur ve deşarj/şarj döngülerinde oluşabilecek dökülmelere karşı direnç kazanır. Bu yapı sayesinde pozitif aktif maddenin bozulması minimize edilir, bu da akünün uzun servis ömrüne katkı sağlar.

Negatif plakalar ise genellikle düz yapıdadır ve süngerimsi Pb içeren aktif maddeyle sıvanmış ızgaralardan oluşur. Yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapı, elektrokimyasal reaksiyonların verimini artırır. Negatif plakalar, pozitif plakalarla alternatif şekilde dizilir ve aralarına mikro gözenekli separatörler yerleştirilerek kısa devre önlenir.

Plaka üretiminde kullanılan ızgara tasarımı, kurşun alaşımı türü (örn. düşük antimonlu, selenyumlu ya da kalsiyumlu), aktif madde katkıları (lignosülfonat, baryum sülfat, karbon vb.) ve üretim prosesleri (sıvama, kurutma, formasyon) akü performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Tübüler plaka teknolojisi, özellikle yüksek derinlikte deşarj edilen ve günlük şarj döngüsüne maruz kalan forklift, temizlik makinesi ve endüstriyel taşıyıcı uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.2.1.2.2 Plaka Izgaraları ve Aktif Madde

Akü içerisinde elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan ve akünün kapasitesini doğrudan etkileyen aktif madde, PbO ve çeşitli kimyasal katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bir pasta formundadır. Bu bileşen, aktif madde olarak tanımlanır ve pozitif plakada formasyon işlemi sonucunda PbO₂, negatif plakada ise Pb halini alarak elektrot yüzeyini oluşturur.

Aktif maddenin uygulanacağı taşıyıcı yapı olan ızgara, plakaların mekanik bütünlüğünü sağlar ve aynı zamanda akım taşıyıcı görev üstlenir. Traksiyoner akülerde pozitif plakalar genellikle tübüler tipte tasarlanmakta olup, bu yapı içerisinde ızgara görevi gören merkezi kurşun alaşımlı omurga, tüp şeklindeki gözenekli yapılarla çevrelenir. Bu tüplerin içerisine aktif madde doldurularak, titreşim ve döngü kaynaklı malzeme kayıplarının önüne geçilir.

Izgaralar, talep edilen kapasiteye, çevrim ömrüne ve uygulama şartlarına göre farklı alaşımlarla üretilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda genellikle düşük antimonlu kurşun alaşımları, bazı durumlarda selenyum, gümüş veya kalsiyum katkılı sistemler tercih edilmektedir. Bu alaşımlar, özellikle pozitif plakada korozyon direncini artırmak, negatif plakada ise hidrojen gazı oluşumunu sınırlamak ve uzun ömürlü performans sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

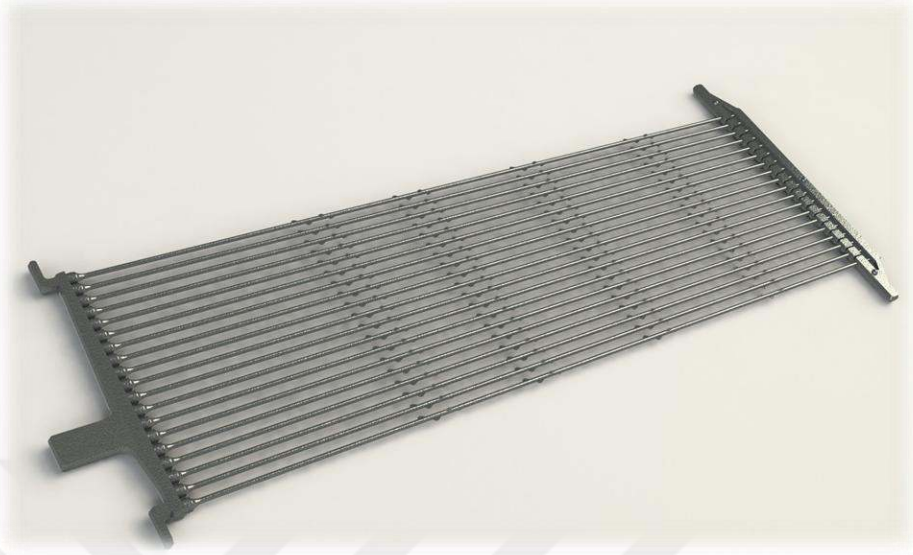
Aktif madde, üretim sürecinde ızgaraya mekanik olarak uygulanmakta ve ardından plaka kurutulup formasyon şarjı adı verilen ilk şarj işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sırasında pozitif ve negatif aktif maddeler nihai elektrokimyasal yapısına dönüşürken, ızgara ile aktif madde arasında elektriksel iletkenlik sağlanır. Böylece hem enerji depolama hem de akım iletimi açısından plakanın işlevselliği tamamlanmış olur.

Endüstriyel akülerde ızgara kalınlığı ve geometri tasarımı, kullanım amacına göre optimize edilmektedir. Derin deşarj döngülerine maruz kalan uygulamalarda, örneğin forkliftler veya temizlik makinelerinde kullanılan akülerde, kalın ve sağlam yapılı ızgaralar tercih edilir. Bu sayede yüksek döngü ömrü ve mekanik stabilite elde edilir. Kısa süreli yüksek akım gerektiren uygulamalar için ise daha ince yapılı, hızlı akım iletimine uygun ızgaralar kullanılabilmektedir.

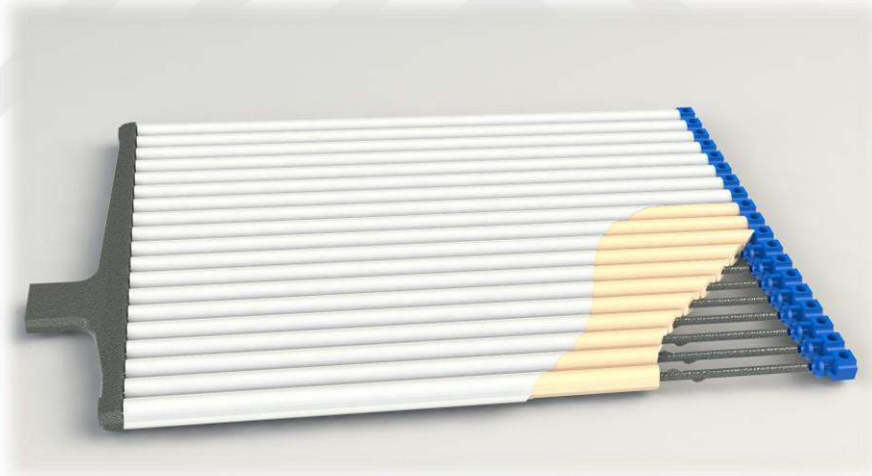
2.2.1.2.3 Pozitif Plaka

Pozitif plakalar, endüstriyel kurşun-asit akülerde enerji depolama ve kimyasal reaksiyonların temel taşıyıcısı olan bileşenlerden biridir. Bu plakalarda kullanılan aktif madde, şarjlı durumda PbO_2 formundadır. Pozitif plaka, iç yapısında bir kurşun alaşımli taşıyıcı ızgara ve bu ızgaranın çevresini saran aktif madde hamurundan oluşur. Traksiyoner akülerde yaygın olarak kullanılan tübüler plaka teknolojisi, aktif maddenin sabitlenmesini ve döngü ömrünün uzamasını sağlar. Bu yapı sayesinde pozitif aktif madde, gauntlet adı verilen tübüler kılıf içerisine yerleştirilmiş kurşun alaşımli omurganın etrafında güvenli şekilde muhafaza edilir [6].

Pozitif aktif madde, PbO ve sülfürik asidin reaksiyonu sonucu oluşan ve katkı maddeleriyle zenginleştirilmiş bir hamurdan elde edilir. Formasyon işlemi sonrasında bu hamur, PbO_2 formuna dönüşerek elektrokimyasal olarak aktif hâle gelir. Bu madde, yüksek oksidasyon potansiyeline sahip olup, şarj ve deşarj sırasında akım üretiminin temelini oluşturur. Kurşun dioksitin kimyasal yapısı gereği, pozitif plakalar karakteristik olarak koyu kahverengi bir renge sahiptir.



Şekil 2.3 PzS tipindeki bir pozitif ızgara



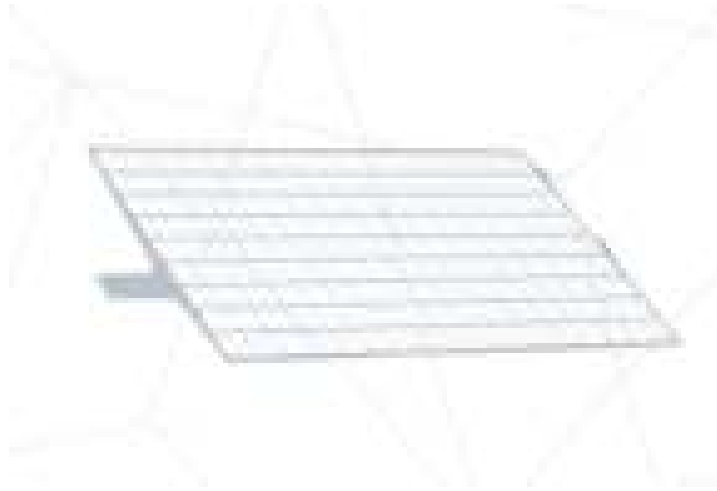
Şekil 2.4 Pozitif plaka örneği (gauntlet, ızgara ve aktif malzeme)

Pozitif plakaların renk, yoğunluk ve gözeneklilik gibi fiziksel özellikleri; üretim sürecindeki kurutma, yaşlandırma ve formasyon parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Özellikle aktif madde karışımında kullanılan katkıları (örneğin baryum sülfat, lifli bağlayıcılar) bu özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Plakanın renk tonunun homojenliği ve yapısal bütünlüğü, üretim kalitesinin ve elektrokimyasal verimliliğin bir göstergesi olarak kabul edilir.

2.2.1.2.4 Negatif Plaka

Endüstriyel kurşun-asit akülerde negatif plakalar, elektrokimyasal sistemin elektron alma yarı tepkimesinin gerçekleştiği elektrot yapılarıdır. Bu plakalar, kurşun esaslı bir taşıyıcı ızgara ve üzerine uygulanan aktif madde karışımından oluşur. Negatif aktif madde, şarjlı durumda süngerimsi yapıya sahip saf Pb formundadır. Süngerimsi yapı, yüksek yüzey alanı sayesinde iyon transferini kolaylaştırarak elektrokimyasal reaksiyon verimini artırır ve akünün yüksek deşarj performansına katkı sağlar.

Negatif plakaların taşıyıcı ızgaraları, genellikle düşük antimonlu veya kalsiyum alaşımlı kurşun malzemeden üretilir. Bu alaşımlar, ızgara korozyonunu minimize ederken aynı zamanda hidrojen gazı oluşumunu kontrol altına almak amacıyla tercih edilmektedir. Negatif aktif madde, PbO esaslı pasta formunda hazırlanır ve içerisine karbon, lignosülfonat ve baryum sülfat gibi katkıları eklenerek iletkenlik, yapısal stabilite ve şarj kabul oranı artırılır. Bu karışım, mekanik yollarla (presleme veya sıvama yöntemiyle) ızgara yüzeyine uygulanır ve daha sonra kurutularak formasyon işlemine alınır. Formasyon şarjı sırasında aktif madde, PbO'dan süngerimsi Pb formuna indirgenerek nihai elektrokimyasal yapısına kavuşur.



Şekil 2.5 Negatif ızgara yapısı

Kimyasal bileşimi ve mikroyapısı nedeniyle, negatif plakalar açık gri renkli bir görünüm sergiler. Bu renk, aktif maddenin saf kurşun yapısından kaynaklanmaktadır. Renk homojenliği, plaka üretim sürecinin ve formasyon işleminin kalitesi hakkında önemli bir göstergedir.

Endüstriyel akü uygulamalarında, negatif plakalar genellikle pozitif plakalarla aynı sayıda bulunmazlar. Akü eleman setinin en dış plakaları yarım negatif plaka ile donatılır. Yarım negatif plakalar, eleman setinin iç tarafında kullanılan tam negatif plakalara göre daha ince ve daha hafiftir. Böylece pozitif plakaların tüm yüzeyleri, negatif plaka yüzeyleri ile eşleştirilerek tam bir karşılık hali elde edilir. Plakaların arasına yerleştirilen separatörler ile kısa devre riski ortadan kaldırılırken, iyon geçişine olanak sağlanır.

2.2.1.2.5 Elektrolit

Endüstriyel kurşun-asit akülerde, elektrotlar arasında iyon taşınımını sağlayan ve elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği iletken ortam elektrolit olarak adlandırılmaktadır. Elektrolit, pozitif ve negatif plakaların tamamen içerisine daldırıldığı, iyonların (H^+ ve SO_4^{2-}) taşınmasını mümkün kılan sıvı fazı oluşturur. Bu ortam, saf su ile seyreltilmiş H_2SO_4 çözeltisinden meydana gelir.

Tam şarjlı bir endüstriyel kurşun-asit aküde elektrolit yoğunluğu genellikle 1,260 g/cm³ ile 1,290 g/cm³ aralığındadır. Bu yoğunluk değerleri, içerisindeki sülfürik asit oranına doğrudan bağlıdır. Örneğin, 1,260 g/cm³ yoğunluktaki bir çözeltide yaklaşık %65 saf su ve %35 sülfürik asit bulunurken, 1,290 g/cm³ yoğunluktaki bir çözeltide bu oranlar sırasıyla %62 ve %38 seviyelerindedir.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan pozitif ve negatif plakaların aktif madde yapısındaki sülfat içeriği, formasyon şarjı öncesinde aküye eklenecek elektrolitin başlangıç yoğunluğunu belirler. Bu nedenle, ilk elektrolit dolumunda genellikle 1,225 g/cm³ ila 1,235 g/cm³ aralığında yoğunluğa sahip sülfürik asit çözeltisi tercih edilir. Bu değerler, formasyon işlemi sırasında elektrolitin konsantrasyonunun kontrollü olarak artması ve aktif maddenin tam dönüşümünü sağlamak amacıyla seçilmektedir.

Elektrolit yoğunluğu, birim hacimdeki sıvının kütlesi olarak tanımlanır ve sahada yaygın şekilde kullanılan dijital yoğunluk ölçer ile ölçülür.



Şekil 2.6 Asit yoğunluk ölçüm cihazları

Elektrolit yoğunluğu, akünün performansı üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Yüksek yoğunluğa sahip bir elektrolit, daha yüksek voltaj ve ani akım (marş) kapasitesi sağlayabilirken, aynı zamanda negatif plakadaki süngerimsi kurşunun çözünmesine neden olarak plaka yıpranmasını hızlandırır. Öte yandan, çok düşük yoğunluklu elektrolitler ise akünün çıkış voltajını ve kapasitesini sınırlandırır, ayrıca daha büyük hacim gereksinimi doğurarak hücre tasarımında verimliliği düşürebilir.

Bu nedenlerle, endüstriyel akü tasarım ve üretim süreçlerinde elektrolit yoğunluğu ve miktarının optimum sınırlar içerisinde tutulması büyük önem taşımaktadır. Yoğunluk değerleri, çevrim ömrü, kapasite ve gaz oluşumu gibi performans parametreleriyle doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle üretim reçetesinde hassas şekilde kontrol edilmelidir.

2.2.1.2.6 Separatör

Endüstriyel kurşun-asit akülerde pozitif ve negatif plakalar arasına yerleştirilen, hücre içindeki kısa devre riskini ortadan kaldırmak ve plakaları fiziksel olarak birbirinden ayırmak amacıyla kullanılan yalıtkan yapılar separatör olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar yalnızca mekanik ayırma işleviyle sınırlı olmayıp, aynı zamanda iyon iletimine izin verecek geçirgenlikte tasarlanmalıdır. Böylece elektrokimyasal reaksiyonlar kesintiye uğramadan devam ederken, elektrotlar arasında doğrudan elektriksel temas engellenmiş olur. Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen separatör türü, polietilen (PE) esaslı tipi yapılardır. Bu yapılar, pozitif plakayı üç yönden sararak kenarlardan kaynaklanabilecek kısa devre riskini azaltmakta ve aynı

zamanda titreşim, darbe ve döngüsel zorlanmalara karşı üstün mekanik dayanım sağlamaktadır.



Şekil 2.7 Endüstriyel akülerde kullanılan separatör görseli

Separatörlerin performansı, iç direnç, elektrolit tutma kapasitesi, porozite düzeyi ve oksidatif stabilite gibi çeşitli kriterlerle değerlendirilir. Düşük iç direnç, hücredeki gerilim kayıplarını azaltırken, yüksek elektrolit absorpsiyon kabiliyeti plakaların aktif alanlarıyla daha etkin temas sağlar. Aynı şekilde, yüksek porozite değeri iyonların serbestçe geçişine olanak tanırken, yapının mekanik dayanıklılığı, çevrim ömrü boyunca formunu koruyarak güvenilir çalışmayı mümkün kılar. Özellikle pozitif plaka çevresinde oluşabilecek kimyasal bozulmalara karşı gösterilen oksidatif direnç, separatör ömrünü belirleyen kritik faktörlerden biridir.

Günümüzde Polivinil Klorür (PVC), kâğıt, cam elyafı gibi farklı malzemelerle üretilmiş alternatif separatörler bulunsa da, endüstriyel traksiyoner akülerde yüksek çevrim ömrü, düşük iç direnç ve üretim kolaylığı gibi nedenlerle polietilen esaslı zarf tipi separatörler ön plana çıkmaktadır. Bu yapıların pozitif plakalarla gösterdiği yüksek uyum, özellikle ağır hizmet uygulamalarında güvenli ve uzun ömürlü bir performans sunmaktadır.

2.2.1.2.7 Kutup Başları (Terminaller)

Kurşun-asit akülerde, elektrik enerjisinin dış devreye aktarılması ve şarj işleminin gerçekleştirilmesi, pozitif (+) ve negatif (–) olmak üzere iki kutup terminali aracılığıyla sağlanır. Bu kutuplar, hücre içindeki elektrokimyasal sistemin harici bağlantı noktalarını oluşturur. Pozitif kutup, akü içindeki pozitif plakaların aynı kutup bölmesinde bir araya getirilmesi ve bu plakaların kurşun köprülerle birbirine bağlanması sonucu oluşur. Bu bağlantılar genellikle alevle kurşun kaynağı ya da otomatik döküm kaynağı gibi yöntemlerle yapılır. Pozitif plakalardan toplanan akım, bu birleşim noktalarından geçerek akü kapağı üzerindeki pozitif terminale ulaşır.

Pozitif kutup genellikle kalın kesitli yapılır ve üzerine “+” işareti eklenerek veya kırmızı bir boya sürülerek hem üretim hem de kullanım sırasında yanlış bağlantı yapılmasının önüne geçilir. Endüstriyel uygulamalarda, bu terminallerin çevresinde polariteyi göstermek amacıyla renkli işaretleme (örneğin kırmızı veya turuncu) de kullanılır. Aynı yapı prensibi, negatif plakalar ve negatif kutup için de geçerlidir. Her iki kutup, akünün güvenli şekilde şarj edilmesi ve enerji sağlanması açısından son derece kritik olup, elektriksel iletkenlik, termal dayanım ve mekanik bütünlük açısından kalite kontrol süreçlerine tabi tutulur. Akü kutuplarının montajında kullanılan kaynak yönteminin kalitesi, terminal sıcaklık artışı, iç direnç ve uzun dönem performans üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle endüstriyel akü üretiminde kutup birleştirme ve terminal kaynak işlemleri, otomasyonla desteklenen hassas prosesler arasında yer almaktadır.

2.2.1.2.8 Kutu ve Kapaklar

Endüstriyel kurşun-asit akülerde kullanılan kutu ve kapak yapıları, hücrelerin güvenli biçimde muhafaza edilmesi, dış ortam koşullarına karşı korunması ve elektrolitin sızdırılmadan sistem içerisinde tutulması amacıyla özel malzemelerden üretilmektedir. Bu bileşenler, kimyasal dayanımı yüksek, mekanik olarak sağlam ve elektriksel olarak yalıtkan malzemelerden oluşur. Günümüzde traksiyoner tip akülerde en yaygın kullanılan malzeme, PP esaslı plastiklerdir. Polipropilen hem enjeksiyon kalıplama hem de presleme yöntemleriyle işlenebilir olup, asit ve sıcaklık gibi zorlu ortam koşullarına karşı üstün direnç göstermektedir. Ayrıca hafifliği, darbelere karşı

dayanıklılığı ve geri dönüştürülebilir yapısı sayesinde endüstriyel akü kutularında tercih sebebidir.

Kutu ve kapak yapılarının tasarımında, sadece sızdırmazlık değil aynı zamanda mekanik bütünlük, kutup çıkışlarının yalıtımı, gaz tahliye sistemlerinin entegrasyonu ve montaj kolaylığı gibi kriterler de göz önünde bulundurulmaktadır. Elektrolit ile sürekli temas hâlinde olan iç yüzeylerin sızıntıya ve çatlamaya karşı dirençli olması, akünün servis ömrünü doğrudan etkileyen faktörlerden biridir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda kullanılan kutular, çevrim döngüleri, sıcaklık dalgalanmaları ve fiziksel darbelere karşı yapısal stabilite sunmalıdır.

Traksiyoner akülerde, genellikle her bir hücre ayrı bir kutu içerisinde yer almakta ve her hücreye ait kapak bireysel olarak uygulanmaktadır. Bu yapı, hem bakım hem de modülerlik açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak bazı özel uygulamalarda, birden fazla hücreyi aynı kutu içerisinde barındıran sistemlerde ortak tek parça kapak tasarımı da tercih edilebilmektedir. Kapağın tasarımı müşteri taleplerine, hücre boyutlarına ve kutup yerleşimlerine göre özelleştirilebilmektedir. Geleneksel olarak kullanılan sert ebonit esaslı kapaklar ise özel uygulamalar veya daha büyük hacimli sistemlerde hâlâ kullanılmakta olup, yüksek sıcaklık dayanımı ve asit buharlarına karşı direnç gibi avantajlar sunmaktadır.

Endüstriyel akü kutu ve kapaklarının üretimi sırasında kalite kontrol, özellikle sızdırmazlık testleri, darbe dayanımı ve malzeme kalınlığı gibi parametreler açısından titizlikle yürütülmektedir. Bu yapıların güvenilirliği hem kullanıcı güvenliği hem de akü performansı açısından kritik öneme sahiptir.

2.2.2 Lityum-İyon Aküler

Li-ion bataryalar, yeniden şarj edilebilen elektro-kimyasal enerji depolama sistemleri arasında günümüzde en çok tercih edilen teknolojilerden biridir. Yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik, uzun çevrim ömrü, düşük bakım gereksinimi ve yüksek şarj-deşarj verimliliği gibi avantajları sayesinde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara, yenilenebilir enerji depolama sistemlerinden endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Li-ion bataryalar, elektrot yapılarında kullanılan malzemelere göre farklı kimyasal türlere ayrılır. Bunlar arasında en yaygın olanlar; LCO, NMC, Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA), LFP ve LTO gibi kimyalardır. Bu kimyasal türlerin her biri enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, güvenlik, maliyet ve sıcaklık dayanımı açısından farklı avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır.

Aşağıdaki tabloda yaygın Li-ion kimyalarının karşılaştırması sunulmuştur:

Tablo 2.2 Yaygın Lityum-İyon Batarya Kimyalarının Karşılaştırması

Kimya	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Güvenlik	Termal Stabilité	Maliyet	Kullanım Alanı
LCO	150–200	500–1000	Düşük	Düşük	Yüksek	Akıllı telefon, dizüstü bilgisayar
NMC	150–220	1000–2000	Orta	Orta	Orta	EV, enerji depolama
NCA	200–260	1000–1500	Orta	Orta	Orta-Yüksek	Tesla, EV
LFP	90–160	2000+	Yüksek	Yüksek	Düşük	Forklift, enerji depolama
LTO	70–90	3000+	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Hızlı şarj, endüstriyel uygulama

Bu çalışma kapsamında, Li-ion ailesi içerisinde özellikle LFP kimyası detaylı olarak ele alınacaktır. LFP hücreler, yüksek termal kararlılıkları, uzun çevrim ömürleri ve güvenlik avantajları sayesinde elektrikli forkliftler gibi ağır hizmet tipi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. LFP hücrelerde anot malzemesi olarak grafit, katot malzemesi olarak ise Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4) kullanılır. Hücre voltajı yaklaşık 3.2 V olup, seri bağlama ile istenen sistem voltajları elde edilebilir.

LFP bataryaların enerji yoğunluğu NMC veya LCO gibi kimyalara göre daha düşük olsa da, forklift gibi boyut kısıtının öncelikli olmadığı uygulamalarda bu durum önemli bir dezavantaj oluşturmaz. Aksine, yüksek çevrim ömrü, %95 üzeri şarj verimliliği, bakım gerektirmemesi ve fırsat şarja uygunluğu gibi özellikleri sayesinde

daha verimli bir operasyon sağlar. Ayrıca derin deşarjlara karşı dayanıklılıkları sayesinde nominal kapasitelerinin büyük bölümü aktif olarak kullanılabilir.

Ancak bu sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için hücre bazlı voltaj, sıcaklık ve akım takibi zorunludur. Bu nedenle LFP batarya sistemleri, gelişmiş kontrol ve güvenlik algoritmaları barındıran BYS ile birlikte kullanılmalıdır. LFP hücreler; prizmatik, silindirik ve kese tipi (pouch) formlarda üretilebilir ve uygulamaya göre uygun paketleme yapılır.



Şekil 2.8 Li-ion bataryaların tipleri sırasıyla silindirik, prizmatik ve kese tipi [43]

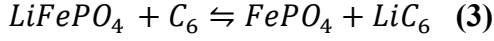
LFP kimyasının önemli avantajlarından biri de yüksek güvenlik düzeyidir. Termal kaçak riski düşük olup, delinme, aşırı şarj veya kısa devre durumlarında bile yangın riski diğer Li-ion türlerine göre çok daha azdır. Ayrıca LFP hücreleri nikel veya kobalt gibi çevresel ve etik sorunlara yol açan nadir metaller içermez; bu yönüyle de sürdürülebilirlik açısından daha çevreci bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2.2.2.1 Lityum-İyon (LiFePO_4 - LFP) Aküler Tanım ve Çalışma Prensibi

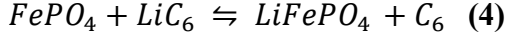
LFP akü, pozitif elektrot olarak lityum demir fosfat (LiFePO_4), negatif elektrot olarak ise çoğunlukla grafit kullanılan, ikincil elektro-kimyasal enerji depolama sistemidir. Elektrolit olarak genellikle organik çözücüler içinde çözünmüş lityum tuzları (örneğin lityum hekzaflorofosfat - LiPF_6) kullanılır. Bu sistem, şarj ve deşarj sırasında lityum iyonlarının anot ve katot arasında ileri-geri hareketi ile çalışır. Deşarj sürecinde, lityum iyonları anot olan grafitten ayrılarak elektrolit aracılığıyla katot olan LiFePO_4 yapısına göç eder ve bu sırada elektronlar dış devrede akarak elektrik enerjisi sağlar. Şarj işlemiyle bu süreç tersine döner ve lityum iyonları tekrar anot yapıya döner.

Bu işlem, şu genel tepkimelerle özetlenebilir:

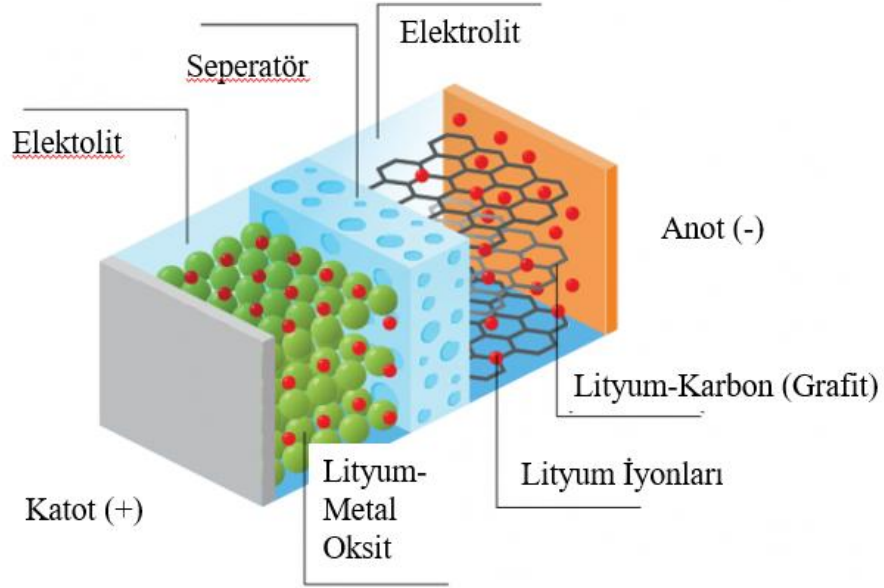
Deşarj Tepkimesi:



Şarj Tepkimesi:



Bu çift yönlü reaksiyon sırasında oluşan iyon göçü ve eş zamanlı olarak dış devreden akan elektron akışı, LFP hücrelerinin güvenli, uzun ömürlü ve yüksek çevrim verimliliğiyle enerji sağlamasını mümkün kılar. LFP kimyası, diğer Li-ion türlerine kıyasla daha düşük çalışma voltajına (yaklaşık 3.2 V nominal) sahip olmakla birlikte, olağanüstü termal kararlılığı, düşük iç direnç artışı ve yüksek çevrim ömrü sayesinde özellikle endüstriyel forklift uygulamaları gibi zorlu çevrimsel kullanım koşulları için oldukça uygun bir çözümdür.



Şekil 2.9 Lityum iyon akü bileşenleri [44]

2.2.2.2 LFP Yapısal Bileşenler

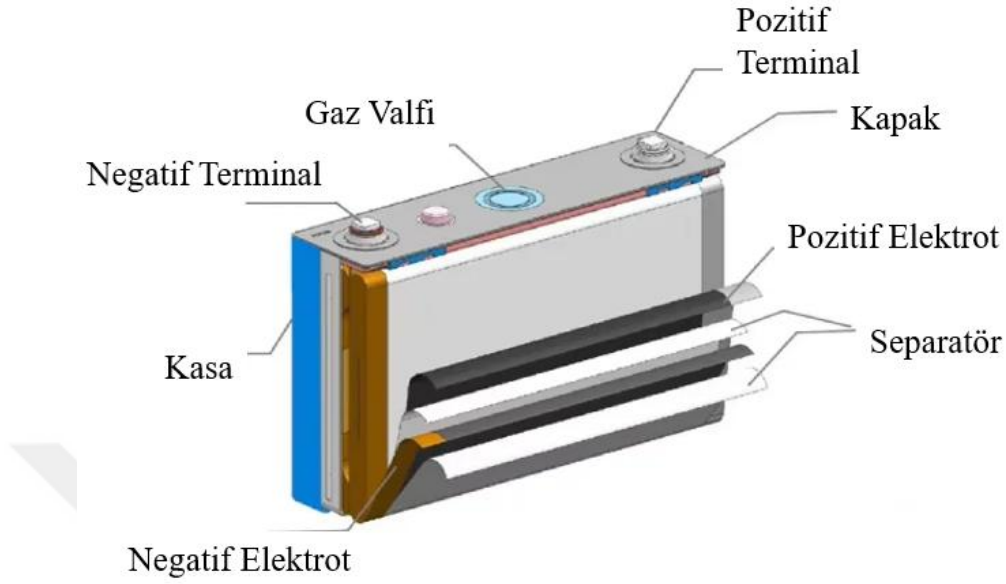
Endüstriyel LFP aküler, temel olarak birbirini tamamlayan bir dizi elektro-kimyasal ve yapısal bileşenden oluşur. Pozitif elektrotu oluşturan LFP katodu ($LiFePO_4$), lityum iyonlarını alıp vererek deşarj ve şarj işlemlerini gerçekleştirir. Negatif

elektrot olarak görev yapan grafit esaslı anot, şarj sırasında lityum iyonlarını katman yapısına nüfuz ederek depolar, deşarjda ise bu iyonları serbest bırakır. Bu iki elektrot arasında doğrudan temas sonucu oluşabilecek kısa devreyi engellemek amacıyla, polimer bazlı mikro gözenekli ayırıcı (separatör) katman yerleştirilir. Separatör, iyonların serbestçe geçişine izin verirken elektron iletimini engelleyerek elektriksel yalıtımı sağlar.

Elektrolit olarak genellikle LiPF_6 gibi bir lityum tuzu, organik karbonat çözücüler (etilen karbonat, dimetil karbonat vb.) içerisinde çözündürülerek kullanılır. Bu elektrolit sistemi, lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareketini mümkün kılar ve iletkenliği doğrudan etkiler. Tüm bu hücre içi bileşenler, dış ortam etkilerine karşı korunmak amacıyla çoğunlukla alüminyum veya paslanmaz çelikten yapılmış prizmatik hücre kasaları veya metal takviyeli kese zarflar içinde muhafaza edilir. Hücrelerin seri-paralel bağlanmasıyla oluşturulan batarya paketlerinde, terminaller ve bağlantı baraları aracılığıyla elektriksel bütünlük sağlanır. Ayrıca her hücre grubunun voltaj, sıcaklık ve akım bilgileri BYS aracılığıyla izlenir. Bu bileşenlerin her biri, LFP akülerin performansı, çevrim ömrü ve güvenlik seviyesi üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, elektrot yüzeylerinde oluşabilecek lityum sıvama, separatör tıkanıklığı veya elektrolit bozulması gibi problemler kapasite düşüşüne ve iç direnç artışına neden olabilir. Bu nedenle hücre içi yapının stabilize edilmesi ve termal yönetimin etkin şekilde sağlanması, endüstriyel uygulamalarda LFP akü performansının sürdürülebilirliği açısından kritik önemdedir. Tablo 2.3’ te LFP tipinde bir akünün malzeme bileşen oranları verilmiştir.

Tablo 2.3 LFP akü malzeme/bileşen oranları

Malzeme/Bileşen	Yaklaşık Ağırlık Oranı (%)
Aktif Malzeme (LiFePO_4 + Grafit)	35-40
Akım Toplayıcılar (Al, Cu Folyo)	15-20
Elektrolit (LiPF_6 + çözücüler)	10-15
Separatör (PE, PP)	2-4
Hücre Dış Kasa (Alüminyum, Çelik)	15-20
Diğer (Yapıştırıcı, Tapalar, Köpük vs.)	3-5



Şekil 2.10 Prizmatik tipindeki LFP hücrenin yapısal bileşenleri [42]

2.2.2.2.1 Elektrotlar

LFP hücrelerde kullanılan elektrotlar, hücrenin enerji yoğunluğu, çevrim ömrü ve iç direnç özelliklerini doğrudan belirleyen temel bileşenlerdir. Bu hücrelerde, pozitif elektrot (katot) ve negatif elektrot (anot) olmak üzere iki ana aktif elektrot yapısı bulunur ve her biri farklı işlevsel katmanlardan oluşur.

Pozitif elektrot (katot), LFP aktif malzemesini taşıyan alüminyum folyo üzerine kaplanmış çok katmanlı bir yapıdır. Aktif malzeme tipik olarak LiFePO_4 tozu, iletken karbon (örn. asetilen black) ve bağlayıcı (genellikle PVDF – poliviniliden florür)) karışımından oluşan bir elektrot mürekkebi ile hazırlanır. Bu karışım alüminyum toplayıcı üzerine şerit hâlinde kaplanır ve yüksek sıcaklıkta kurutularak aktif elektrot haline getirilir. LFP malzemesi, kristal yapısıyla yüksek yapısal stabilite sunar ve bu özellik sayesinde binlerce çevrim boyunca yapısal bütünlüğünü koruyabilir.

Negatif elektrot (anot) ise genellikle bakır folyo üzerine kaplanmış grafit esaslı bir yapıdır. Grafit, şarj sırasında lityum iyonlarını interkale ederek bünyesine alır; deşarj sırasında bu iyonları serbest bırakarak enerji sağlar. Anot karışımı, grafit, iletken karbon ve bağlayıcı içeren bir slurry formunda hazırlanır ve bakır toplayıcı üzerine kaplanır.

Yüzeyin düzgünlüğü, partikül boyutu dağılımı ve bağlayıcı oranı, elektrokimyasal performans üzerinde doğrudan etkilidir. Pozitif ve negatif elektrotlar, aralarına yerleştirilen separator ile birlikte sarmal (jelly roll) veya katmanlı (stacked) yapı hâlinde hücreyi oluşturacak şekilde bir araya getirilir. Separator, yalnızca iyonların geçişine izin verirken elektrotlar arası kısa devreyi önler. Bu yapı, prizmatik, silindirik veya pouch tip hücre geometrisine göre farklı şekillerde düzenlenebilir.

LFP hücrelerde elektrot performansını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında aktif malzeme saflığı, iletken katkı oranı, bağlayıcı tipi, slurry homojenliği, kaplama kalınlığı, kurutma sıcaklığı, presleme basıncı ve kalanderleme işlemleri yer almaktadır. Doğru elektrot tasarımı ve üretim parametreleri sayesinde LFP hücrelerde yüksek çevrim sayısı, düşük kapasite kaybı ve düşük iç direnç elde edilebilmektedir. Özellikle forklift gibi sık sık şarj-deşarj döngüsüne maruz kalan uygulamalarda, yüksek kaliteli elektrot yapıları hücre dayanımının temelini oluşturmaktadır.

2.2.2.2.2 Pozitif Elektrot (Katot)

Pozitif elektrot, LFP tipi Li-ion akülerde enerji depolama ve lityum iyonlarının konakladığı temel elektrokimyasal bileşenlerden biridir. Bu elektrotun aktif malzemesi, olivin yapılı lityum demir fosfat (LiFePO_4) olup, şarj-deşarj süreçlerinde lityum iyonlarını yapısına alıp vererek tepkimeyi yürütür. LFP katodu, alüminyum folyo yüzeyine kaplanmış çok katmanlı bir elektrot yapısıdır. Aktif madde, bir bağlayıcı (genellikle PVDF), iletken katkı (karbon black veya asetilen black) ve LiFePO_4 tozundan oluşan slurry (elektrot mürekkebi) şeklinde hazırlanır. Bu slurry, alüminyum akım toplayıcısına belirli kalınlık ve yoğunlukta kaplanarak kurutulur ve ardından preslenerek elektrot hâline getirilir.

LiFePO_4 , yüksek yapısal kararlılığı ve güvenlik düzeyi sayesinde, diğer Li-ion katot kimyalarına göre üstün çevrim ömrü ve termal dayanıklılık sunar. Elektrokimyasal olarak yaklaşık 3.2 V nominal çalışma voltajına sahip olan bu malzeme, düşük çözünürlükle birleşerek yüksek şarj-deşarj çevrimi dayanımı sergiler. Bu özelliği sayesinde LFP katotlar, derindeşarja dayanıklı ve yoğun döngü yükü altında çalışan endüstriyel uygulamalar için ideal bir seçenek sunar.

Katot yapısının fiziksel özellikleri kaplama kalınlığı, yoğunluğu, porozitesi ve karbon katkı oranı elektrotun iletkenliği, iyon transferi ve yüzey reaksiyon verimi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu parametreler, üretim sürecinde uygulanan kaplama hızı, kurutma sıcaklığı ve kalanderleme basıncı gibi faktörlerle kontrol altına alınır. Özellikle LFP gibi düşük iletkenliğe sahip malzemelerde iletken katkıların miktarı, aktif madde performansını doğrudan belirler.

Üretim sonrası LFP katotlar genellikle homojen, açık gri-yeşil tonlarında ve kompakt bir yapıdadır. Elektrot yüzeyinin düzgünlüğü ve renk dağılımı, kaplama kalitesinin ve aktif malzeme homojenliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilir. Bu bağlamda, üretim proseslerinin optimize edilmesi hem hücre iç direncini azaltmakta hem de uzun vadeli performans kararlılığı sağlamaktadır.

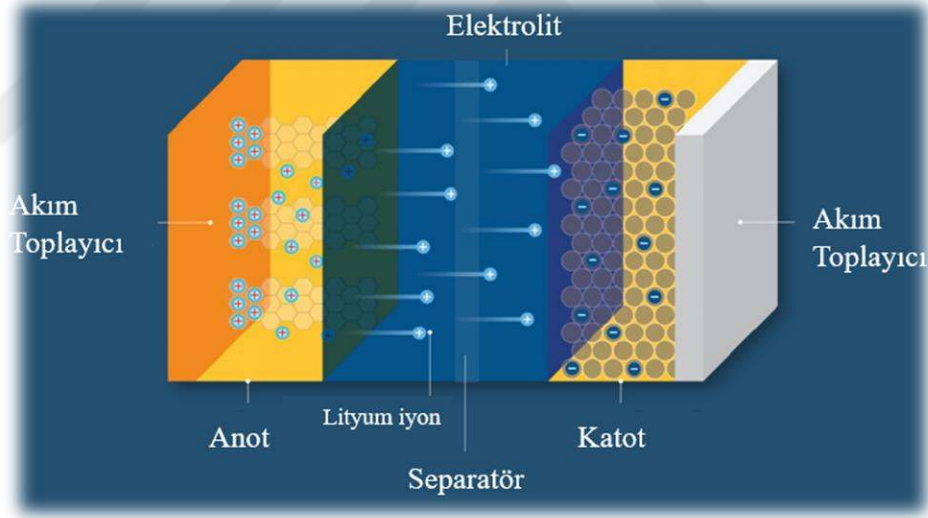
2.2.2.2.3 Negatif Elektrot (Anot)

LFP tipi Li-ion hücrelerde anot, lityum iyonlarının şarj sırasında interkale olduğu ve deşarj sırasında elektron salınımının gerçekleştiği temel bileşendir. Anot, genellikle bakır folyo üzerine kaplanmış grafit bazlı aktif madde karışımından oluşur. Şarjlı durumda grafit, lityum iyonlarını kristal katmanları arasında Lityum HeksaKarbonit(LiC_6) formunda barındırır. Bu yapı, yüksek yüzey alanı ve kristal düzeni sayesinde hızlı iyon iletimine ve düşük iç dirençle yüksek akım performansına olanak tanır. Anot aktif malzemesi; doğal/sentetik grafit, iletken karbon katkıları (karbon black vb.) ve bağlayıcı polimer (genellikle PVDF) içeren homojen bir karışımdır. Bu karışım bakır folyo üzerine uygulanarak kurutulur ve preslenir.

Bakır folyo, düşük elektriksel direnç ve elektrokimyasal kararlılığı sayesinde hücre içindeki enerji kayıplarını en aza indirirken, yapısal stabiliteyi de destekler. LFP hücre tasarımında anot kapasitesi genellikle katoda göre hafif fazla seçilir (anot fazlalığı), böylece tüm lityum iyonların güvenli interkale olması sağlanır ve lityum plating gibi zararlı reaksiyonlar önlenir. Elektrotlar arasında bulunan seperatör, iyonların geçişine izin verirken elektronları bloke ederek kısa devreyi engeller. Anot yüzeyinin rengi koyu gri-siyah olup, bu görünüm kullanılan grafit ve karbon içeriğinden kaynaklanır; homojen renk dağılımı ve düzgün yüzey, slurry hazırlığı ve kaplama kalitesinin bir göstergesidir.

2.2.2.2.4 Elektrolit

LFP tipi Li-ion akülerde, elektrotlar arasında iyon taşınımını sağlayan iletken ortam elektrolit olarak adlandırılmaktadır. Elektrolit, hücre içerisindeki pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar arasında lityum iyonlarının (Li^+) etkin ve hızlı bir şekilde taşınmasını sağlayan sıvı fazı oluşturur. LFP hücrelerde elektrolit, genellikle organik çözücüler (karbonat bazlı) içerisinde çözündürülmüş bir lityum tuzundan oluşur. Endüstride yaygın olarak kullanılan elektrolit bileşimi, LiPF_6 tuzunun etilen karbonat (EC), dimetil karbonat (DMC) ve/veya dietil karbonat (DEC) gibi düşük viskoziteli ve yüksek dielektrik sabitine sahip organik çözücüler içerisinde yaklaşık %1 molar konsantrasyonda çözündürülmesiyle elde edilir. LiPF_6 , yüksek iyonik iletkenliğe ve kararlılığa sahip olup, elektrot yüzeylerinde SEI oluşumunu destekleyerek hücre güvenliğini artırır.



Şekil 2.11 Li-ion (LFP) hücre kesitinde elektrolit ve iyon taşıma süreci [45]

Elektrolitin fiziksel özellikleri özellikle viskozite, iletkenlik ve kimyasal kararlılık hücrenin performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Tipik bir LFP hücrede, elektrolit iyonik iletkenliği yaklaşık 8–12 mS/cm düzeyindedir. Bu değer, ortam sıcaklığına, çözücü oranlarına ve katkı maddelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Elektrolit miktarı ise hücre tasarımına göre optimize edilir; fazla elektrolit düşük enerji yoğunluğuna yol açarken, yetersiz elektrolit iyon taşınımını sınırlandırarak iç direnç artışına neden olabilir.

Elektrolit içerisinde kullanılan çözücüler, genellikle uçucu ve yanıcı özellikte oldukları için Li-ion hücrelerde termal yönetim ve güvenlik önlemleri büyük önem taşır. Bu kapsamda, bazı sistemlerde alev geciktirici katkılar, film oluşturuvcu veya SEI dengeleyici katkılar kullanılabilir. Elektrolitin kararlılığı, hücre ömrü boyunca gaz oluşumu, kapasite kaybı ve iç direnç artışı gibi olumsuz etkilerin önlenmesinde belirleyici rol oynar.

LFP hücrelerde elektrolit doğrudan ölçölüp değiştirilmez; dolayısıyla üretim sürecinde doğru konsantrasyon ve miktarda hazırlanması kritik önem taşır. Elektrolitin homojen dağılımı, elektrotlar arasındaki iyon taşınımını dengede tutarak hücre içindeki potansiyel farkların oluşmasını engeller ve çevrim stabilitesine katkı sağlar.

Bu nedenlerle, endüstriyel LFP hücre tasarımında elektrolit bileşimi, katkı oranları ve toplam hacmi, performans, çevrim ömrü ve güvenlik açısından optimum seviyelerde olacak şekilde belirlenmekte ve üretim reçetelerinde hassasiyetle kontrol edilmektedir.

2.2.2.2.5 Separatör

LFP hücrelerde, pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar arasına yerleştirilen ve hücre içindeki kısa devre riskini ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan geçirgen, elektriksel olarak yalıtkan yapılar ayırıcı (separatör) olarak adlandırılmaktadır. Separatörler, yalnızca mekanik izolasyon işlevi görmekle kalmaz; aynı zamanda iyon iletimine izin veren mikro gözenekli yapıları sayesinde elektrokimyasal reaksiyonların sürdürülebilirliğini sağlar. Bu bileşen, hücrenin hem güvenliği hem de performansı açısından kritik öneme sahiptir.

LFP hücrelerde yaygın olarak kullanılan separatör yapıları, PE, PP ya da her iki malzemenin çok katmanlı kombinasyonlarından oluşur. Hücre tasarımına bağlı olarak sarmal (jelly-roll) ya da istiflenmiş (stacked) elektrot düzenlerinde, separatörler elektrotlar arasında doğrudan teması engelleyerek kısa devreyi önler. Gözenekli yapıları sayesinde, lityum iyonlarının elektrolit içinden geçişine olanak tanırken elektron geçişine kesin bir bariyer oluşturur.

Separatör performansı; porozite oranı, elektrolitteki sıvı yoğunluğu, iyonik iletkenlik, termal stabilite ve mekanik dayanım gibi parametrelerle değerlendirilir. Yüksek porozite ve iyi elektrolit absorpsiyon kabiliyeti, elektrotlar ile separatör arasında etkin temas sağlayarak düşük iç dirençle yüksek performans sunar. Aynı zamanda separatörün yapısal dayanıklılığı, hücre montajı ve kullanım sırasında oluşabilecek sıkışma, bükülme ve termal genişlemelere karşı formunun bozulmadan kalmasını sağlar.

LFP kimyasına sahip hücrelerde separatörün bir diğer önemli özelliği de shut-down (kapanma) davranışıdır. Belirli bir sıcaklık seviyesine ulaşıldığında (genellikle 120–140°C), separatörün gözenekleri kapanarak iyon geçişini durdurur ve böylece termal kaçak (thermal runaway) gibi tehlikeli durumların önüne geçilmiş olur. Bu özellik, Li-ion hücrelerde yangın ve patlama riskine karşı pasif bir güvenlik mekanizması olarak görev yapar.

Ayrıca separatörlerin kimyasal olarak kararlı olması, elektrolit bileşenleri ile reaksiyona girmemesi ve zamanla bozulmaması beklenir. Özellikle yüksek voltajlı hücre tasarımlarında, oksidatif stabilite separatör ömrü açısından belirleyici faktördür. Endüstride separatörlerin yüzeylerine seramik kaplama veya özel kaplamalar uygulanarak ısı dayanımı ve kimyasal kararlılık artırılabilir. Günümüzde gelişmiş LFP hücrelerde, çok katmanlı, düşük kalınlıklı (genellikle 15–25 mikron) ve seramik kaplamalı separatörler, performans, güvenlik ve üretim kolaylığı açısından öne çıkmaktadır. Bu separatör yapıları, hücre ömrü boyunca boyutsal kararlılık göstererek özellikle forklift gibi zorlu çevrim koşullarında güvenilir ve uzun ömürlü kullanım imkânı sunar.

2.2.2.2.6 Terminaller (Kutup Bağlantıları)

LFP akülerde elektrik enerjisinin dış devreye aktarılması ve şarj işleminin gerçekleştirilmesi, pozitif (+) ve negatif (–) olmak üzere iki terminal (kutup bağlantısı) aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu terminaller, hücre grubunun dış ortamla olan elektriksel arayüzünü oluşturur ve akü paketinin uygulamaya entegrasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Terminaller, genellikle hücre modüllerinin veya tüm batarya paketinin üst kısmında konumlandırılır ve yüksek akım taşıma kapasitesine sahip iletken metal alaşımlardan (örn. nikel kaplamalı bakır) üretilir.

LFP hücrelerden oluşan batarya sistemlerinde, hücre içindeki akım bakır ve alüminyum akım toplayıcılar vasıtasıyla toplanır ve modül içi bağlantı şeritleri (busbar) aracılığıyla terminallere yönlendirilir. Bu bağlantılar ultrasonik kaynak, lazer kaynağı veya direnç kaynağı gibi yüksek hassasiyetli yöntemlerle gerçekleştirilir. Böylece düşük geçiş direnci ve uzun vadeli mekanik bütünlük sağlanmış olur. Terminal bağlantı noktalarının elektriksel iletkenliği, kaynak kalitesi ve yüzey teması, batarya sisteminin toplam iç direnci ve termal davranışı üzerinde doğrudan etkilidir.

Pozitif terminal, batarya paketinde genellikle kalın kesitli ve belirgin bir şekilde “+” işareti ile işaretlenmiş olarak tasarlanır. Endüstriyel uygulamalarda yanlış bağlantıyı önlemek amacıyla pozitif kutuplar kırmızı, negatif kutuplar ise siyah veya mavi renklerle görsel olarak ayrılır. Terminallerin geometrisi, bağlantı yapılacak sistemin kablo veya soket tipine uygun olarak düz, cıvatalı (threaded stud) veya özel konnektörlü yapıda olabilir.

LFP bataryaların terminalleri, yalnızca elektriksel bağlantı noktaları değil; aynı zamanda sistemin ısı yönetimi ve güvenlik özellikleri açısından da önem taşır. Özellikle yüksek akımlı forklift uygulamalarında, terminal sıcaklık artışı kritik bir parametre olup, bu nedenle bağlantı noktaları hem düşük dirençli olmalı hem de çevresel streslere (titreşim, termal genleşme vb.) dayanıklı şekilde tasarlanmalıdır. Bazı sistemlerde, terminallerin sıcaklığı sürekli olarak izlenmekte ve aşırı ısınma durumunda koruyucu devreler devreye girmektedir.

Modern Li-ion batarya üretiminde terminal kaynak ve bağlantı süreçleri, hata toleransı düşük ve tekrarlanabilir kalite sunan otomasyon sistemleri ile gerçekleştirilir. Bu süreçlerde uygulanan sıkı kalite kontrol kriterleri; iç direnç, akım taşıma kapasitesi, mekanik dayanım ve güvenlik gibi performans parametrelerini doğrudan etkiler. Sonuç olarak, LFP batarya sistemlerinde terminaller, hem güvenli enerji aktarımı hem de uzun ömürlü kullanım için tasarım ve üretim aşamasında büyük bir titizlikle ele alınmaktadır.

2.2.2.2.7 Kutu, Kapak ve Dış Yapılar

LFP hücrelerden oluşan endüstriyel batarya sistemlerinde, hücrelerin güvenli biçimde muhafaza edilmesi, dış ortam koşullarından korunması ve mekanik bütünlüğün

sağlanması amacıyla çeşitli kutu, kapak ve muhafaza yapıları kullanılmaktadır. Bu dış yapılar, aynı zamanda batarya sisteminin termal yönetimi, elektriksel izolasyonu ve modüler montaj kolaylığı gibi işlevleri de yerine getirir.

LFP hücreler, uygulamaya bağlı olarak prizmatik, silindirik veya kese formunda üretilmekte ve bu hücreler, metal kasalar (çoğunlukla alüminyum veya paslanmaz çelik) ya da yüksek dayanımlı plastik kutular içerisine yerleştirilmektedir. Endüstriyel forklift uygulamaları gibi zorlu çevrim koşullarında, genellikle prizmatik hücrelerin metal muhafaza içerisinde gruplandırıldığı modüler batarya sistemleri tercih edilmektedir. Bu muhafazalar, hem mekanik darbelere hem de termal genleşmelere karşı dirençli olacak şekilde tasarlanmakta, ayrıca BYS ve termal sensör ekipmanlarının entegrasyonuna uygun hale getirilmektedir.

Kasa ve kapak malzemeleri, yüksek sıcaklık dayanımına, kimyasal dayanım ve elektriksel yalıtınlığa sahip olmalıdır. Özellikle kese tipi hücre kullanılan sistemlerde, dış muhafaza olarak yangına dayanıklı plastik kompozitler veya hafif metal alaşımlar tercih edilmektedir. Prizmatik hücreler ise genellikle kendi alüminyum gövdesiyle birlikte kullanılır ve dışarıdan ilave bir taşıyıcı kutu ile desteklenir.

Kutu ve kapak tasarımında yalnızca fiziksel koruma değil; ısı yayılımının kontrolü, gaz tahliye yapılarının entegrasyonu, montaj kolaylığı ve IP (koruma sınıfı) derecelendirmesine uygunluk gibi kriterler de dikkate alınır. Özellikle yüksek akım uygulamalarında terminallerin bulunduğu alanlarda yalıtım bariyerleri, conta yapıları ve güvenlik delikleri kullanılarak izolasyon ve sızdırmazlık artırılır. Hücrelerin yerleştiği modüller, titreşim ve darbelere karşı sünger, conta veya destek profilleriyle stabilize edilir. LFP sistemlerde kutu ve kapaklar, bakım kolaylığına uygun şekilde modüler yapıda tasarlanabilir. Bu sayede arızalı hücrelerin değiştirilmesi, sensör kalibrasyonu veya kablo bağlantılarının kontrolü gibi işlemler hızlı biçimde yapılabilir. Bunun yanında bazı uygulamalarda birden fazla modül, tek bir büyük gövde içine entegre edilerek kompakt sistemler oluşturulmaktadır. Bu tür entegre sistemlerde ısı dengesini sağlamak amacıyla aktif soğutma kanalları veya termal iletken pedler de gövde içerisine entegre edilebilir.

Tablo 2.4 Endüstriyel Uygulamalar İçin LFP ve Kurşun-Asit Akülerin Karşılaştırması

Karşılaştırma Kriteri	Lityum Demir Fosfat (LFP) Akü	Kurşun-Asit Akü (Endüstriyel Tip)
Kimyasal Yapı	Lityum Demir Fosfat (LiFePO ₄)	Kurşun (Pb) ve Sülfürik Asit (H ₂ SO ₄)
Hücre Nominal Voltajı	~3.2 V	~2 V
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	90–160	30–50
Çevrim Ömrü (%80 DOD, 25°C)	2000–6000 çevrim	500–1500 çevrim
Derin Deşarj Dayanımı	Yüksek (Güvenli derin deşarj mümkündür)	Sınırlı (Derin deşarj ömrü ciddi etkiler)
Şarj Verimliliği (%)	%95–99	%70–85
Şarj Süresi	1–2 saat (hızlı şarj olanağı mevcut)	6–12 saat
Bakım Gereksinimi	Bakım gerektirmez (sızdırmaz yapı, su ekleme yok)	Periyodik bakım gerekli (su tamamlama, temizlik vb.)
Kendi Kendine Deşarj Oranı (%/ay)	%2–3	%5–15
Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)	-20°C ila +60°C	-10°C ila +45°C
Ağırlık / Hacim (Aynı Kapasite İçin)	Daha hafif ve kompakt (yaklaşık %50 daha düşük ağırlık)	Daha ağır, daha büyük hacim gerektirir
Termal Stabilitate ve Güvenlik	Yüksek termal kararlılık, düşük yangın riski (termal runaway riski düşük)	Düşük termal kararlılık, gaz çıkışı ve asit sızıntısı riski mevcut
Maliyet (İlk Yatırım)	Yüksek (kurşun-asite göre yaklaşık 2–4 kat fazla)	Düşük (daha uygun ilk yatırım maliyeti)
Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO)	Uzun vadede düşük (yüksek çevrim ömrü ve düşük bakım maliyeti nedeniyle)	Yüksek (daha sık yenileme, yüksek bakım maliyeti)
Çevresel Etki (Geri Dönüşüm Durumu)	Yüksek geri dönüşüm oranı henüz sınırlı, çevreye duyarlı malzeme içeriği (Kobalt içermez)	%98 geri dönüşebilir; ancak kurşun ve asit kaynaklı çevresel riskler barındırır

2.3 Batarya Sistemlerinde Kavramsal Temeller ve Hesaplamalar

Batarya sistemlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışması, bu sistemlerin temel kavramlarının doğru anlaşılması ve uygun mühendislik hesaplamalarıyla tasarlanmasına bağlıdır. Özellikle elektrikli forklift uygulamaları gibi zorlu endüstriyel koşullarda, enerji depolama sistemlerinin gerilim, kapasite, iç direnç, verimlilik ve termal karakteristikleri gibi parametrelerinin detaylı şekilde analiz edilmesi gereklidir. Bu bölümde, batarya sistemlerine yönelik temel elektriksel kavramlar açıklanmaktadır.

2.3.1 Batarya Elektriksel Parametreleri

Batarya sistemlerinde temel performans göstergelerinden biri, elektriksel parametrelerdir. Bu parametreler, bataryanın tasarımı, çalışma koşulları ve kullanım süresi boyunca sergilediği elektriksel davranışı tanımlamakta ve BYS hem de enerji yönetim stratejileri açısından kritik bir rol oynamaktadır.

2.3.1.1 Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage – OCV)

Açık devre gerilimi, batarya belirli bir süre dinlendirildiğinde veya devre dışı bırakıldığında ölçülen gerilim değeridir. Bu gerilim, batarya içerisinde herhangi bir yük veya akım akışı bulunmaksızın yalnızca hücreler arası potansiyel farkını temsil eder. OCV değeri, SOC ile doğrudan ilişkilidir ve çoğu zaman SOC tahmin yöntemlerinde referans parametre olarak kullanılır. LFP hücrelerde OCV-SOC eğrisi, diğer Li-ion kimyalarına göre daha yatay ve düzdür; bu nedenle düşük voltaj değişimleriyle SOC değişimi arasında sınırlı bir doğrusal ilişki bulunmaktadır.

2.3.1.2 Nominal Gerilim (Nominal Voltage)

Nominal gerilim, bir batarya hücresinin ya da paketinin tipik çalışma koşullarında gösterdiği ortalama gerilim değeridir. LFP kimyasında bu değer genellikle 3.2 V ve kurşun-asit akülerin bir hücresinde ise 2V olarak kabul edilir. Batarya sistemi tasarlanırken, nominal gerilim değeri seri bağlı hücre sayısı ile çarpılarak toplam sistem voltajı belirlenir.

2.3.1.3 Gerilim Limitleri

Batarya kullanımında güvenlik ve ömür açısından en kritik parametrelerden biri de minimum ve maksimum gerilim sınırlarıdır. LFP hücreler genellikle 2.5 V altına

indiğinde aşırı deşarj riski taşır; 3.65 V üzerine çıktığında ise aşırı şarj kaynaklı güvenlik riskleri ortaya çıkar. Bu sınırlar, BYS tarafından sürekli izlenir ve hücrelerin gerilimleri belirlenen aralıkta tutulur.

2.3.1.4 Çalışma Gerilim Aralığı

Bataryanın şarj ve deşarj işlemleri sırasında çalıştığı gerilim aralığı hem batarya performansını hem de güvenliğini doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Bu gerilim aralığı, bataryanın enerji kapasitesi, deşarj derinliği (Depth of Discharge- DoD), çevrim ömrü ve güvenlik sınırları açısından kritik öneme sahiptir.

LFP hücrelerde bu çalışma gerilim aralığı genellikle 2.5 V ile 3.65 V arasında tanımlanır. LFP hücrelerin elektrokimyasal yapısı gereği, bu aralık dışında çalıştırılmaları durumunda hem kapasite kaybı hızlanmakta hem de güvenlik riskleri ortaya çıkabilmektedir. Özellikle 2.5 V altına inildiğinde hücrede geri dönüşümsüz yapısal bozulmalar gibi olumsuz süreçler başlarken, 3.65 V üzerine çıkılması durumunda ise elektrolit bozulması, SEI tabaka hasarı ve aşırı ısınma riski oluşmaktadır. Bu nedenle BYS, LFP hücrelerde çalışma gerilimini sürekli izlemekte ve bu sınırlar arasında kalacak şekilde hücreleri yönetmektedir.

Öte yandan, kurşun-asit akülerde çalışma gerilim aralığı farklıdır. Tek bir kurşun-asit hücre için nominal gerilim yaklaşık 2 V'dir. Endüstriyel kurşun-asit hücrelerde şarj sırasında hücre gerilimi genellikle 2.4 V – 2.6 V seviyelerine kadar çıkabilirken, deşarj esnasında hücre gerilimi 1.75 V – 1.85 V aralığına kadar düşebilir. Ancak kurşun-asit aküler, LFP hücrelere göre daha geniş gerilim değişimlerine toleranslıdır; çünkü iç yapılarında oksijen ve hidrojen gazı üretimi gibi gaz rejenerasyon mekanizmaları devreye girer. Buna rağmen, aşırı deşarj veya aşırı şarj durumları kurşun-asit akülerde de kapasite kaybına, iç direnç artışına ve plakaların zarar görmesine neden olmaktadır.

Bu nedenle, her iki batarya teknolojisinde de uygun gerilim aralıklarında çalıştırma şarttır. LFP aküler, daha dar ancak kesinlikle korunması gereken bir gerilim penceresine sahipken; kurşun-asit aküler daha geniş bir aralıkta çalışabilmekle birlikte,

uzun ömür ve sağlıklı çevrim için belirlenen optimum gerilim aralıklarının dışına çıkılmaması önerilmektedir.

Tablo 2.5 Örnek batarya parametreleri tablosu

Parametre	Açıklama	Örnek
Nominal Gerilim (V_{nom})	Hücresinin ortalama çalışma gerilimi	3.2 V
Minimum Gerilim (V_{min})	Güvenli deşarj sınırındaki en düşük gerilim	2.5 V
Maksimum Gerilim (V_{max})	Güvenli şarj sınırındaki en yüksek gerilim	3.65 V
Nominal Kapasite (C_{nom})	Tam şarjdan tam deşarja kapasite (Ah)	6 Ah
İç Direnç (R_{int})	Hücresinin içindeki elektriksel direnç	4 mΩ
Çalışma Sıcaklığı (T)	Tavsiye edilen çalışma sıcaklık aralığı	-20°C – 55°C
Maksimum Deşarj Akımı	Kısa süreli uygulanabilecek en yüksek deşarj akımı	30 A (5C)
Maksimum Şarj Akımı	Kısa süreli uygulanabilecek en yüksek şarj akımı	18 A (3C)

2.3.2 Kapasite Tanımı ve Hesaplamaları

Batarya kapasitesi, bir bataryanın belirli bir süre boyunca sağlayabileceği toplam elektrik yükü miktarını ifade eden temel bir performans parametresidir. Genellikle Amper-saat (Ah) cinsinden belirtilir ve bataryanın nominal voltajı ile çarpılmasıyla enerji kapasitesi Watt-saat (Wh) olarak hesaplanabilir.

2.3.2.1 Nominal Kapasite

Nominal kapasite, batarya üreticileri tarafından standart test koşullarında belirlenen teorik kapasite değeridir. Bu kapasite değeri, belirli bir sıcaklık (genellikle 25°C) ve sabit bir deşarj akımı altında ölçülür. Ölçüm sırasında batarya tamamen şarj edilmiş durumdan, belirlenen alt gerilim sınırına kadar deşarj edilir.

LFP hücrelerde nominal kapasite genellikle IEC 61960-3:2017 standardına göre 0.5C veya 1C deşarj oranlarında ölçülür. Örneğin, 100 Ah nominal kapasiteye sahip bir LFP hücre, 1C oranında yani 100 A sabit akımla deşarj edildiğinde, yaklaşık 1 saat boyunca enerji sağlayabilmelidir. Kurşun-asit akülerde ise nominal kapasite genellikle daha uzun deşarj sürelerinde ölçülür. TS-EN 60254 standardına göre C5 oranında, yani 5

saatlik sabit deşarj süresine göre kapasite belirlenir. Örneğin, 200 Ah kapasiteli bir kurşun-asit akü, 5 saat boyunca saatte 40 A akım verebilmelidir.

2.3.2.2 Kullanılabilir Kapasite

Bataryaların gerçek kullanım koşullarında sahip olduğu kullanılabilir kapasite, nominal kapasiteden genellikle daha düşüktür. Kullanılabilir kapasiteyi etkileyen başlıca faktörler; deşarj akımı, sıcaklık, yaşlanma, şarj/deşarj sınırları ve batarya kimyasıdır.

LFP aküler, yüksek deşarj kabiliyeti ve düşük iç dirençleri sayesinde nominal kapasitesinin %90–95’ine kadar kullanılabilir kapasite sunabilir. Ayrıca derin deşarjlara karşı yüksek tolerans gösterirler. Buna karşılık, kurşun-asit akülerde kullanılabilir kapasite genellikle nominal kapasitenin %50–70’i arasında değişir. Özellikle derin deşarjlar kurşun-asit akülerde kapasite kaybına, sülfatlaşmaya ve plakaların bozulmasına yol açar. Bu nedenle kurşun-asit akülerde genellikle %50’den fazla derin deşarj önerilmez. Kurşun-asit akülerde kapasite, deşarj hızına son derece duyarlıdır ve bu durum Peukert Yasası ile açıklanır.

Peukert denklemi aşağıda verilmiştir:

$$t = \frac{C}{I^k} \quad (5)$$

Bu denklemde, t deşarj süresini saat cinsinden ifade eder. C bataryanın nominal kapasitesini Ah biriminde gösterir. I ise bataryadan çekilen deşarj akımıdır ve Amper (A) birimiyle ifade edilir. Denklemde yer alan k parametresi ise Peukert katsayısını temsil eder. Bu katsayı, bataryanın kimyasal yapısına ve deşarj karakteristiğine bağlı olarak değişir. Özellikle kurşun-asit akülerde Peukert katsayısı genellikle 1.1 ile 1.5 arasında bir değere sahiptir. Bu değer, deşarj akımı yükseldikçe kapasite kaybının ne kadar hızlı gerçekleştiğini gösterir. Katsayının yüksek olması, bataryanın yüksek akımlara karşı daha hassas olduğunu ve kapasitenin hızlıca azaldığını ifade eder.

LFP akülerde ise bu katsayı oldukça düşük seviyelerde kalır (genellikle 1.05–1.1), bu nedenle yüksek akımlarda dahi kapasite kaybı sınırlı düzeydedir. Batarya kapasitesi zamanla azalma eğilimindedir. Bu kayıp; sıcaklık, çevrim sayısı, yüksek C oranında şarj/deşarj, aşırı şarj veya deşarj gibi etkenlerden kaynaklanır. LFP hücrelerde

kapasite kaybı genellikle yavaş ve uzun vadede olurken, kurşun-asit akülerde bu süreç daha hızlı gerçekleşebilir.

2.3.2.3 Enerji Hesaplamaları

Enerji kapasitesi hesaplaması ise şu temel formülle yapılır: Burada E enerji kapasitesini (Wh), V_n nominal voltajı, C_n ise nominal kapasiteyi (Ah) temsil eder.

$$E = V_n \times C_n \quad (6)$$

2.3.3 İç Direnç ve Hesaplamaları

Batarya iç direnci, bir batarya hücresinin veya paketinin iç yapısında elektrik akımının akışına karşı gösterdiği elektriksel dirençtir. Bu parametre, bataryanın enerji verimliliği, gerilim düşümü, ısınma davranışı ve ani güç çıkışı gibi temel performans göstergeleri üzerinde doğrudan etkilidir.



Şekil 2.12 Hioki 3554 iç direnç ölçüm cihazı

İç direnç, genellikle ohm (Ω) birimiyle ifade edilen ve batarya içerisinde elektrik akımının geçişine karşı oluşan toplam dirençtir. Bu direnç, iki temel bileşenden oluşur. İlk bileşen olan omik direnç; elektrotlar, akım toplayıcılar ve elektrolit gibi batarya içindeki tüm elektriksel bileşenlerde meydana gelen, saf elektriksel akım geçişine bağlı olarak ortaya çıkan dirençtir. Diğer bileşen ise polarizasyon direncidir. Bu direnç, batarya içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında oluşan kinetik

sınırlamalar ve kütle transferine bağlı etkilerden kaynaklanır. Her iki direnç bileşeni, bataryanın çalışma sırasında gösterdiği gerilim düşümünde ve ısınma davranışında belirleyici rol oynar.

2.3.3.1 İç Direnç Hesaplama Yöntemleri

İç direnç, genellikle batarya üzerine kısa süreli bir yük uygulayarak hesaplanır. En yaygın yöntem, pulse test olarak bilinen gerilim tepki yöntemiyle yapılır. Bu yöntemde, batarya belirli bir süre için sabit bir akımla yüklenir ve gerilim değişimi gözlemlenir. İç direnç aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (7)$$

Bu formülde, R bataryanın iç direncini ohm (Ω) cinsinden ifade eder. ΔV terimi, batarya üzerinde uygulanan yükleme sırasında meydana gelen gerilim değişimini volt (V) birimiyle gösterir. ΔI ise yükleme sırasında oluşan akım değişimini amper (A) cinsinden ifade eder. İç direnç, bu gerilim değişiminin akım değişimine oranlanmasıyla hesaplanır. LFP tipi Li-ion hücreler, düşük iç dirençleriyle bilinir. Bu hücrelerde tipik iç direnç değerleri genellikle 1–5 m Ω seviyesindedir. Düşük iç direnç sayesinde LFP hücreler yüksek akım çekiminde bile düşük gerilim kaybı ve sınırlı ısınma gösterir. Ayrıca iç direnç, LFP hücrelerde uzun süre sabit kalma eğilimindedir ve yaşlanma süreci boyunca yavaş artış gösterir.

Kurşun-asit akülerde ise iç direnç genellikle daha yüksektir. Tipik bir endüstriyel kurşun-asit hücrenin iç direnci 5–20 m Ω aralığında olabilir. İç direnç, kurşun-asit akülerde sıcaklığa, elektrolit yoğunluğuna, plakaların sülfatlaşma durumuna ve elektrotların yaşlanma düzeyine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Özellikle düşük sıcaklıklarda iç direnç belirgin şekilde artar.

2.3.3.2 Sıcaklık ve Şarj Durumunun Etkisi

Her iki batarya türünde de, yani hem LFP akülerde hem de kurşun-asit akülerde iç direnç değeri sabit değildir. İç direnç, bataryanın çalışma sıcaklığına ve SOC bağlı olarak sürekli değişkenlik gösterir. Sıcaklık, batarya iç direncini etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biridir. Düşük sıcaklık ortamlarında batarya içindeki elektrolitin

viskozitesi artar ve iyon hareketliliği azalır. Bu durum, elektrotlar ve elektrolit arasındaki iyon geçişini zorlaştırarak iç direncin belirgin şekilde yükselmesine yol açar. Bunun sonucunda batarya, düşük sıcaklıklarda hem daha düşük enerji verimi gösterir hem de ani yüklenmelerde daha fazla gerilim düşümü yaşar. Öte yandan, yüksek sıcaklık koşullarında elektrolit içerisindeki iyon hareketliliği artar ve reaksiyon kinetikleri hızlanır. Bu da bataryanın iç direncinin azalmasına neden olur. Ancak çok yüksek sıcaklıklar, özellikle uzun vadede batarya ömrünü olumsuz etkileyebileceğinden dikkatle yönetilmelidir.

SOC da bataryanın iç direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genellikle yüksek SOC seviyelerinde, yani batarya tam dolu durumdayken, iç direnç daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Bunun temel nedeni, elektrot yüzeylerinde lityum iyonlarının veya kurşun sülfat yapılarının daha uygun konumda olması ve iyon geçiş yollarının daha açık olmasıdır. Ancak batarya deşarj oldukça ve SOC seviyesi düştükçe, elektrot yüzeylerinde oluşan yapısal değişimler ve elektrolit konsantrasyonundaki değişimler nedeniyle iç direnç artmaya başlar. Bu durum, özellikle düşük SOC seviyelerinde gerilim düşümünün daha belirgin olmasına ve bataryanın güç çıkış kapasitesinin sınırlanmasına yol açar. Özetle, iç direnç sıcaklık ve şarj durumu gibi iki temel değişkene bağlı olarak sürekli değişkenlik gösterir. Bu nedenle BYS, bu parametreleri sürekli izlemekte ve bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışması için gerekli koruma stratejilerini devreye sokmaktadır.

2.3.4 Şarj Durumu (State of Charge – SOC)

SOC, bir bataryanın mevcut kapasitesinin toplam kapasitesine oranını gösteren ve bataryanın ne kadar enerjiye sahip olduğunu belirten temel bir parametredir. Genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bataryaların enerji yönetimi, koruma ve performans kontrolü açısından SOC parametresi, batarya yönetim sistemlerinde en kritik izleme ve hesaplama değerlerinden biridir.

Şarj durumu, bataryanın tamamen şarjlı durumundan tamamen boşalmış durumuna kadar olan enerji miktarını ifade eder. Matematiksel olarak genel tanımı şu şekildedir:

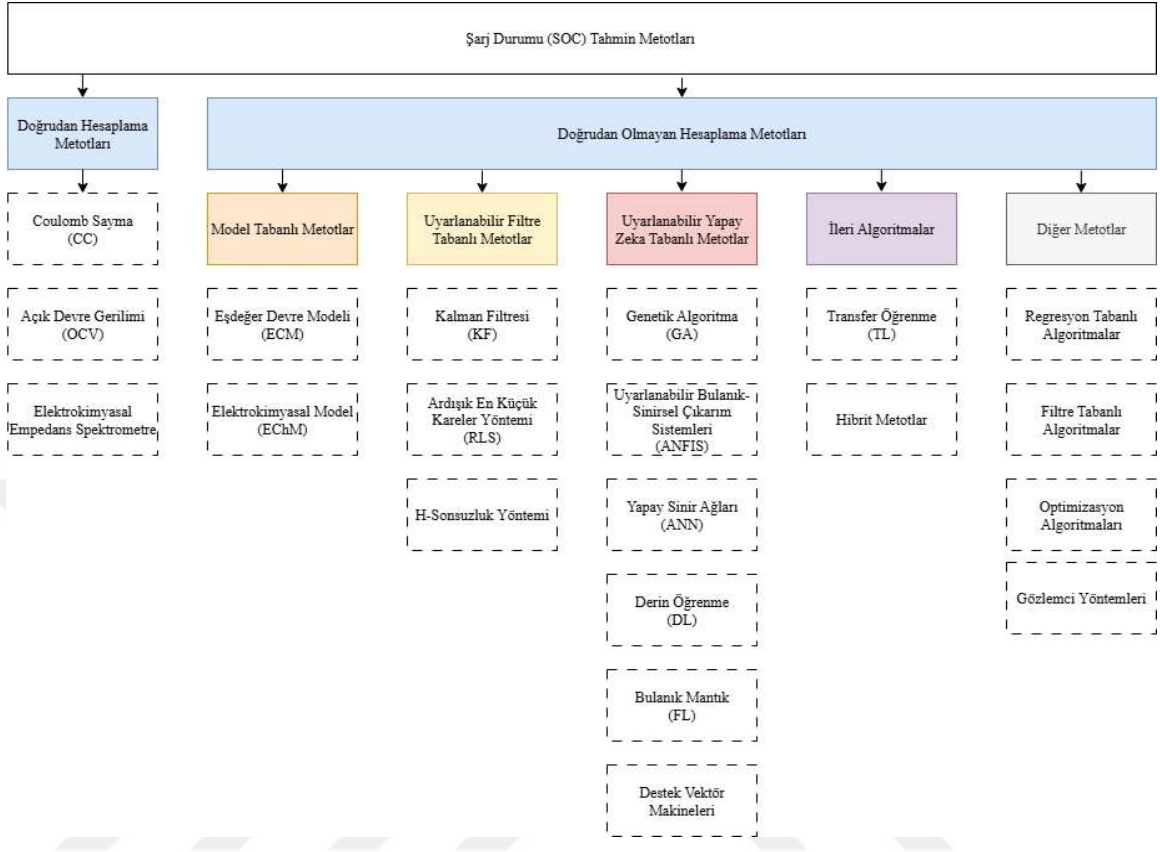
$$SoC(\%) = \frac{Q_{kalan}}{Q_{nominal}} \times 100 \quad (8)$$

Bu formülde, Q_{kalan} bataryada mevcut durumda bulunan kullanılabilir kapasiteyi temsil eder ve Ah birimiyle ifade edilir. $Q_{nominal}$ ise bataryanın üretici tarafından belirtilen nominal kapasitesini gösterir ve yine Ah cinsinden ölçülür. SOC, mevcut kapasitenin nominal kapasiteye oranlanmasıyla elde edilir.

2.3.4.1 SOC Hesaplama Yöntemleri

Bir bataryanın SOC'si, mevcut kapasitesinin nominal kapasitesine oranı olarak tanımlanır ve enerji yönetimi, güvenlik, performans optimizasyonu gibi pek çok işlevin temel girdisidir. Özellikle elektrikli araçlar ve endüstriyel uygulamalarda, doğru SOC tahmini batarya sisteminin verimli ve güvenli çalışması açısından kritik öneme sahiptir. SOC değeri doğrudan ölçülebilen bir parametre olmadığından, çeşitli dolaylı yöntemlerle tahmin edilmesi gerekir. Bu yöntemler, kullanılan veri türüne ve model karmaşıklığına göre farklılık gösterir ve her biri belirli uygulama koşullarında avantajlar sunarken bazı sınırlamalar da içerir.

Ancak özellikle dinamik yük koşulları altında (örneğin forkliftlerdeki sık dur-kalk değişken hızda kaldırma ve sürüş modları gibi), batarya gerilimi ve akımı sürekli dalgalandığından SOC tahmini önemli ölçüde karmaşılaşmaktadır. Gerilim ölçümlerinin geçici yük tepkilerinden etkilenmesi ve sıcaklık gibi dış etkenlerle birleşmesi, geleneksel yöntemlerin doğruluğunu azaltabilir. Bu nedenle, yüksek hassasiyetli SOC tahmini için gelişmiş algoritmaların özellikle model tabanlı ve adaptif yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu bölümde en yaygın kullanılan SOC hesaplama yöntemleri sistematik biçimde ele alınacak ve bunların karşılaştırmalı avantajları ile dinamik koşullar altındaki performansları ortaya konulacaktır. Bu bölümde en yaygın kullanılan SOC hesaplama yöntemleri sistematik biçimde ele alınacak ve bunların karşılaştırmalı avantajları ile dinamik koşullar altındaki performansları ortaya konulacaktır. İlgili algoritmalara genel bir bakış Şekil 2.13'te sunulmaktadır.

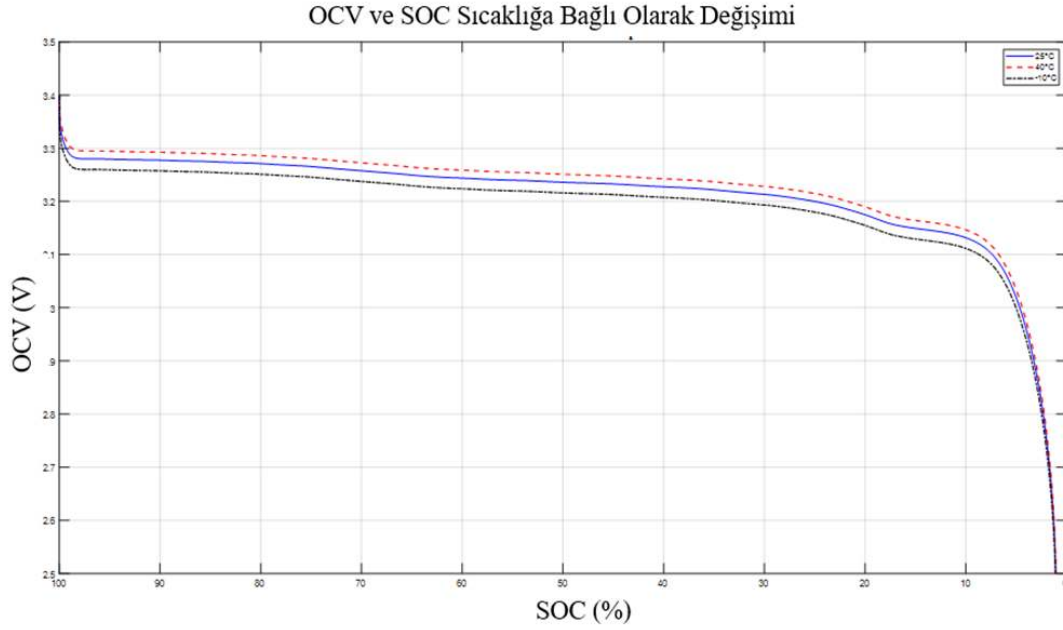


Şekil 2.13 Şarj durumu tahmin algoritmalarının genel görünümü

2.3.4.1.1 Açık Devre Gerilimi (OCV) Yöntemi

Bu yöntem, bataryanın belirli bir süre boyunca yükten izole edilerek dinlendirilmesi sonucunda ölçülen açık devre gerilimi ile SOC arasında kurulan ilişkiye dayanır. Her batarya kimyası için belirli bir OCV-SOC karakteristiği vardır [7].

LFP Aküler için OCV-SOC eğrisi oldukça düzdür ve küçük voltaj değişimleriyle büyük SOC değişimleri arasında zayıf korelasyon bulunur. Bu nedenle LFP hücrelerde OCV yönteminin doğruluğu düşüktür [26]. Kurşun-asit aküler için OCV-SOC eğrisi daha eğimlidir ve bu yöntemle SOC tahmini görece daha kolaydır. Ancak kurşun-asit akülerde sülfatlaşma ve dinlenme süresi, ölçüm doğruluğunu etkiler.



Şekil 2.14 3 farklı ortam sıcaklığında kaydedilmiş LFP aküler için OCV/SOC grafiği

2.3.4.1.2 Coulomb Sayımı (Coulomb Counting) Yöntemi

Bu yöntem, bataryaya giren ve çıkan akım miktarının zamanla entegrasyonuna dayanır. Yani batarya şarj ve deşarj sırasında geçen toplam akım miktarı hesaplanarak SOC tahmini yapılır. Yöntemin temel formülü şu şekildedir:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{Q_{nominal}} \int_{t_0}^t I(t) dt \quad (9)$$

Bu formülde, $I(t)$ terimi bataryanın zamanın bir fonksiyonu olarak değişen anlık akımını temsil eder ve Amper (A) birimiyle ifade edilir. t_0 başlangıç zamanını gösterir; yani şarj veya deşarj sürecinin başlatıldığı zamandır. $Q_{nominal}$ ise bataryanın nominal kapasitesini ifade eder ve Ah cinsinden belirtilir. Bu parametreler kullanılarak SOC zamanla hesaplanır.

Bu yöntemde şarj ve deşarj akımları hassas şekilde ölçülmelidir. Ancak sensör hataları, sıcaklık etkileri ve zamanla oluşan birikimli hata, CC doğruluğunu sınırlayabilir.

2.3.4.1.3 Model Tabanlı Yöntemler

Model tabanlı yöntemler, bataryanın elektriksel ve elektrokimyasal karakteristiğini matematiksel olarak temsil eden bir modele dayanarak SOC tahmini yapmayı amaçlayan gelişmiş yaklaşımlardır. Bu yöntemler, bataryanın gerilim, akım ve sıcaklık gibi ölçülebilir parametrelerini sürekli izleyerek, sistem dinamiğini tahmin eder ve SOC gibi gözlemlenemeyen durum değişkenlerini hesaplar [7].

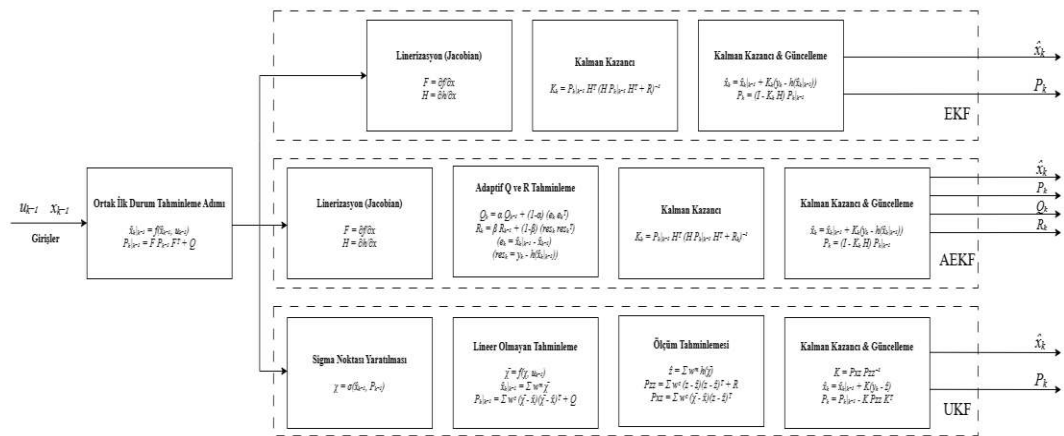
Bu yaklaşımların temelinde, batarya için oluşturulan bir ECM bulunur. Genellikle bu modeller, OCV ile bir veya daha fazla RC ağı ve ohmik dirençten oluşur. Model parametreleri, bataryanın dinamik gerilim tepkisini yansıtacak şekilde belirlenir [10] [16]. Kalman filtresi temelli yöntemler, model tabanlı SOC tahmini için en yaygın kullanılan algoritmalarlardır. Bu yöntemler, bataryanın ölçülen gerilim ve akım verileri ile modelden beklenen verileri sürekli karşılaştırır ve aradaki farktan yola çıkarak SOC tahminini günceller.

EKF, doğrusal olmayan sistemlerin SOC tahmini için en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. EKF, batarya modeli doğrusal değilse, sistemin mevcut çalışma noktası etrafında doğrusal bir yaklaşım yaparak filtreleme işlemini gerçekleştirir. Bu sayede batarya gerilimindeki küçük dalgalanmalar ve dinamik davranışlar hesaba katılır. Ancak EKF yöntemi, sistem modellemesinde hata oluştuğunda veya model parametreleri değiştiğinde sapmalara yol açabilir.

UKF ise doğrusal olmayan sistemler için EKF'ye kıyasla daha gelişmiş bir yöntemdir. UKF, sistem doğrusal olmayan olduğunda dahi daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla deterministik örnekleme (sigma noktaları) yaklaşımını kullanır. Bu yöntem, model parametrelerini doğrusal hale getirmeye çalışmadan, sistemin doğrusal olmayan davranışlarını daha iyi temsil eder. Böylece LFP tipi Li-ion hücrelerde olduğu gibi OCV-SOC ilişkisi zayıf olan, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda UKF yöntemi daha başarılı sonuçlar verir [10]. Bu yöntemlerin LFP hücrelerde yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni, LFP hücrelerin OCV-SOC eğrisinin oldukça düz olmasıdır. Bu durum, gerilim bazlı yöntemlerle SOC tahminini zorlaştırır. Kalman filtresi temelli model tabanlı yöntemler, hem gerilim hem akım verilerini birlikte değerlendirerek bu zorluğun üstesinden gelmektedir.

Kurşun-asit akülerde ise OCV-SOC eğrisi daha belirgin olduğu için genellikle daha basit yöntemler tercih edilse de, derin deşarj veya yüksek dinamik yük altında çalışan kurşun-asit sistemlerinde de Kalman filtresi uygulamaları yapılabilmektedir.[11] Model tabanlı yöntemlerin en önemli avantajlarından biri, sağladıkları yüksek doğruluk düzeyidir. Bataryanın elektriksel modeline dayandıkları için, sistemin gerçek dinamik davranışlarını yüksek hassasiyetle yansıtabilirler. Özellikle LFP tipi Li-ion aküler gibi gerilim değişimlerinin sınırlı olduğu ve OCV-SOC ilişkisinin zayıf olduğu batarya tiplerinde, bu yöntemler gerilim ve akım verilerini aynı anda kullanarak doğru SOC tahmini sağlar [8] [14].

Bir diğer önemli avantaj ise, bu yöntemlerin dinamik koşullara hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmesidir. Batarya yük profilinde ani değişimler, sıcaklık dalgalanmaları veya şarj-deşarj döngülerindeki hızlı geçişler sırasında, Kalman filtresi temelli algoritmalar batarya modelini sürekli güncelleyerek gerçek zamanlı olarak SOC tahminini doğru şekilde sürdürebilir [26]. Ayrıca, model tabanlı yöntemler hata geri besleme mekanizmasına sahiptir. Bu sayede, batarya modeliyle ölçülen veriler arasındaki sapmalar düzenli olarak analiz edilir ve tahminlerdeki olası hatalar otomatik olarak düzeltilir. Bu özellik, uzun süreli kullanımda biriken ölçüm hatalarının önüne geçilmesini sağlar ve SOC tahmininde süreklilik kazandırır [11].



Şekil 2.15 SOC tahmini için kullanılan EKF, AEKF ve UKF yapılarının genel görünümü

Tüm bu avantajlar sayesinde, model tabanlı yöntemler özellikle yüksek doğruluk gerektiren, zorlu çalışma koşullarına sahip ve gerilim bazlı yöntemlerin yetersiz kaldığı batarya sistemlerinde öne çıkmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin yüksek hesaplama kapasitesi gerektirmesi, model parametrelerinin hassasiyetle belirlenmesi zorunluluğu ve sensör verilerine sürekli ihtiyaç duyması gibi bazı zorlukları da bulunmaktadır. Bu nedenlerle, model tabanlı yöntemler sahada uygulanmadan önce kapsamlı validasyon çalışmalarına tabi tutulmalıdır.

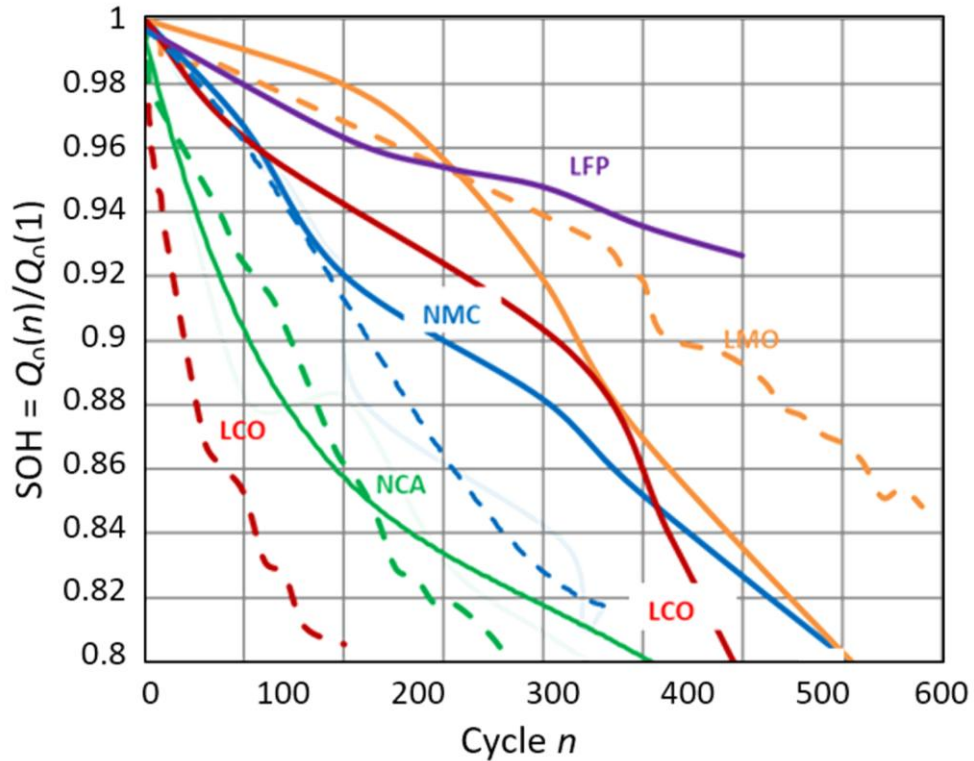
2.3.5 Sağlık Durumu (State of Health – SOH)

SOH, bir bataryanın mevcut performansının, yeni ve sağlıklı durumdaki performansına oranını gösteren temel bir parametredir. Bataryanın yaşlanma sürecinde meydana gelen kapasite kayıplarını ve performans düşüşlerini izlemek için kullanılan bu gösterge, genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. SOH, bataryanın kapasitesi, iç direnci ve enerji verimliliği gibi çeşitli ölçümler dikkate alınarak hesaplanabilir. En yaygın sağlık durumu tanımı, kapasite bazlı yapılır. Bu yöntemde, bataryanın mevcut maksimum kapasitesi, üretici tarafından belirtilen nominal kapasitesine oranlanır. Bu oran, bataryanın ne kadarının aktif olarak kullanılabildiğini gösterir. Eğer bataryanın kullanılabılır kapasitesi zamanla azalmışsa, SOH değeri de buna bağlı olarak düşer. Matematiksel olarak bu ilişki, bataryanın mevcut kapasitesinin nominal kapasitesine oranlanmasıyla elde edilir [19].

Batarya sağlık durumu yalnızca kapasiteye bağlı olarak değerlendirilmez. İç direnç bazlı yöntemlerde, bataryanın iç direncindeki artışlar izlenir. Bataryalar yaşlandıkça iç dirençleri yükselir ve bu durum bataryanın performansını olumsuz etkiler. Bu nedenle, iç direnç artışı da batarya sağlığının belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Bazı durumlarda ise enerji bazlı yaklaşımlar tercih edilir. Bu yaklaşımda, bataryanın tam şarjdan tam deşarj kadar sağlayabildiği toplam enerji dikkate alınır. Enerji bazlı değerlendirme, özellikle enerji yoğunluğu yüksek batarya sistemlerinde daha anlamlı sonuçlar verebilir [27]. Batarya sağlığı, birçok dış etken tarafından etkilenmektedir. Şarj ve deşarj çevrimleri, batarya sağlığı üzerinde en büyük etkiye sahip parametrelerden biridir. Batarya her şarj ve deşarj döngüsünde belirli bir miktar performans kaybına uğrar. Bu çevrimler arttıkça, kapasite düşüşü ve iç direnç artışı daha belirgin hâle gelir.

Ayrıca, bataryanın çalışma sıcaklığı da sağlık durumunu doğrudan etkiler. Yüksek sıcaklık, elektrokimyasal bozulmaları hızlandırarak bataryanın yaşlanmasını tetikler. Düşük sıcaklıklarda ise kapasite kaybı daha yavaş gerçekleşse de iç direnç artışı daha belirgin olabilir.

Bunun yanı sıra, bataryanın derin deşarj oranı da sağlık durumunu etkileyen önemli bir faktördür. Derin deşarjlar, özellikle kurşun-asit akülerde, kapasite kaybını hızlandırır ve bataryanın ömrünü kısaltır. LFP tipi Li-ion bataryalar ise derin deşarjlara daha dayanıklıdır ve bu durum, sağlık durumlarının daha uzun süre stabil kalmasına olanak sağlar. Şarj ve deşarj sırasında uygulanan akım seviyeleri de batarya sağlığı üzerinde belirleyici rol oynar. Yüksek akım oranları, batarya hücrelerinde ısınmayı artırarak yaşlanma süreçlerini hızlandırabilir. Ayrıca, bataryaların uzun süre yüksek şarj durumunda veya yüksek sıcaklıkta depolanması da sağlık durumunu olumsuz etkileyen faktörler arasında yer alır.



Şekil 2.16 Döngü sayısına göre farklı Li-ion batarya kimyalarına sahip bataryaların SOH değişimi [46]

LFP tipi Li-ion bataryalar, genetik olarak yüksek çevrim ömrü ve kararlı yapıları sayesinde, sağlık durumlarını uzun süre koruyabilen batarya türlerindendir. Uygun sıcaklık ve şarj koşullarında binlerce çevrim boyunca sınırlı kapasite kaybı ve düşük iç direnç artışı gösterirler [18]. Bu nedenle, LFP bataryalarda sağlık durumu takibi çoğunlukla kapasite bazlı olarak yapılır ve kapasite kaybı nispeten yavaş ilerler. Diğer yandan, kurşun-asit bataryalar, özellikle endüstriyel uygulamalarda daha kısa ömürlüdür ve sağlık durumları genellikle daha erken evrelerde bozulmaya başlar. Bu bataryalarda sülfatlaşma, aktif madde dökülmesi ve plakaların yapısal bozulması gibi yaşlanma mekanizmaları nedeniyle kapasite kaybı ve iç direnç artışı daha hızlı gerçekleşir. Bu nedenle kurşun-asit bataryalarda sağlık durumu izlenirken hem kapasite hem de iç direnç birlikte değerlendirilir.

Batarya sağlık durumu, yalnızca teknik bir parametre olmanın ötesinde, batarya sistemlerinin güvenli ve verimli çalışması için kritik bir göstergedir. Batarya yönetim sistemleri, sağlık durumu bilgisini kullanarak bakım planlamaları yapar, olası arızaları önceden tespit eder ve batarya değişim zamanını belirlemek için bu değeri temel alır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda sağlık durumu takibi, sistem verimliliğini ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak açısından büyük önem taşır.

2.3.6 Enerji Verimliliği ve Değişkenleri

Batarya enerji verimliliği, bataryanın şarj ve deşarj döngüleri sırasında ne kadar enerji kaybı yaşadığını ve sağladığı enerjinin ne ölçüde geri kullanılabilir olduğunu gösteren önemli bir performans göstergesidir. Bu verimlilik, bataryanın enerji dönüşüm etkinliğiyle doğrudan ilişkilidir ve hem ekonomik hem de teknik açıdan kritik bir parametredir.

Enerji verimliliği genel olarak iki temel başlık altında değerlendirilir. Bunlardan ilki Coulomb verimlilik veya şarj verimliliği olarak adlandırılır. Coulomb verimlilik, bataryanın şarj olurken aldığı toplam elektrik yükü ile deşarj sırasında verdiği toplam elektrik yükü arasındaki orana dayanır. Bu verimlilik, aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$\text{Coulombic Verimlilik (\%)} = \frac{Q_{\text{deşarj}}}{Q_{\text{şarj}}} \times 100 \quad (10)$$

Burada $Q_{deşarj}$ bataryanındeşarj sırasında sağladığı elektrik yükünü (Ah), $Q_{şarj}$ ise şarj sırasında alınan elektrik yükünü (Ah) ifade eder. Coulomb verimlilik, batarya kimyasal reaksiyonlarının ne kadar etkili olduğunu gösterir. LFP tipi Li-ion bataryalarda bu verimlilik genellikle yüzde 95 ila 99 arasında yüksek seviyelerde seyreder. Kurşun-asit bataryalarda ise bu oran genellikle yüzde 70 ila 85 aralığında kalır. Kurşun-asit bataryalarda elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında daha fazla yan reaksiyon meydana geldiğinden, Coulomb verimlilik daha düşüktür.

İkinci önemli gösterge ise enerji verimliliğidir. Enerji verimliliği, bataryanın şarj sırasında depoladığı enerji iledeşarj sırasında sağladığı enerji arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu hesaplama Watt-saat (Wh) bazında yapılır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\text{Enerji Verimliliği (\%)} = \frac{E_{deşarj}}{E_{şarj}} \times 100 \quad (11)$$

Burada $E_{deşarj}$ bataryanındeşarj sırasında sağladığı enerji miktarını (Wh), $E_{şarj}$ ise şarj sırasında depolanan enerji miktarını (Wh) temsil eder. Enerji verimliliği; bataryanın iç direnci, elektrokimyasal reaksiyon kinetiği ve şarj-deşarj sürecindeki ısı kayıplarına bağlı olarak değişir. İç direnci düşük olan bataryalarda enerji verimliliği daha yüksek olur, çünkü gerilim düşümü ve ısınma daha düşük seviyelerde gerçekleşir.

LFP tipi Li-ion bataryalar, düşük iç dirençleri ve yüksek kimyasal kararlılıkları sayesinde enerji verimliliği açısından oldukça avantajlıdır. Bu bataryalarda enerji verimliliği çoğu zaman yüzde 90'ın üzerinde seyretmekte ve çevrimler boyunca bu değer stabil kalmaktadır. Ayrıca LFP bataryalarda enerji verimliliği, yüksek şarj vedeşarj akımlarında dahi korunabilmektedir. Buna karşılık, kurşun-asit bataryalar daha yüksek iç dirence sahip olduğundan dolayı genellikle daha düşük enerji verimliliği sunar. Ayrıca kurşun-asit bataryalarda enerji verimliliği, batarya yaşlandıkça daha hızlı bir şekilde düşme eğilimi gösterir. Enerji verimliliği yalnızca bataryanın sağladığı elektrik enerjisini değil, aynı zamanda batarya sistemi içerisinde oluşan ısıyı ve termal yükleri de etkiler. Düşük enerji verimliliği, batarya içinde daha fazla ısı oluşmasına yol açar ve bu durum batarya yaşlanmasını hızlandırarak güvenlik risklerini artırabilir. Bu nedenle enerji verimliliği, batarya yönetim sistemleri tarafından dikkatle izlenen ve optimize edilen bir parametredir.

Sonuç olarak, enerji verimliliği batarya teknolojisinin temel performans göstergelerinden biridir ve bataryanın iç yapısı, şarj-deşarj akım profilleri, sıcaklık koşulları ve yaşlanma durumu gibi çok sayıda değişkene bağlı olarak şekillenir. LFP tipi Li-ion bataryalar, yüksek enerji verimlilikleri sayesinde modern enerji depolama sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Buna karşılık, kurşun-asit bataryalar ise daha düşük enerji verimlilikleri ve kısa çevrim ömürleri nedeniyle sınırlı uygulama alanlarında tercih edilmektedir.

2.3.7 Şarj/Deşarj Prosedürleri

Batarya şarj vedeşarj prosedürleri, bataryanın güvenli, verimli ve uzun ömürlü şekilde kullanılabilmesi için dikkatle belirlenmesi gereken temel süreçlerdir. Bu prosedürler, bataryanın kimyasal yapısına, iç direncine, kapasitesine ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

LFP tipi Li-ion bataryalar ve kurşun-asit bataryalar arasında şarj vedeşarj yöntemleri bakımından önemli farklar bulunmaktadır. Her iki batarya türü için şarj vedeşarj işlemleri, belirli gerilim ve akım limitleri dahilinde gerçekleştirilmelidir. LFP bataryalarda şarj işlemi genellikle iki aşamalı olarak uygulanır. İlk aşamada sabit akım (Constant Current – CC) yöntemi kullanılır. Bu aşamada, batarya belirlenen maksimum akım limiti doğrultusunda şarj edilir ve hücre gerilimi kademeli olarak artar. Hücre gerilimi maksimum limit olan genellikle **3.65 V** seviyesine ulaştığında, ikinci aşama olan sabit gerilim (Constant Voltage – CV) süreci başlar. Bu aşamada gerilim sabit tutulur ve akım, bataryanın doluluk oranına göre zamanla azalır. Bu şarj yöntemi literatürde CC-CV (Constant Current – Constant Voltage) olarak tanımlanır ve LFP bataryalarda en yaygın kullanılan şarj protokolüdür. LFP bataryalarındeşarj işlemi sırasında ise sabit akımladeşarj yaygındır. Deşarj işlemi sırasında hücre gerilimi kademeli olarak düşer. Minimum gerilim sınırı genellikle 2.5 V olarak kabul edilir. Şarj vedeşarj sırasında enerji miktarı, aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} V(t).I(t).dt \quad (12)$$

Burada E bataryanın sağladığı veya aldığı toplam enerjiyi (Wh), V(t) anlık gerilim değerini (V), I(t) anlık akım değerini (A) ve t0 ile tf şarj veyadeşarj sürecinin

başlangıç ve bitiş zamanlarını ifade eder. Kurşun-asit bataryalarda ise şarj prosedürü genellikle üç aşamalıdır. İlk aşamada sabit akım uygulanır ve hücre gerilimi yavaş yavaş yükselir. İkinci aşamada sabit gerilim sağlanarak akım kademeli olarak azaltılır. Üçüncü aşama ise dengeleme (equalization) veya absorpsiyon aşaması olarak adlandırılır. Bu aşamada düşük akım verilerek hücreler arasındaki dengesizlikler giderilmeye çalışılır. Kurşun-asit bataryalarda şarj sırasında aşırı gazlanma oluşabileceği için genellikle şarj gerilimleri 2.4 V – 2.6 V aralığında tutulur. Deşarj sırasında kurşun-asit bataryalarda da sabit akım yöntemi uygulanabilir. Ancak yüksek deşarj akımları, kurşun-asit bataryalarda kapasite kaybına ve plakaların sülfatlaşmasına yol açabileceğinden, genellikle deşarj akımı sınırlandırılır. Kurşun-asit hücrelerde minimum gerilim sınırı genellikle 1.75 V – 1.85 V aralığında belirlenir. Her iki batarya türü için de şarj ve deşarj işlemleri sırasında belirlenen gerilim ve akım sınırlarına dikkat edilmesi gerekir. Aksi takdirde batarya ömrü kısalabilir ve güvenlik riskleri ortaya çıkabilir. Bu nedenle batarya yönetim sistemleri, şarj ve deşarj süreçlerinde gerilim, akım ve sıcaklık parametrelerini sürekli izleyerek, limitlerin aşılması durumunda koruma önlemleri devreye sokar.

LFP bataryalar yüksek şarj hızlarına ve fırsat şarjına daha uygunken, kurşun-asit bataryalar daha uzun şarj süreleri gerektirir. Bununla birlikte, kurşun-asit bataryalarda bakım ihtiyacı daha yüksektir; elektrolit seviyesi düzenli olarak kontrol edilmeli ve şarj sırasında oluşan gaz çıkışı dikkatle yönetilmelidir. Sonuç olarak, şarj ve deşarj prosedürleri, batarya türüne özgü olarak belirlenmeli ve bataryaların teknik limitleri gözetilerek uygulanmalıdır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda doğru şarj/deşarj stratejileri, batarya performansı ve ömrü üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar.

2.3.8 Batarya Yaşlanma Mekanizmaları ve Modelleme Yaklaşımları

Batarya yaşlanması, bataryanın zamanla kapasite kaybına uğraması, iç direncinin artması ve genel performansının düşmesiyle sonuçlanan kaçınılmaz bir süreçtir. Yaşlanma mekanizmaları, bataryanın kimyasal yapısına, kullanım koşullarına ve çevresel etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu süreç, enerji depolama sistemlerinin verimliliğini ve ömrünü doğrudan etkilediği için, özellikle endüstriyel uygulamalarda dikkatle izlenmesi ve modellenmesi gereken bir konudur.

LFP tipi Li-ion bataryalar ve kurşun-asit bataryalar, yaşlanma mekanizmaları açısından önemli farklılıklar sergiler. LFP bataryalarda yaşlanma süreci genellikle daha yavaş ilerler ve uzun çevrim ömrü sağlanır. Buna karşın, kurşun-asit bataryalarda yaşlanma çok daha hızlı olabilir ve kapasite kaybı erken dönemlerde belirgin hâle gelir. Batarya yaşlanması iki ana başlık altında incelenir. Bunlardan ilki çevrimsel yaşlanma (cycle aging) olup, bataryanın şarj ve deşarj döngüleri sırasında meydana gelen kapasite kayıplarını ifade eder. İkincisi ise takvimsel yaşlanma (calendar aging) olarak adlandırılır ve bataryanın kullanılmaya bile zamanla kapasite kaybetmesiyle ilişkilidir.

Çevrimsel yaşlanma, bataryanın şarj ve deşarj döngüleri sırasında elektrotlarda oluşan yapısal değişiklikler, aktif madde kaybı, elektrolit bozulması ve SEI tabakasının kalınlaşması gibi mekanizmalar sonucunda gelişir. Bu süreç, genellikle yüksek şarj/deşarj akımları, derin deşarjlar ve aşırı sıcaklık koşullarında hızlanır. LFP bataryalarda çevrimsel yaşlanma daha yavaş ilerlerken, kurşun-asit bataryalarda bu tür yaşlanma daha kısa sürelerde ortaya çıkabilir. Kurşun-asit bataryalarda özellikle sülfatlaşma, aktif madde dökülmesi ve plakaların bozulması, çevrimsel yaşlanmanın temel nedenlerindendir.

Takvimsel yaşlanma ise bataryanın şarj durumu ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak zamanla kapasitesinin azalmasıdır. Yüksek sıcaklıkta uzun süre depolanan veya yüksek şarj durumunda bekletilen bataryalarda takvimsel yaşlanma daha hızlı gerçekleşir. LFP bataryalar, düşük takvimsel yaşlanma eğilimleriyle bilinirken, kurşun-asit bataryalarda bu süreç daha belirgindir. Batarya yaşlanmasını matematiksel olarak ifade etmek için çeşitli modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu modeller, bataryanın kapasite kaybını veya iç direnç artışını zaman fonksiyonu olarak tahmin etmeye yarar. Basit bir kapasite kaybı modeli şu şekilde yazılabilir:

$$Q(t) = Q_0 - k \cdot t \quad (13)$$

Burada $Q(t)$ bataryanın t anındaki kapasitesini (Ah), Q_0 başlangıç kapasitesini (Ah), k ise yaşlanma hız sabitini temsil eder. Bu lineer model, özellikle başlangıç evrelerinde kapasite kaybını basitçe açıklamak için kullanılabilir.

Daha karmaşık yaşlanma modelleri ise çevrim sayısı, sıcaklık, şarj durumu ve şarj/deşarj akımı gibi çoklu parametreleri içerebilir. Örneğin, çevrim sayısına bağlı yaşlanma modeli şu şekilde ifade edilebilir:

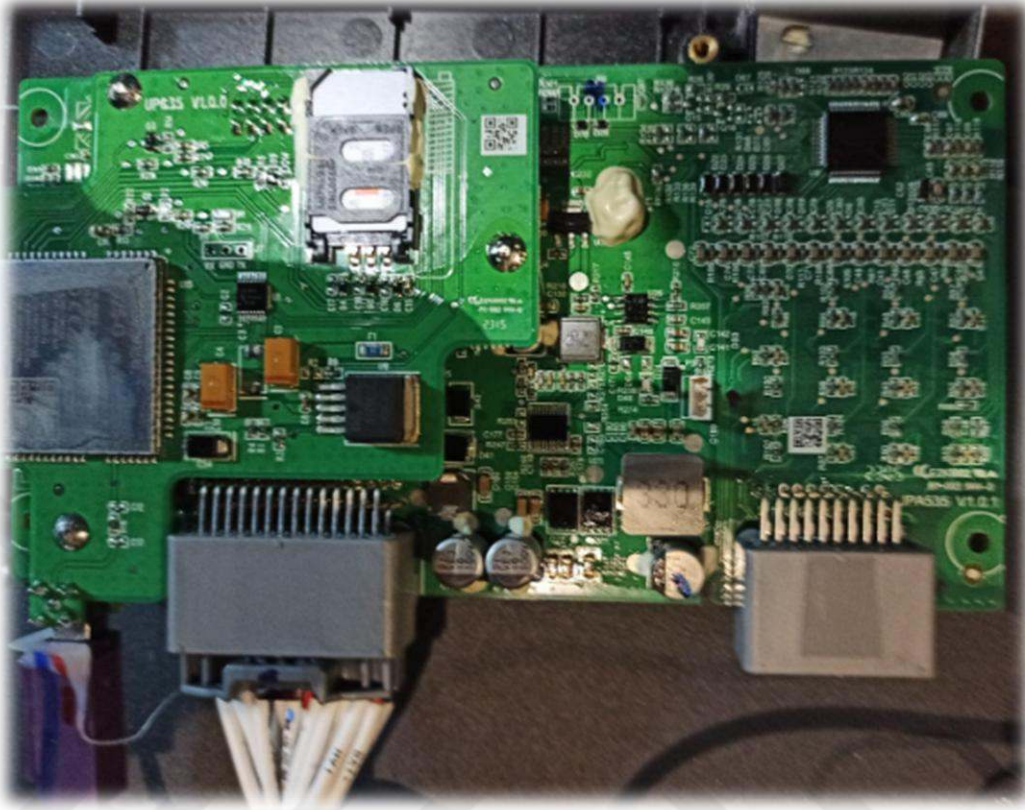
$$Q_{loss} = a \cdot N^b \quad (14)$$

Burada Q_{loss} kapasite kaybını (Ah), N çevrim sayısını, a ve b ise deneysel olarak belirlenen katsayıları temsil eder. Bu tür modeller, özellikle çevrimsel yaşlanmanın öngörülmesinde yaygın olarak kullanılır. LFP bataryalarda genellikle SEI tabaka büyümesi, lityum kaybı ve elektrot yapısal değişimleri gibi faktörler yaşlanma modellerine dâhil edilir. Kurşun-asit bataryalarda ise sülfatlaşma, aktif madde kaybı ve elektrolit bozulması ön planda olduğundan, modeller bu parametreler üzerine kurulmaktadır.

Batarya yaşlanma modelleri, BYS tarafından SOH tahmininde kullanılmakta ve batarya ömrünün tahmin edilmesi, bakım planlamalarının yapılması ve enerji yönetim stratejilerinin optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle yaşlanma modellemesi, modern batarya teknolojilerinde hem akademik araştırmaların hem de endüstriyel uygulamaların odak noktalarından biridir.

2.4 Batarya Yönetim Sistemi (BYS) ve Fonksiyonları

Batarya yönetim sistemi (Battery Management System – BYS), batarya paketlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla tasarlanan elektronik bir kontrol ve koruma sistemidir. Modern enerji depolama sistemlerinde, özellikle Li-ion bataryalarda, BYS bir zorunluluk olarak kabul edilmektedir. BYS, batarya hücrelerinin gerilim, akım, sıcaklık ve diğer önemli parametrelerini gerçek zamanlı olarak izleyerek batarya performansını optimize eder ve olası arızalara karşı koruma sağlar [12].



Şekil 2.17 Forklift bataryası için kullanılan pasif dengeleme sistemine sahip bir batarya yönetim sistemi

BYS'nin en temel fonksiyonu, batarya hücrelerinin gerilim seviyelerini sürekli olarak izlemektir. Bu sayede, her hücre için maksimum ve minimum gerilim limitleri arasında güvenli çalışma sağlanır. Özellikle lityum demir fosfat (LFP) bataryalarda, hücreler arası gerilim farkları zamanla büyüyebilir. Bu nedenle BYS, hücreler arasında dengeleme (balancing) işlemi yaparak hücre voltajlarını eşitler. Dengeleme işlemi, genellikle pasif veya aktif dengeleme yöntemleriyle gerçekleştirilir. Pasif dengeleme yönteminde, fazla şarj olmuş hücrelerdeki enerji dirençler üzerinden ısıya dönüştürülerek harcanır. Aktif dengeleme ise daha gelişmiş bir yaklaşımdır ve fazla enerjiyi diğer hücrelere aktararak enerji kaybını minimize eder.

BYS, akım kontrolü açısından da kritik bir rol üstlenir. Şarj ve deşarj akımları belirlenen sınırların üzerine çıktığında, sistem koruma moduna geçerek akımı keser veya sınırlayıcı önlemler uygular. Bu durum, batarya hücrelerinin zarar görmesini önler. Aynı

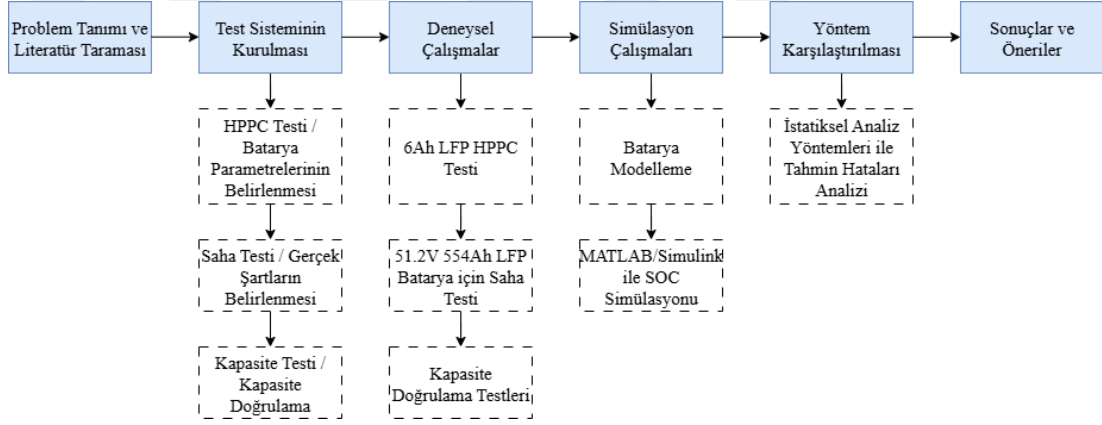
zamanda BYS, sıcaklık izleme fonksiyonuna da sahiptir. Hücre sıcaklıkları anlık olarak izlenir ve belirlenen sıcaklık aralıklarının dışına çıkıldığında batarya sistemi otomatik olarak devre dışı bırakılır veya soğutma sistemleri aktive edilir [25].

Enerji yönetimi de BYS'nin önemli görevlerinden biridir. BYS, SOC ve SOH gibi temel batarya parametrelerini hesaplayarak batarya kullanımını optimize eder. Bu hesaplamalarda genellikle CC, gerilim analizleri ve model tabanlı algoritmalar kullanılır. Özellikle LFP bataryalarda SOC ve SOH tahminlerinde yüksek doğruluk sağlamak için gelişmiş algoritmalar uygulanmaktadır. Kurşun-asit bataryalarda ise BYS daha basit yapıda olabilir; çoğu zaman sadece gerilim izleme ve temel koruma işlevleriyle sınırlı kalır.

BYS'nin bir diğer önemli işlevi iletişim ve veri kayıdır. Endüstriyel uygulamalarda BYS, batarya verilerini CAN-BUS gibi protokoller üzerinden üst düzey kontrol birimlerine iletir. Bu sayede operatörler, batarya sistemi hakkında detaylı bilgi sahibi olur ve batarya yönetimi uzaktan izlenebilir. Ayrıca, arıza tespiti ve bakım planlamaları için geçmişe dönük veri kaydı da BYS üzerinden gerçekleştirilir. Bazı gelişmiş BYS yapılarında, hücre başına direnç ve kapasitans gibi elektriksel parametrelerin takibi yapılabilmekte ve hücre yaşlanması anlık olarak izlenebilmektedir. Bu tür sistemlerde, batarya yaşlanma modelleriyle entegre çalışan algoritmalar sayesinde batarya ömrü tahmin edilmekte ve batarya değişim zamanları önceden planlanabilmektedir. Özetle, BYS; batarya güvenliği, performans optimizasyonu, ömür uzatılması ve enerji yönetimi açısından vazgeçilmez bir sistemdir. LFP tipi Li-ion bataryalarda BYS kullanım zorunluluğu oldukça yüksekken, kurşun-asit bataryalarda BYS ihtiyacı genellikle daha düşük seviyededir. Ancak günümüzde, enerji verimliliği ve uzaktan izleme gereksinimlerinin artmasıyla birlikte, kurşun-asit bataryalarda da BYS kullanımının giderek yaygınlaştığı görülmektedir.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan batarya enerji depolama sistemlerinin teknik özellikleri, deneysel test süreçleri, saha uygulamaları ve analiz yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Öncelikle elektrikli forklift uygulamalarında kullanılan LFP kimyasına sahip batarya sistemlerinin temel parametreleri ve yapısal özellikleri ele alınmıştır. Ardından saha testlerinde kullanılan forklift aracı ve test parkuru tanıtılarak, batarya sisteminin gerçek kullanım koşullarında nasıl değerlendirildiği açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan BYS donanımı ve yazılımının teknik detayları, veri toplama yöntemleri ve iletişim altyapısı da bu bölüm kapsamında sunulmuştur.



Şekil 3.1 Bu tez kapsamında izlenen metodolojik adımları gösteren genel blok diyagramı

Ayrıca, SOC tahmininde kullanılan yöntemlerin uygulanma süreçleri ve modelleme detayları bu bölümde açıklanmıştır. Bu OCV tabanlı yöntemler, Coulomb sayımı yaklaşımı ve Kalman filtresi temelli gelişmiş algoritmalar karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Son olarak, test verilerinin analizinde kullanılan istatistiksel hata metrikleri ve veri işleme teknikleri detaylandırılmıştır. Bu bölümde yer alan tüm yöntemler, çalışmanın bilimsel bütünlüğünü sağlamak ve batarya sistemlerinin performans analizine sağlam bir temel oluşturmak amacıyla titizlikle seçilmiş ve uygulanmıştır.

3.1 Çalışmada Kullanılan Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) Özellikleri

Bu tez çalışmasında, elektrikli forklift uygulamaları için kullanılan bir batarya enerji depolama sistemi (Battery Energy Storage System – BESS) temel alınmıştır. Araştırma kapsamında hem gerçek saha verileriyle çalışan batarya sistemi hem de

laboratuvar ortamında gerçekleştirilen hücre düzeyindeki testler birlikte değerlendirilmiştir. Kullanılan batarya sistemleri, LFP kimyasına sahip hücrelerden oluşmaktadır ve forklift uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir enerji depolama teknolojisini temsil etmektedir.

Çalışmada kullanılan gerçek batarya sistemi, nominal olarak 51.2 V gerilime ve 554 Ah kapasiteye sahip bir batarya paketidir. Bu batarya, endüstriyel forklift uygulamalarında kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış ve içerisinde prizmatik yapıda LFP hücreler barındırmaktadır. Her bir hücre, 3.2 V nominal gerilime sahip olup, batarya paketi toplamda sekiz adet seri bağlı hücreden oluşmaktadır. Seri bağlanan hücreler, toplamda 51.2 V nominal paket gerilimi sağlamaktadır. Paket nominal kapasitesi ise 554 Ah olarak belirlenmiştir.

Gerçek batarya sisteminde kullanılan LFP hücrelerin temel elektriksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu hücreler, yüksek enerji yoğunluğu, düşük iç direnç ve uzun çevrim ömrü ile dikkat çekmektedir. Hücrelerin şarj voltaj limiti 3.65 V, deşarj voltaj limiti ise 2.5 V olarak belirlenmiştir. Hücrelerin nominal kapasitesi 277 Ah olarak belirtilirken, üretici verilerine göre hücrelerin tipik iç direnci oda sıcaklığında $\leq 1 \text{ m}\Omega$ seviyesindedir.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testlerde ise, simülasyon amacıyla daha küçük kapasiteli LFP hücreler kullanılmıştır. Bu hücreler, aynı kimyaya sahip olmakla birlikte, 3.2 V nominal gerilim ve 6 Ah nominal kapasiteye sahiptir. Bu hücreler, özellikle modelleme çalışmaları ve parametre çıkarım testlerinde tercih edilmiştir. Simülasyon hücrelerinde de benzer şekilde şarj voltaj limiti 3.65 V ve deşarj voltaj limiti 2.5 V olarak korunmuştur. Simülasyon hücrelerinin iç direnci ise yaklaşık $\leq 3 \text{ m}\Omega$ olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan gerçek batarya sistemi ve simülasyon hücreleri arasında temel farklar kapasite ve iç direnç değerleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak her iki batarya yapısında da aynı LFP kimyası tercih edilerek, sahadan elde edilen test verilerinin laboratuvar ortamındaki modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, hem gerçek kullanım senaryolarının hem de kontrollü test koşullarının analiz edilmesine imkân tanımaktadır.

Batarya sisteminin temel elektriksel özelliklerine ek olarak, çalışma sırasında dikkatle izlenen parametreler arasında hücre gerilimi, paket gerilimi, şarj vedeşarj akımı, hücre sıcaklığı ve batarya sıcaklığı yer almaktadır. Bu parametreler, hem saha testleri hem de laboratuvar testlerinde veri kaydı sistemleri aracılığıyla anlık olarak izlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan batarya enerji depolama sistemleri, forklift uygulamaları için uygun LFP batarya teknolojisini temsil etmekte olup, hem saha verileri hem de laboratuvar testleri açısından güçlü bir araştırma platformu sunmaktadır. İlgili parametreler, SOC tahmini ve batarya performans analizleri için temel giriş verileri olarak kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Simülasyonda kullanılan hücre ile gerçek saha şartlarında kullanılan hücrenin teknik karşılaştırması

Parametreler	Saha Deney Hücresi	Simülasyon Hücresi
Katot / Anot Malzemesi	LFP / Grafit	LFP / Grafit
Hücre Tipi	Prizmatik	Silindirik (32700)
Nominal Kapasite (Ah)	277	6
Nominal Gerilim (V)	3.2	3.2
Maksimum Gerilim (V)	3.65	3.65
Minimum Gerilim (V)	2.7	2.7
Çalışma Sıcaklığı (°C)	20 (Test Ortam Sıcaklığı)	25 (Simülasyon)
Üretici	Ganfeng Lithium Battery	Power Xtra
Uygulama	Forklift Uygulaması	Hücre Düzeyi Simülasyon

3.2 Forklift Uygulaması ve Test Sisteminin Tanıtımı

Bu tez çalışmasında, batarya enerji depolama sistemlerinin performans değerlendirmesi, doğrudan endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan gerçek saha koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, forklift uygulaması seçilmiş ve saha testleri, endüstriyel forklift araçları üzerinde uygulanmıştır. Testlerde kullanılan forklift aracı, özellikle depo içi taşıma operasyonları ve endüstriyel yükleme-boşaltma süreçlerinde yaygın olarak tercih edilen bir model olup, elektrikli tahrik sistemine sahip olacak şekilde yapılandırılmıştır.

Testlerde kullanılan forklift aracı, 51.2 V nominal çalışma gerilimine sahip LFP batarya sistemi ile donatılmıştır. Forkliftin taşıma kapasitesi 2.0 ton olarak belirlenmiş ve test sırasında bu yük kapasitesi dikkate alınarak test koşulları oluşturulmuştur. Aracın tahrik motoru ve hidrolik sistemleri, batarya sisteminden beslenmiş ve tüm enerji tüketimi, batarya sistemi üzerinden sağlanmıştır. Bu sayede, batarya sisteminin gerçek kullanım senaryolarında maruz kaldığı akım, gerilim ve sıcaklık koşulları doğrudan gözlemlenebilmiştir.

Tablo 3.2 Saha testlerinde kullanılan forkliftin teknik özellikleri

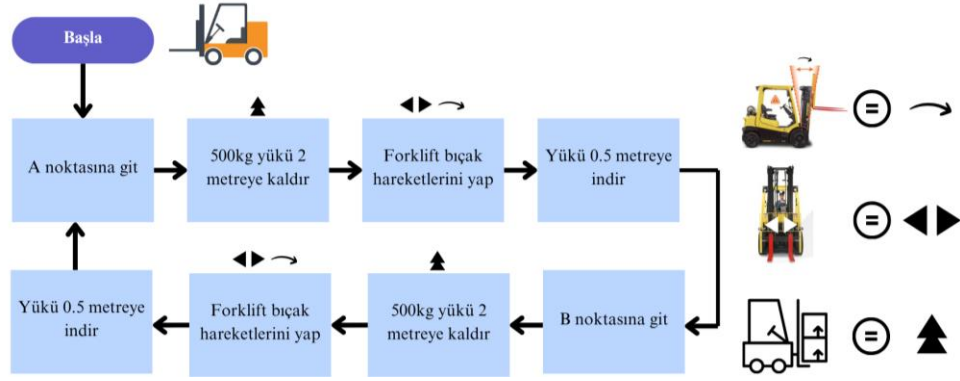
Özellik	Birim	Değer
Model	-	Still RX 20-20P
Yükleme Ağırlığı (Q)	kg	2000
Ağırlık Merkezi Farkı (c)	mm	500
Akü Gerilimi / Kapasitesi	V / Ah	48 / 625 (K5)
Servis Ağırlığı (akü dahil)	kg	3474 kg
Asansör Yüksekliği (inik halde) (h1)	mm	2160
Kaldırma Yüksekliği (h3)	mm	3180 mm
En Yüksek Kaldırma Yüksekliği (h4)	mm	3742 mm
Uzunluk (l1)	mm	2851 mm
Genişlik (b1)	mm	1149 mm
Dönüş Çapı (Wa)	mm	1663 mm
Yürüme Hızı (yükli/yüksüz)	km/h	16 / 20
Kaldırma Hızı (yükli/yüksüz)	m/s	0.45 / 0.63
Tırmanma (yükli/yüksüz)	%	15/ 18.1
Yürüme Motor Gücü	kW	2 × 6.5
Kaldırma Motor Gücü	kW	11
Lastik Boyutu (Ön / Arka)	-	200/50-10 / 150/75-8



Şekil 3.2 Saha testinde kullanılan STILL RX 20-20P Forklift [47]

Saha testleri, endüstriyel forkliftler için uluslararası kabul görmüş test standardı olan VDI 2198 normuna uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu standart, forklift araçlarının enerji tüketimi, sürüş dinamikleri ve operasyonel performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Testlerde kullanılan sürüş döngüsü, forkliftin ileri ve geri hareketleri, yük kaldırma ve indirme işlemleri, yavaşlama ve durma süreçleri gibi çeşitli manevraları içermektedir. Böylece, batarya sistemi hem sürüş sırasında hem de yük taşıma esnasında farklı yük profilleri altında değerlendirilmiştir.

Test parkuru, depo veya fabrika ortamında karşılaşılan tipik operasyonel koşulları yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Parkur üzerinde belirlenen rotalarda forklift aracı belirli hız ve ivme değerleriyle hareket ettirilmiş, aynı zamanda belirlenen noktalarda yük kaldırma ve indirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Test süresi boyunca batarya sistemine ait hücre gerilimleri, paket gerilimi, şarj ve deşarj akımları, batarya sıcaklığı ve araç konum verileri sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, batarya performans analizlerinde kullanılmak üzere yüksek hassasiyetli veri toplama sistemleri aracılığıyla toplanmıştır.



Şekil 3.3 Saha testi prosedürü

Testler sırasında özellikle SOC değişimleri, deşarj eğrileri ve batarya sıcaklık profilleri detaylı şekilde izlenmiştir. Forklift aracının tüm operasyonları boyunca batarya sistemi üzerindeki yük profili, şarj-deşarj döngüleri, enerji tüketimi ve termal davranış ortaya konmuştur. Böylece, batarya sisteminin forklift uygulamalarında sergilediği gerçek performans kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu saha testleri sonucunda elde edilen veriler, daha sonraki bölümlerde batarya şarj durumu tahmin yöntemlerinin doğrulaması ve batarya performans analizleri için temel veri seti olarak kullanılmıştır. Gerçek çalışma koşullarında elde edilen bu veriler, batarya sistemlerinin endüstriyel uygulamalarda karşılaştığı zorlukları ve performans gereksinimlerini anlamak açısından önemli bir kaynak teşkil etmektedir.



Şekil 3.4 Saha testinde kullanılan 51.2V 554Ah Li-ion batarya

3.3 Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Özellikleri

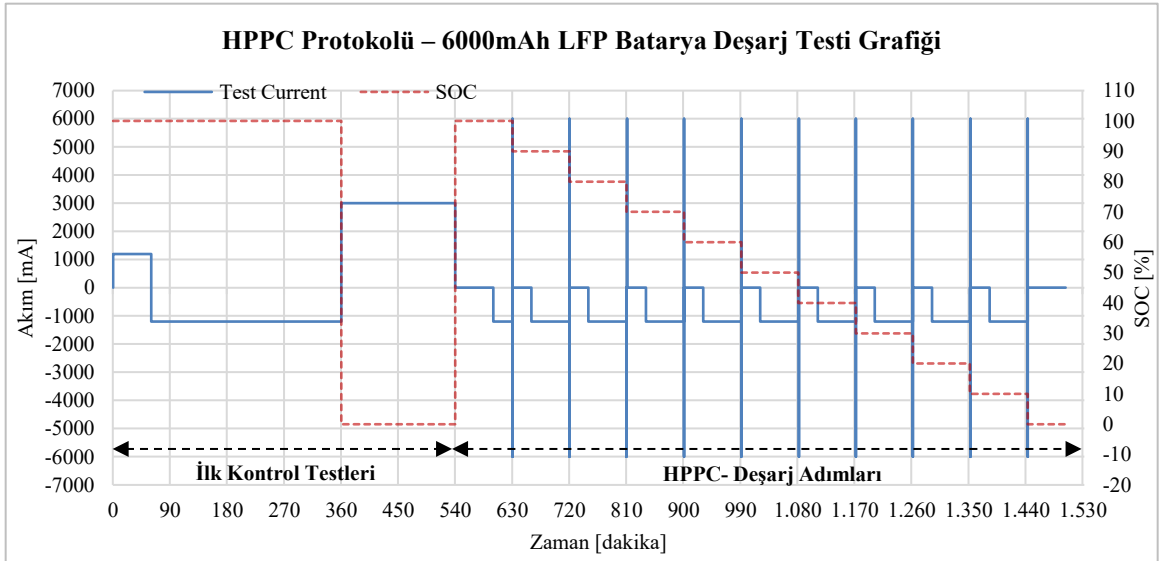
Bu tez çalışmasında kullanılan batarya enerji depolama sistemi, gelişmiş özelliklere sahip bir BYS ile donatılmıştır. BYS, batarya paketinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla temel kontrol ve izleme görevlerini üstlenmektedir. Çalışmada kullanılan BYS, özellikle LFP kimyasına sahip batarya sistemleri için optimize edilmiş olup, yüksek akım kapasitesine sahip endüstriyel uygulamalara uygun olarak tasarlanmıştır.

BYS, batarya paketini oluşturan tüm hücrelerin gerilim seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir. Her bir hücrenin gerilimi, şarj ve deşarj işlemleri boyunca sürekli takip edilmekte ve belirlenen alt ve üst gerilim limitleri arasında kalması sağlanmaktadır. LFP bataryalarda bu limitler genellikle 2.5 V ile 3.65 V arasındadır. Gerilim sınırlarının aşılması durumunda BYS, koruma mekanizmalarını devreye sokarak şarj veya deşarj işlemini kesmektedir. BYS aynı zamanda batarya paketine ait toplam gerilim, şarj ve deşarj akımları ve sıcaklık değerlerini de sürekli olarak izlemektedir. Hücre ve batarya sıcaklıkları, paket içerisindeki sıcaklık sensörleri aracılığıyla anlık olarak ölçülmekte ve sıcaklık limitleri aşıldığında sistem koruma moduna geçmektedir. Bu sayede, batarya sistemi aşırı ısınma gibi termal tehlikelere karşı korunmaktadır. Hücre dengeleme işlemleri de BYS'nin temel fonksiyonları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan BYS, pasif dengeleme yöntemiyle çalışmakta olup, şarj sırasında hücreler arasındaki gerilim farklarını minimize etmek için fazla şarj olmuş hücrelerden enerji çekerek, hücre gerilimlerini dengelemektedir. Dengeleme işlemi, batarya ömrünün uzatılması ve performansın korunması açısından kritik bir işlemdir. BYS, SOC ve SOH gibi önemli parametreleri hesaplayabilme yeteneğine sahiptir. Bu hesaplamalarda Coulomb sayımı yöntemi temel alınmakta, akım sensörlerinden elde edilen veriyle şarj ve deşarj süreçleri anlık olarak izlenmektedir. BYS tarafından elde edilen SOC ve SOH değerleri, batarya kullanımını optimize etmek ve sistem güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Veri iletişimi açısından BYS, endüstride yaygın olarak kullanılan CAN-BUS haberleşme protokolünü desteklemektedir. Bu sayede, batarya sistemi ile üst düzey kontrol sistemleri arasında yüksek hızlı ve güvenilir veri alışverişi sağlanmaktadır. Forklift uygulamasında BYS, araç kontrol ünitesi (Vehicle Control Unit – VCU) ile sürekli iletişim hâlinde çalışarak,

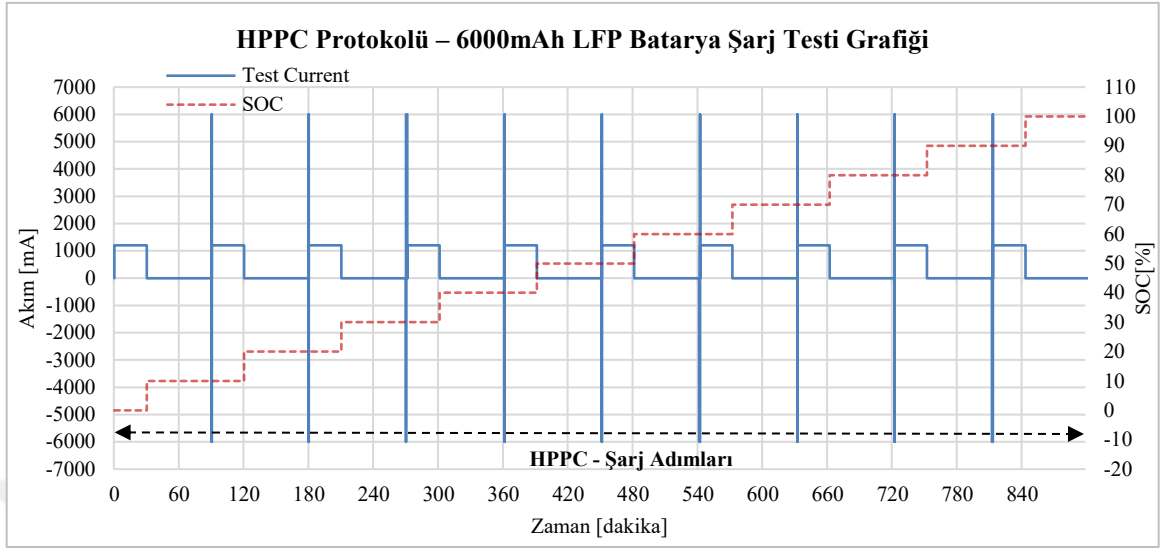
batarya durumunu ve olası arızaları anlık olarak bildirmektedir. BYS ayrıca kapsamlı veri kaydı özelliğine sahiptir. Batarya gerilimleri, akımlar, sıcaklıklar, SOC ve SOH verileri düzenli aralıklarla kaydedilmekte ve geçmişe dönük performans analizleri için saklanmaktadır. Bu veri kayıtları, batarya yaşlanma analizlerinde ve bakım planlamalarında önemli bir referans kaynağı oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan BYS, özellikle forklift gibi ağır hizmet tipi elektrikli araçlar için geliştirilmiş olup, yüksek akım taşıma kapasitesi, geniş gerilim izleme aralığı, termal koruma özellikleri ve gelişmiş dengeleme fonksiyonlarıyla öne çıkmaktadır. Bu sayede, saha testleri ve laboratuvar deneyleri boyunca batarya sisteminin güvenliğini sağlamak ve batarya performansının doğru şekilde izlenmesine imkân tanımaktadır.

3.4 Batarya Parametreleri Belirleme Testleri

Saha testlerini kontrollü ve tekrarlanabilir bir simülasyon ortamıyla desteklemek amacıyla, laboratuvar ortamında tek hücreli LFP bataryalar üzerinde karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, forklift batarya paketinde kullanılan prizmatik LFP hücrelerle elektrokimyasal olarak benzer özelliklere sahip olan Power-Xtra 32700 formatında, 6000 mAh kapasiteli silindirik hücreler tercih edilmiştir. Böylece, testlerde elde edilen sonuçların forklift batarya sistemiyle temsil edilebilirliği sağlanmıştır [9].



a)



b)

Şekil 3.5 HPPC test profilleri: a) ilk kontrol ve deşarj adımları b) şarj adımları

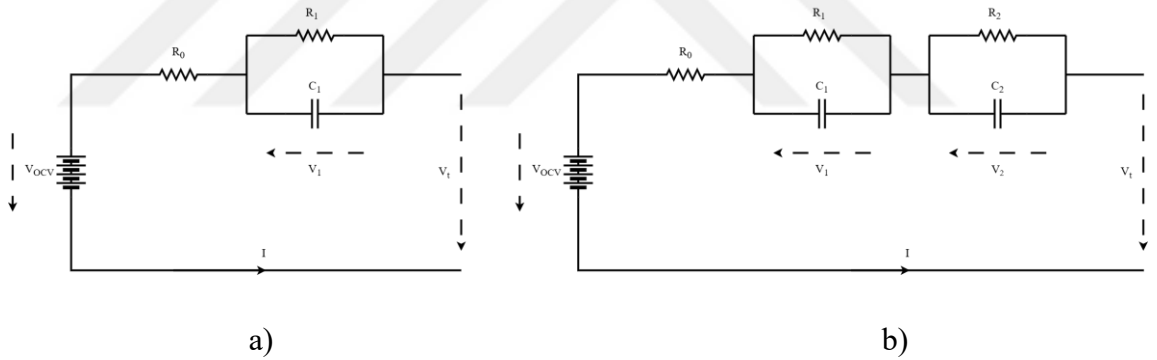
Çeşitli C oranlarında uygulanan şarj ve deşarj testleri sonucunda, batarya hücrelerinin OCV–SOC ilişkisi belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık testleri ile iç direnç ve terminal gerilim üzerine sıcaklığın etkileri analiz edilmiştir.

Test prosedürünün temelini ise HPPC testi oluşturmuştur. HPPC testi, bir bataryanın iç direnci, polarizasyon davranışı ve dinamik gerilim tepkisi gibi önemli parametrelerini belirlemek amacıyla uygulanan standartlaştırılmış bir karakterizasyon testidir. Özellikle ECM kullanan SOC tahmin yöntemlerinde, RC ağlarının (R_0 , R_1 , C_1 vb.) doğru şekilde çıkarılması bu test sayesinde mümkün olmaktadır. HPPC testi, genellikle %10 aralıklarla değişen SOC seviyelerinde uygulanır ve her bir SOC adımında hem şarj hem de deşarj yönünde kısa süreli (örneğin 10 s) yüksek akım darbeleri uygulanarak bataryanın anlık gerilim düşümü (ohmik tepki) ve zamana bağlı gerilim değişimi (polarizasyon davranışı) kaydedilir. Bu veriler, gerçek zamanlı RC parametre çıkarımı ve model kalibrasyonu için temel oluşturur. Testin tipik protokolü, tam şarj durumundan (%100 SOC) başlayarak bataryanın belirli bir sabit akım ile (örneğin 0.5C) kademe kademe boşaltılmasını ve her SOC adımında 10 saniyelik deşarj, ardından 40 saniyelik dinlenme, sonra da 10 saniyelik şarj darbeleri uygulanmasını içerir. Bu süreç sırasında elde edilen voltaj-akım verileri, iç direnç (R_0) ve zaman sabiti ($\tau = R_1 \cdot C_1$) gibi model parametrelerinin regresyon veya optimizasyon yöntemleriyle

çıkarılmasını sağlar. Bu sayede elde edilen parametreler, Extended Kalman Filter (EKF) gibi model tabanlı filtrelerde kullanılan batarya modeli (ör. Thevenin modeli) için giriş verisi olarak kullanılır. HPPC testi, aynı zamanda bataryanın yüksek güçlü darbelerle verdiği yanıtı, yani güç analizini de mümkün kılar.

Test sürecinde, hücreler öncelikle belirlenen SOC seviyelerinde ısıl denge sağlanana kadar stabilize edilmiştir. Ardından kontrollü akım darbeleri uygulanmış ve hücrelerin bu akım darbelerine karşı verdiği gerilim tepkileri kaydedilmiştir. Bu gerilim yanıtları sayesinde, ECM ait parametreler elde edilmiştir. Çıkarılan parametreler arasında, ohmik direnç (R_0), geçici direnç (R_1) ve geçici kapasitans (C_1) yer almaktadır [15]. Şekil 3.6'da birinci ve ikinci dereceden batarya eşdeğer devreleri verilmiştir. Dinamik davranışı temsil eden zaman sabiti ise şu formül ile hesaplanmıştır:

$$\tau = R_1 \times C_1 \quad (15)$$



Şekil 3.6 Thevenin eşdeğeri: a) Birinci dereceden, b) İkinci dereceden

Şekil 3.2 HPPC test dizisini görsel olarak göstermektedir. Tüm parametreler, SOC'ye bağlı vektörler şeklinde yapılandırılarak MATLAB/Simulink ortamında detaylı ECM oluşturulmuştur. Bu modeller, CC, OCV, EKF, UKF ve AEKF gibi SOC tahmin algoritmalarının uygulanmasını desteklemiştir [10]. Ayrıca, saha testlerinde VDI 2198 döngüsü altında kaydedilen dinamik akım profilleri, laboratuvar ortamında bu modeller üzerinde uygulanarak algoritmaların performansı gerçekçi ve sağlam bir şekilde doğrulanmıştır. Parametre çıkarım sürecindeki temel amaç, hücrelerin dinamik yük koşulları altındaki gerçek davranışlarını laboratuvar ortamında doğru bir şekilde yansıtmak ve SOC tahmin algoritmalarının simülasyon ortamındaki doğruluğunu değerlendirmek olmuştur. Bu sayede, oluşturulan modelin hücrenin elektrokimyasal

karakteristiklerini gerçeğe uygun şekilde temsil etmesi sağlanmış ve algoritmaların karşılaştırılmasına sağlam bir temel oluşturulmuştur.

3.5 Şarj Durumu (SOC) Tahmin Yöntemlerinin Uygulanması

Bu tez çalışmasında, SOC tahmininde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir. SOC tahmin yöntemleri, batarya yönetim sistemlerinde enerji yönetimi, güvenlik ve performans optimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Çalışma kapsamında hem basit hem de gelişmiş SOC tahmin algoritmaları değerlendirilmiştir [11] [21] [22]. İlk olarak, OCV tabanlı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntem, bataryanın belirli bir süre boyunca herhangi bir yük altında kalmaksızın, yani akım akışı olmadan ölçülen gerilim değeri ile SOC arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Temelde, batarya elektrotları arasında potansiyel farkı, bataryanın içinde bulunduğu SOC seviyesine göre değişkenlik gösterir. Bu ilişki, batarya kimyasına özgüdür ve her batarya türü için karakteristik bir OCV-SOC eğrisi bulunmaktadır [20].

OCV yöntemi, bataryanın yük altında olmadığı, yani açık devre koşullarında belirli bir süre dinlendirilmesinin ardından ölçülen gerilim değerine dayanır. Bu dinlenme süresi, bataryanın elektrokimyasal dengesinin sağlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Genellikle bu süre, batarya sıcaklığına, iç direncine ve kapasitesine bağlı olarak birkaç saat sürebilir. Hücre dinlendirilip denge sağlandığında ölçülen gerilim değeri, doğrudan o anki SOC seviyesini temsil eder. Bu yöntem kapsamında, batarya hücreleri farklı şarj seviyelerine getirilmiş, ardından yeterli süre dinlendirilerek hücre gerilimleri kaydedilmiştir. Böylece bataryanın tüm SOC aralığını kapsayan bir OCV-SOC karakteristik eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri, daha sonra SOC tahmininde referans olarak kullanılmıştır.

Ancak, LFP tipi Li-ion bataryalarda bu yöntem bazı sınırlamalar taşımaktadır. LFP bataryaların OCV-SOC eğrisi, özellikle orta SOC seviyelerinde oldukça yatay bir seyir izlemektedir. Bu durum, SOC değişimlerinin gerilim üzerinde çok sınırlı bir etki yaratmasına neden olur. Yani, batarya SOC'si değişse bile hücre geriliminde belirgin bir değişim gözlenmeyebilir. Bu nedenle OCV yönteminin, LFP bataryalarda doğruluğu düşük olabilmekte ve bataryanın hassas SOC takibi için yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca, bu yöntemin pratik uygulamalarda kullanılabilirliği de sınırlıdır; çünkü batarya

genellikle aktif kullanım hâlinde olduğundan, uzun dinlenme süreleri için fırsat bulunamayabilir. Tüm bu nedenlerden dolayı, OCV tabanlı yöntem çoğunlukla referans SOC eğrisi oluşturmak amacıyla laboratuvar ortamında tercih edilmekte, pratik uygulamalarda ise daha gelişmiş yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada da OCV yöntemi, batarya model parametrelerinin belirlenmesi ve diğer SOC tahmin yöntemlerinin doğrulaması amacıyla değerlendirilmiştir.

İkinci olarak uygulanan yöntem, CC yöntemidir. Bu yöntem, SOC tahmininde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Temel prensibi, batarya üzerinden geçen akımın zamanla entegrasyonuna dayanır. Başka bir deyişle, bataryaya giren veya bataryadan çıkan toplam elektrik yükü ölçülerek SOC hesaplanır. Bu yöntem, akım ölçümüne dayandığı için “akım entegrasyon yöntemi” olarak da adlandırılmaktadır. Coulomb Sayımı yönteminde, bataryanın şarj durumu şu genel denklemle ifade edilir:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{Q_{nominal}} \int_{t_0}^t I(t) dt \quad (16)$$

Bu formülde, SOC(t) bataryanın belirli bir ttt anındaki şarj durumu yüzdesini ifade etmektedir. SOC(t₀) terimi ise bataryanın başlangıçtaki şarj durumu yüzdesini göstermektedir. Formülde yer alan Q_{nominal}, bataryanın nominal kapasitesini temsil eder ve birimi Amper-saat (Ah) olarak ifade edilir. I(t) ise bataryadan geçen anlık akım değeridir ve Amper (A) cinsinden ölçülür. Ayrıca, t₀ ve t değişkenleri ise entegrasyonun gerçekleştirildiği zaman aralığını belirtmektedir.

Bu yöntemde, şarj sırasında bataryaya giren akımlar pozitif, deşarj sırasında bataryadan çıkan akımlar ise negatif olarak alınır. Akım sürekli olarak ölçülerek, bataryaya giren veya çıkan toplam elektrik yükü hesaplanır ve bu değer bataryanın SOC seviyesini belirlemek için kullanılır. Coulomb Sayımı yöntemi, uygulaması son derece basit olması ve gerçek zamanlı SOC izleme imkânı sağlaması nedeniyle BYS en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Özellikle yük değişimlerinin sık olduğu dinamik uygulamalarda, yüksek akım hassasiyetine sahip sensörlerle birlikte kullanıldığında kısa vadede oldukça yüksek doğruluk elde edilebilir.

Ancak bu yöntemin bazı önemli sınırlamaları bulunmaktadır. Bunların başında birikimli hata problemi gelir. Akım sensörlerinde meydana gelen küçük ölçüm hataları zamanla entegrasyon sırasında büyüyerek ciddi SOC sapmalarına yol açabilir. Ayrıca sıcaklık değişimleri, batarya kapasitesindeki yaşlanma kaynaklı düşüşler ve şarj-deşarj verimlilik kayıpları da Coulomb Sayımı yöntemiyle elde edilen SOC doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, yöntemin doğru çalışabilmesi için batarya kapasitesinin periyodik olarak kalibre edilmesi ve başlangıç SOC değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

LFP bataryalarda, Coulomb Sayımı yöntemi OCV yöntemine kıyasla daha avantajlıdır. Bunun nedeni, LFP bataryaların OCV-SOC eğrisinin oldukça yatay olmasıdır. Bu durum, gerilim bazlı yöntemlerin SOC tahmininde yetersiz kalmasına yol açarken, Coulomb Sayımı yöntemi yüksek akım ölçüm doğruluğu sağlanabilmesi durumunda daha güvenilir sonuçlar verebilmektedir.

Bu tez çalışmasında Coulomb Sayımı yöntemi hem saha testleri sırasında hem de laboratuvar testlerinde referans SOC değerlerinin belirlenmesinde temel yöntem olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, birikimli hata problemini minimize edebilmek için batarya modeli tabanlı algoritmalarla birlikte çalıştırılarak, daha dengeli ve güvenilir bir SOC tahmin yapısı elde edilmiştir. Bir diğer yaklaşım ise model tabanlı SOC tahmin yöntemleri olup, bu yöntemlerde bataryanın ECM kullanılarak SOC tahmini gerçekleştirilir. Bu yöntemlerde, bataryanın gerilim, akım ve sıcaklık verileriyle birlikte, batarya modelinden elde edilen parametreler kullanılarak SOC hesaplanır. Model tabanlı yöntemlerin temel avantajı, batarya sisteminin dinamik davranışlarını daha doğru bir şekilde temsil edebilmesi ve hata geri besleme mekanizması sayesinde uzun süreli kullanımda biriken hataları minimize edebilmesidir.

Bu tez çalışmasında, model tabanlı SOC tahmin yöntemleri kapsamında üç farklı Kalman filtresi yaklaşımı uygulanmıştır: EKF, UKF ve AEKF). EKF, doğrusal olmayan sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir tahmin algoritmasıdır. EKF yönteminde, bataryanın doğrusal olmayan eşdeğer devre modeli, çalışma noktası etrafında lokal olarak doğrusal hale getirilir. Bu işlem sırasında, sistemin Jacobian matrisleri hesaplanır ve sistemin doğrusal yaklaşık modeli üzerinden filtreleme gerçekleştirilir. EKF, görece

düşük hesaplama maliyeti ve gerçek zamanlı uygulama kolaylığı sayesinde pratikte sıkça tercih edilmektedir. Ancak modelin doğrusal hale getirilmesi sırasında oluşabilecek yaklaşık hatalar, özellikle yüksek doğrusal olmayanlık gösteren bölgelerde tahmin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. UKF, doğrusal olmayan sistemlerde daha yüksek doğruluk sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. UKF, sistem doğrusal olmayan olduğunda dahi daha doğru sonuçlar elde etmek için sigma noktaları adı verilen deterministik örnekleme noktaları kullanır. Bu sayede, sistemin doğrusal olmayan dinamikleri daha gerçekçi şekilde temsil edilir ve filtreleme işlemi sırasında Jacobian matrisleri gibi karmaşık türev hesaplamalarına ihtiyaç duyulmaz. UKF, özellikle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda EKF'ye kıyasla daha güvenilir sonuçlar vermektedir. AEKF ise EKF algoritmasının bir türevidir. AEKF yönteminde, sistemdeki model uyumsuzlukları ve çevresel etkiler nedeniyle oluşabilecek belirsizlikler dinamik olarak gözlemlenir ve filtre parametreleri bu değişimlere adaptif olarak ayarlanır. Bu sayede, batarya modelinde zamanla oluşabilecek değişiklikler veya parametre kaymaları durumunda SOC tahmini doğruluğu korunabilir [17].

Bu tez kapsamında Kalman filtresi temelli algoritmaların uygulanmasında, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan batarya eşdeğer devre modelleri kullanılmıştır. Modellerde, laboratuvar testlerinden elde edilen parametreler ve saha testlerinden kaydedilen dinamik akım-gerilim profilleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, her bir algoritmanın SOC tahmin performansı gerçekçi koşullarda detaylı olarak incelenmiştir. Model tabanlı yöntemlerin en önemli avantajları arasında yüksek tahmin doğruluğu, dinamik çalışma koşullarına hızlı uyum sağlama ve hata geri besleme mekanizması sayesinde sapma düzeltme yeteneği yer almaktadır. Ancak, bu yöntemler yüksek hesaplama gücü gereksinimi ve karmaşık modelleme süreçleri nedeniyle uygulamada daha fazla geliştirme çalışması ve detaylı kalibrasyon gerektirmektedir. Bu çalışmada model tabanlı yöntemler, Coulomb Sayımı ve OCV yöntemleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve özellikle LFP tipi bataryalar için Kalman filtresi temelli algoritmaların üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

3.6 İstatistiksel Analiz Yöntemleri

Bu tez çalışmasında, SOC tahmin algoritmalarının doğruluk ve güvenilirlik değerlendirmesi için kapsamlı bir istatistiksel analiz süreci uygulanmıştır. İstatistiksel analiz, tahmin edilen SOC değerleri ile referans SOC değerleri arasındaki farkları nicel olarak değerlendirerek, her bir algoritmanın hata seviyelerini karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, farklı hata metrikleri kullanılarak algoritmaların performansı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

İlk olarak, MAE metriği kullanılmıştır. Bu metrik, tahmin edilen SOC değerleri ile referans SOC değerleri arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını temsil eder ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |SOC_{gerçek} - SOC_{tahmini}| \quad (17)$$

Bu formülde, $SOC_{gerçek}$ terimi, her bir zaman adımında ölçülen gerçek SOC değerini ifade etmektedir. $SOC_{tahmini}$ ise zaman adımında algoritma tarafından tahmin edilen şarj durumu değerini temsil eder. N ise analizde kullanılan toplam veri noktası sayısını göstermektedir.

MAE, tahmin edilen değerlerin referans değerlere ortalama yakınlığını ölçer ve hata büyüklüğünün genellikle ne düzeyde olduğunu gösterir. Düşük MAE değeri, daha doğru ve istikrarlı bir tahmin performansını gösterir. İkinci olarak, RMSE metriği uygulanmıştır. Bu metrik, hata karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanır ve genellikle hata büyüklüğüne daha duyarlı bir ölçüttür. RMSE formülü şu şekildedir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SOC_{gerçek} - SOC_{tahmini})^2} \quad (18)$$

RMSE, büyük hataları daha fazla öne çıkarır ve bu nedenle hata dağılımında yüksek sapmaların etkisini değerlendirmek için tercih edilir. MAE'ye kıyasla, hata değerleri arasındaki varyasyonu daha iyi yansıtır.

Üçüncü olarak, MAPE metriği kullanılmıştır. Bu metrik, tahmin hatalarının referans değerlerine oranla yüzdesel büyüklüğünü gösterir ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{SOC_{gerçek} - SOC_{tahmini}}{SOC_{gerçek}} \right| \quad (19)$$

MAPE, tahmin doğruluğunu yüzdesel bazda ifade ettiği için özellikle farklı ölçeklerdeki veri setlerinin karşılaştırılmasında oldukça etkilidir. Ancak, referans SOC değerinin sıfıra çok yakın olduğu noktalarda hesaplama zorluğu yaratabileceği için dikkatli kullanılmalıdır.

Son olarak, Determinasyon Katsayısı (R-kare – R^2) metriği hesaplanmıştır. Bu metrik, tahmin edilen SOC değerlerinin referans SOC değerlerine ne kadar iyi uyum sağladığını belirleyen bir istatistiksel göstergedir. R^2 değeri 0 ile 1 arasında değişir ve değer 1'e yakın olması, tahmin performansının yüksek olduğunu gösterir. R^2 aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (SOC_{gerçek} - SOC_{tahmini})^2}{\sum_{i=1}^N (SOC_{gerçek} - SOC_{gerçek})^2} \quad (20)$$

Burada $SOC_{gerçek}$ ifadesi, referans SOC değerlerinin ortalamasını temsil eder. R^2 değeri, tahmin edilen değerlerin referans değerlere göre açıklanabilirlik oranını gösterir. 1'e yaklaştıkça, tahmin edilen değerler referans değerlere daha iyi uyum sağlar. Bu tez çalışmasında, yukarıda tanımlanan dört farklı hata metriği her bir SOC tahmin yöntemi için ayrı ayrı hesaplanmış ve algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, her algoritmanın hem ortalama hata seviyesi hem de hata dağılımı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Özellikle yüksek akım değişimlerinin ve ani yük geçişlerinin olduğu test senaryolarında, algoritmaların hata toleransları dikkatle incelenmiştir.

İstatistiksel analizlerde elde edilen sonuçlar, batarya yönetim sistemlerinde kullanılacak SOC tahmin algoritmalarının seçiminde önemli bir yol gösterici olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı hata metrikleri bir arada kullanılarak daha kapsamlı bir analiz yapılmış ve algoritmaların hem kısa vadeli doğruluğu hem de uzun vadeli kararlılığı sayısal olarak ortaya konmuştur. Sonuç olarak, bu bölümde uygulanan istatistiksel analiz yöntemleri sayesinde, SOC tahmin algoritmalarının performansları objektif ve karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilmiş, batarya sisteminin saha ve laboratuvar koşullarındaki davranışlarına ışık tutulmuştur.

4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen saha ve laboratuvar testleri sonucunda elde edilen veriler analiz edilerek, SOC tahmin algoritmalarının doğrulukları, kararlılıkları ve endüstriyel uygulanabilirlikleri çok yönlü olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan yöntemler arasında OCV tabanlı yaklaşım, CC, üç farklı Kalman filtresi türevi olan EKF, UKF ve AEKF yer almaktadır. Her bir algoritmanın doğruluk performansı, hem gerçek saha koşullarında çalışan bir forklift üzerinden elde edilen gerçek zamanlı veri setleriyle hem de laboratuvar ortamında geliştirilen eşdeğer devre modelleri üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlarla karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Saha testlerinde, VDI 2198 standardına uygun olarak tasarlanmış bir sürüş döngüsü uygulanmış ve İnci GS Yuasa Endüstriyel Akü Fabrikası test parkurunda gerçekleştirilen testler sonucunda akım, gerilim ve sıcaklık gibi temel parametreler yüksek çözünürlükte kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler, SOC tahmin algoritmalarının gerçek operasyonel koşullardaki performanslarını değerlendirmede referans olarak kullanılmıştır. Diğer yandan, laboratuvar ortamında Power-Xtra markalı 32700 formatında silindirik LFP hücreler kullanılarak yapılan HPPC testleri sonucunda, elektriksel eşdeğer devre parametreleri çıkarılmış ve MATLAB/Simulink ortamında dinamik batarya modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, sahada kaydedilen akım-gerilim profilleri ile beslenerek her bir algoritmanın kontrollü ve tekrarlanabilir bir ortamda simüle edilmesine olanak tanımıştır.

Bulgular bölümünde, her bir algoritmanın tahmin ettiği SOC değeri, hem saha verileriyle hem de simülasyon çıktılarıyla karşılaştırılmış ve ortaya çıkan farklılıklar detaylı istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Bu analizler kapsamında MAE, RMSE, MAPE ve R^2 gibi metrikler hesaplanmış ve algoritmaların başarı düzeyleri nesnel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, simülasyon sonuçlarının saha koşullarındaki gözlemlerle tutarlılığı değerlendirilmiş ve algoritmaların çevresel faktörlere (örneğin sıcaklık değişimi, yük dalgalanmaları) karşı tepkileri incelenmiştir.

Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda, elektrikli forklift uygulamalarında güvenilir bir batarya yönetimi sağlamak adına hangi SOC tahmin algoritmasının en uygun çözüm sunduğu belirlenmiş; hem teknik doğruluk hem de uygulama kolaylığı açısından öne çıkan yöntemlerin avantajları ve sınırlılıkları ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

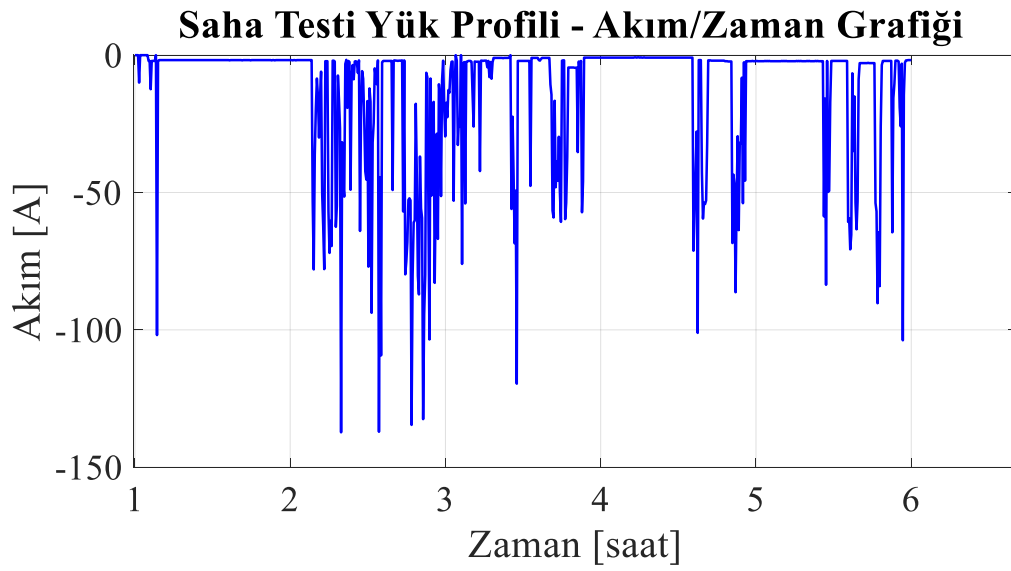
4.1 Saha Testi Bulguları

Tez çalışmasının ilk aşamasında, SOC tahmin algoritmalarının gerçek çalışma koşullarındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla saha testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, İnci GS Yuasa Endüstriyel Akü Fabrikası'nda, VDI 2198 standardına uygun şekilde oluşturulan bir forklift test parkurunda uygulanmıştır. Test senaryosu, elektrikli forkliftlerin günlük operasyonel döngülerini temsil edecek şekilde düzenlenmiş ve forkliftin hızlanma, frenleme, yüklü ve yüksüz taşıma gibi farklı dinamik manevraları içerecek şekilde yapılandırılmıştır. Böylece, SOC tahmini açısından oldukça değişken akım-gerilim profillerinin gözlemlenebileceği zengin bir veri seti elde edilmesi amaçlanmıştır (Şekil 4.1).

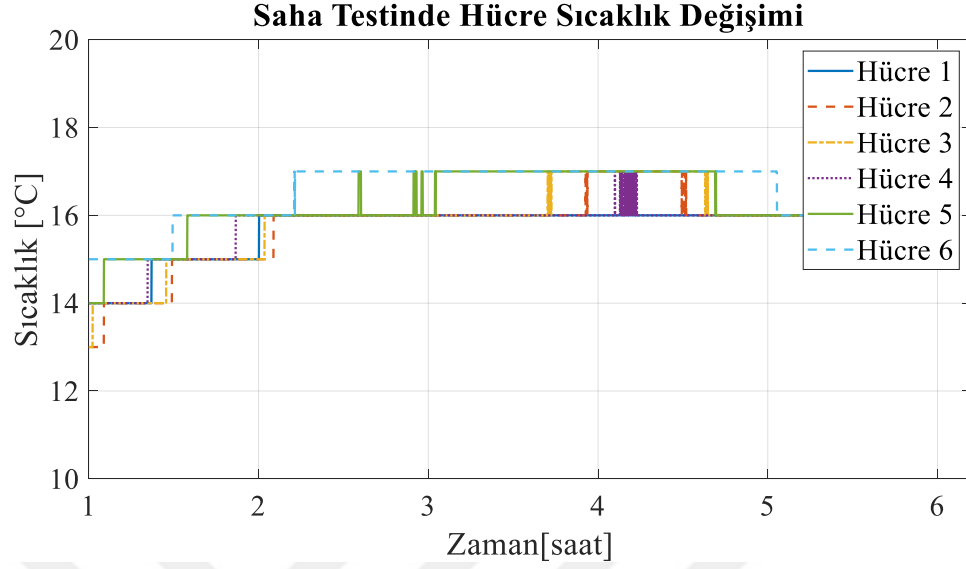
Testlerde kullanılan forklift, 51.2 V nominal gerilime ve 554 Ah nominal kapasiteye sahip bir LFP batarya paketi ile donatılmıştır. Araç, belirlenen rotayı çeşitli yükleme senaryolarında defalarca tamamlamış ve her bir döngü sırasında batarya sisteminden alınan akım, gerilim, sıcaklık (°C) ve mevcut SOC gibi parametreler 30 saniyelik aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Elde edilen akım profili (Şekil 4.2) ve batarya hücre sıcaklık değişimleri (Şekil 4.3) test süresince detaylı şekilde izlenmiştir. Ayrıca, bataryanın gerçek kapasite değeri, C5 rejiminde yapılan doğrulama testleri ile belirlenmiş olup, bu testlerin sonuçları Şekil 4.4'te sunulmuştur. Verilerin toplanmasında, BYS sisteminden elde edilen CAN haberleşme yöntemi ile alınan veriler kullanılmış, ayrıca harici bir veri kayıt sistemi ile doğrulama gerçekleştirilmiştir.



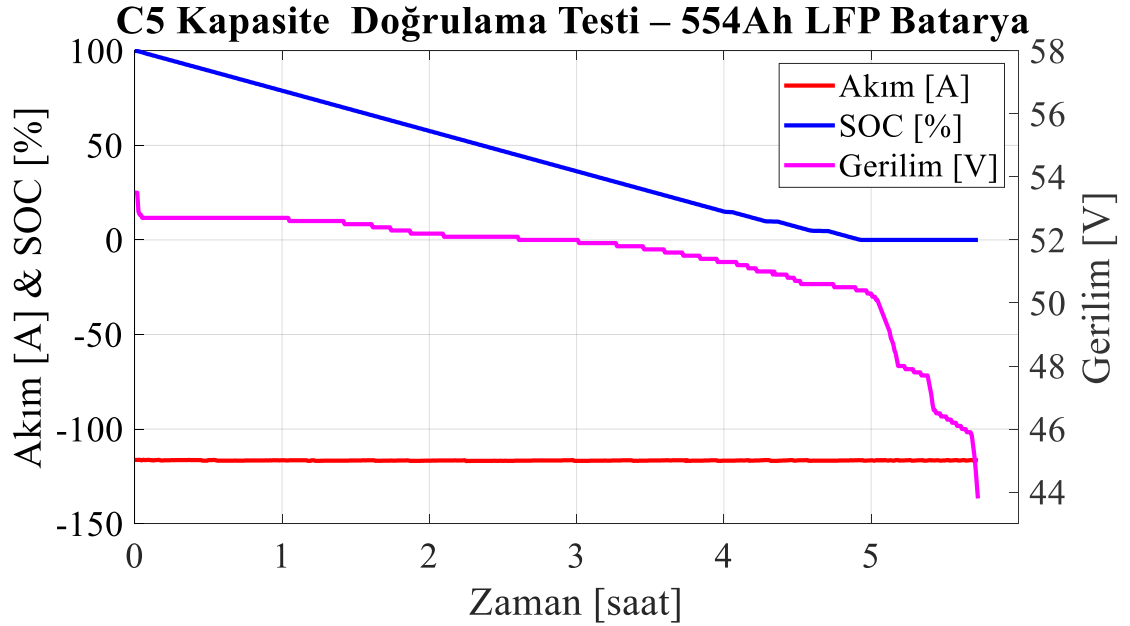
Şekil 4.1 Forkliftin A noktasındaki yükü kaldırma anı ve forkliftin b noktasındaki yükü kaldırma anı



Şekil 4.2 VDI 2198 tabanlı test parkurunda test forkliftinden elde edilen akım profili



Şekil 4.3 VDI 2198 tabanlı test parkurunda test forkliftinin batarya hücre sıcaklık değişimleri



Şekil 4.4 554Ah LFP bataryanın gerçek C5 kapasite testi sonuçları

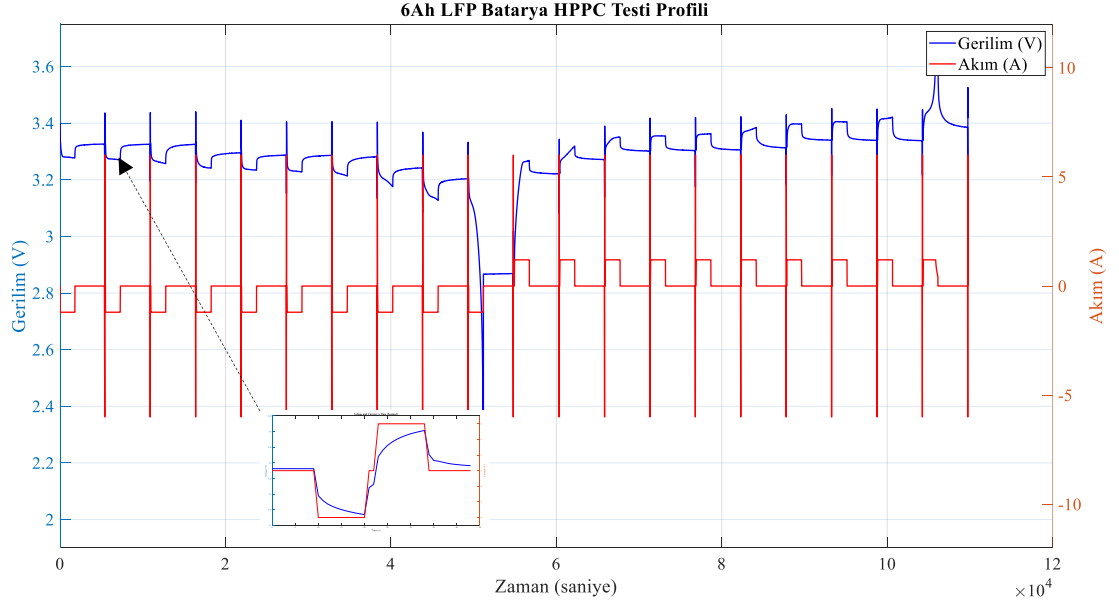
Saha testleri sırasında elde edilen akım profilleri, bataryanın dönemsel olarak yüksek ve düşük yük altına maruz kaldığını açıkça ortaya koymuştur. Özellikle yük taşıma ve rampa çıkışı gibi bölümlerde ani akım çekişleri gözlenmiştir; bu durum, SOC tahmin algoritmaları açısından önemli bir stres testi işlevi görmüştür. Aynı şekilde, durağan bekleme veya boşta çalışma anlarında batarya yükü azalmakta ve gerilim geri toplama eğilimi göstermektedir. Bu davranışlar, özellikle OCV temelli yöntemlerin saha

ortamındaki zorluklarını ve model tabanlı yöntemlerin bu tür dinamik değişimlere adaptasyon gerekliliğini gözler önüne sermiştir.

Test parkuru boyunca elde edilen veriler, aynı zamanda sıcaklık değişimlerini de içermekte olup, batarya hücre sıcaklığının 18°C ile 24°C arasında değiştiği gözlenmiştir. Bu durum, sıcaklığın iç direnç ve gerilim tepkisi üzerindeki etkisini analiz etmek için uygun bir çerçeve sunmuştur. Ayrıca test süresince, forkliftin toplam enerji tüketimi, akü gerilim düşüş eğrileri ve SOC azalma eğrileri grafiksel olarak değerlendirilmiş ve test parkurunun batarya üzerindeki yük profili detaylı şekilde çıkarılmıştır. Elde edilen saha verileri, laboratuvar ortamında geliştirilen batarya modellerine uygulanacak olan dinamik yük profili olarak kullanılmış ve algoritmaların gerçek dünyaya uygun koşullarda test edilmesini mümkün kılmıştır. Böylece, modelleme doğruluğu ile saha gerçekliği arasında doğrudan bir bağ kurulmuş ve sonraki bölümlerde karşılaştırılacak olan simülasyon çıktıları için güçlü bir referans verisi sağlanmıştır.

4.2 Batarya Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Gerçek saha verilerini tamamlayıcı nitelikte ve tekrarlanabilir bir laboratuvar ortamı sağlamak amacıyla, bu çalışmada simülasyon temelli analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, forklift batarya paketinde kullanılan prizmatik LFP hücrelere elektro-kimyasal açıdan benzerlik gösteren Power-Xtra marka 32700 formatında silindirik LFP hücreler (6000 mAh nominal kapasiteye sahip) tercih edilmiştir. İlk aşamada, bu hücreler üzerinde çeşitli C oranlarında (C/5, C/2, 1C gibi) şarj ve deşarj deneyleri gerçekleştirilmiş ve OCV ile SOC arasındaki ilişki eğrileri çıkarılmıştır. Ayrıca, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen termal testlerle terminal gerilim ve iç direnç değerlerinin sıcaklığa duyarlılığı analiz edilmiştir. Hücrelerin dinamik karakterizasyonu için uygulanan HPPC test protokolü ve akım profili Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5 6Ah LFP batarya HPPC testi profili

Model parametrelerinin çıkarılmasında temel yöntem ise HPPC testi olmuştur. Bu test prosedüründe, hücreler belirli SOC seviyelerinde stabilize edilmiş ve ardından kontrollü akım darbelerine maruz bırakılmıştır. Her bir darbe sonrası oluşan gerilim yanıtları analiz edilerek ECM ait temel parametreler olan R_0 , R_1 ve C_1 hesaplanmıştır. Ayrıca, R_1 ve C_1 parametrelerinden elde edilen zaman sabiti $\tau = R_1 \cdot C_1$, hücrenin dinamik tepkisini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen parametreler, SOC seviyelerine bağlı vektörler halinde yapılandırılarak MATLAB/Simulink ortamında ayrıntılı ECM modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller daha sonra CC, OCV, EKF, UKF ve AEKF gibi SOC tahmin algoritmalarının uygulanmasına ve performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Farklı SOC seviyelerinde elde edilen bu parametreler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 6 Ah LFP hücresi için farklı SOC seviyelerinde gerçekleştirilen HPPC testlerinden elde edilen eşdeğer devre modeli parametreleri.

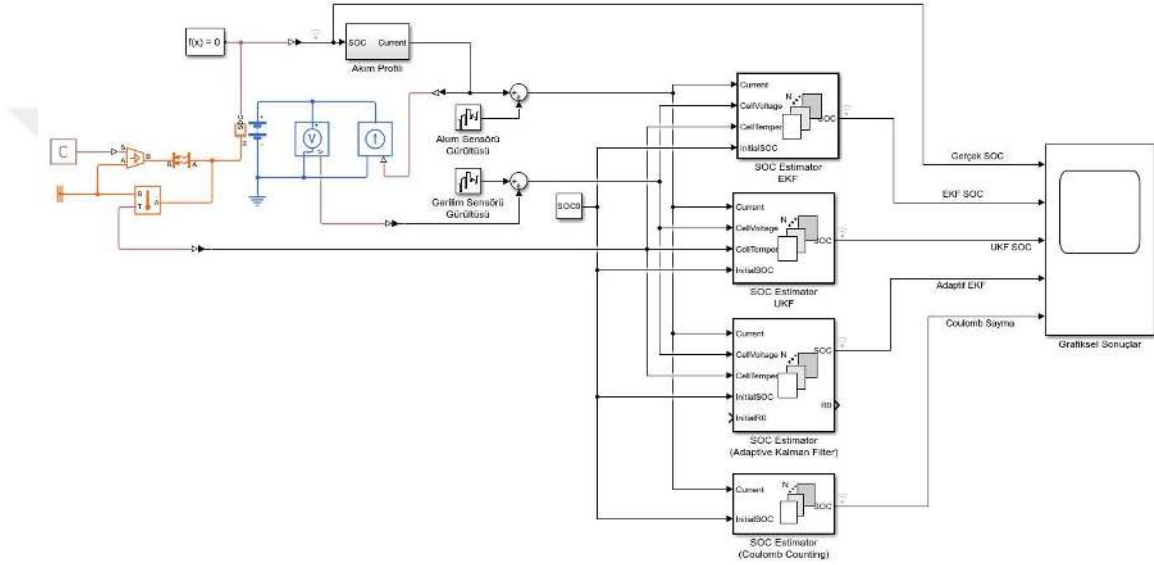
SOC (%)	V0	R0	R1	Tau1
0	2.8687	0.017317	0.090628	10.2783
10	3.2035	0.015	0.101121	15.8799
20	3.2419	0.014767	0.108908	18.4603
30	3.2813	0.014383	0.110388	19.95
40	3.2862	0.014117	0.109873	20.86
50	3.2868	0.01395	0.110724	21.62
60	3.2952	0.01385	0.10643	21.2
70	3.3251	0.01375	0.10097	19.76
80	3.3255	0.013667	0.09972	20.25
90	3.3262	0.0136	0.10168	21.28
100	3.4016	0.01355	0.10000	20.08

HPPC testine ait tipik bir gerilim-akım yanıtı Şekil 4.4'te sunulmuş, farklı SOC seviyelerinde elde edilen model parametreleri ise Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Bu parametreler, gerçek forklift sürüş profillerinden elde edilen dinamik akım verileri ile kullanılarak simülasyon ortamında algoritmaların doğruluğu test edilmiştir. Böylece, saha ve laboratuvar verileriyle algoritmaların tutarlılığı doğrudan gözlemlenebilmiştir.

4.3 Simülasyon ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması

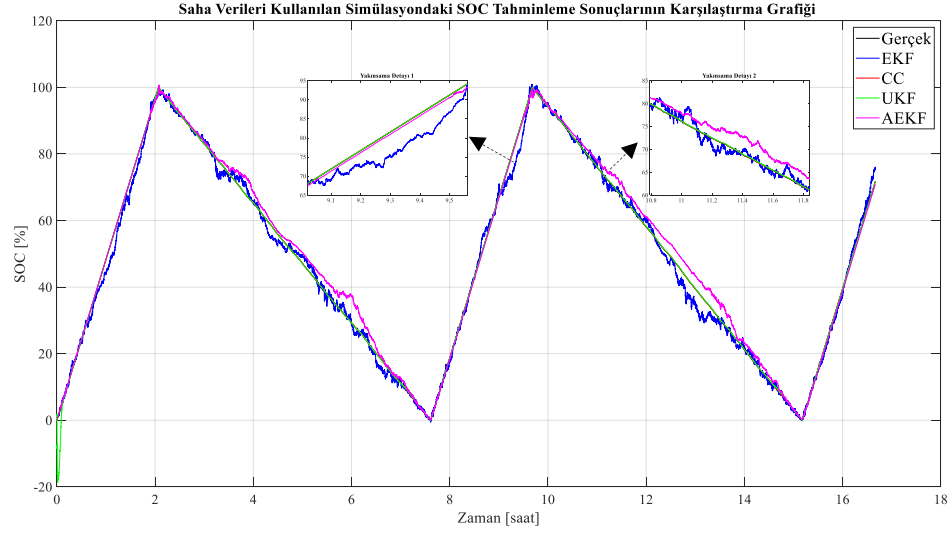
Bu bölümde, laboratuvar ortamında geliştirilen batarya modelleri ile sahada gerçek koşullarda toplanan veriler karşılaştırılarak, SOC tahmin algoritmalarının doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilmiştir. Karşılaştırma sürecinde, her iki ortamda da aynı dinamik akım profili temel alınmış ve VDI 2198 standardına uygun sürüş döngüsü referans olarak kullanılmıştır. Böylece, simülasyon sonuçlarının sahadaki gerçek sistem davranışlarını ne ölçüde temsil ettiğini değerlendirmek amacıyla metodolojik bir eşleşme sağlanmıştır. Simülasyon ortamında oluşturulan batarya modelleri, HPPC testleri sonucunda elde edilen parametrelerle yapılandırılmıştır. R_0 , R_1 ve C_1 gibi temel eşdeğer devre parametreleri, farklı şarj durumu seviyelerinde SOC'ye bağlı olarak tanımlanmış ve zaman sabiti ($\tau = R_1 \times C_1$) üzerinden hücrenin dinamik cevabı modellenmiştir. Bu modeller, MATLAB/Simulink ortamında uygulanmış ve sahada kaydedilen dinamik yük

profili (akım, sıcaklık, gerilim) simülasyonlara giriş olarak verilmiştir. Böylece, tahmin algoritmalarının aynı koşullar altında nasıl çalıştığı doğrudan karşılaştırılabilir hale gelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen Simulink tabanlı sistem modelinde, aynı giriş verileriyle çalışan farklı SOC tahmin algoritmaları (Coulomb Counting, EKF, UKF ve Adaptive EKF) paralel olarak yapılandırılmış, sonuçlar hem sayısal hem grafiksel olarak analiz edilmiştir (Şekil 4.6).



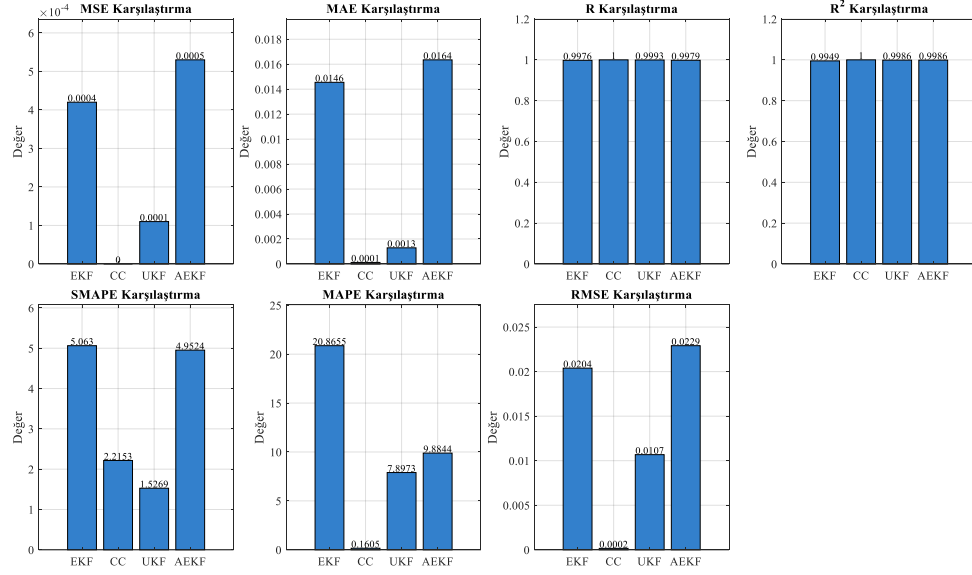
Şekil 4.6 Simulinkte tasarlanan SOC tahmin modeli

Uygulanan bu yapı sayesinde, her bir algoritmanın dinamik yük profiline verdiği tepki doğrudan karşılaştırılabilir hale gelmiştir. Özellikle gerçek saha verileri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen tahminler, referans SOC eğrisiyle birlikte değerlendirilmiş ve algoritmaların zaman eksenindeki sapmaları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalı değerlendirme, Şekil 4.7'de sunulmakta olup, EKF, UKF ve AEKF yöntemlerinin daha stabil ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiği, buna karşın CC metodu yüksek akım değişimlerinde ve başlangıç SOC'sinin hatalı olduğu durumlarda daha belirgin sapmalar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, özellikle sahaya entegre edilecek algoritma seçiminde güvenilirlik ve doğruluk açısından kritik veriler sunmaktadır.



Şekil 4.7 Deneysel veriler kullanılarak gerçek dinamik yük döngüleri altında SOC tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması.

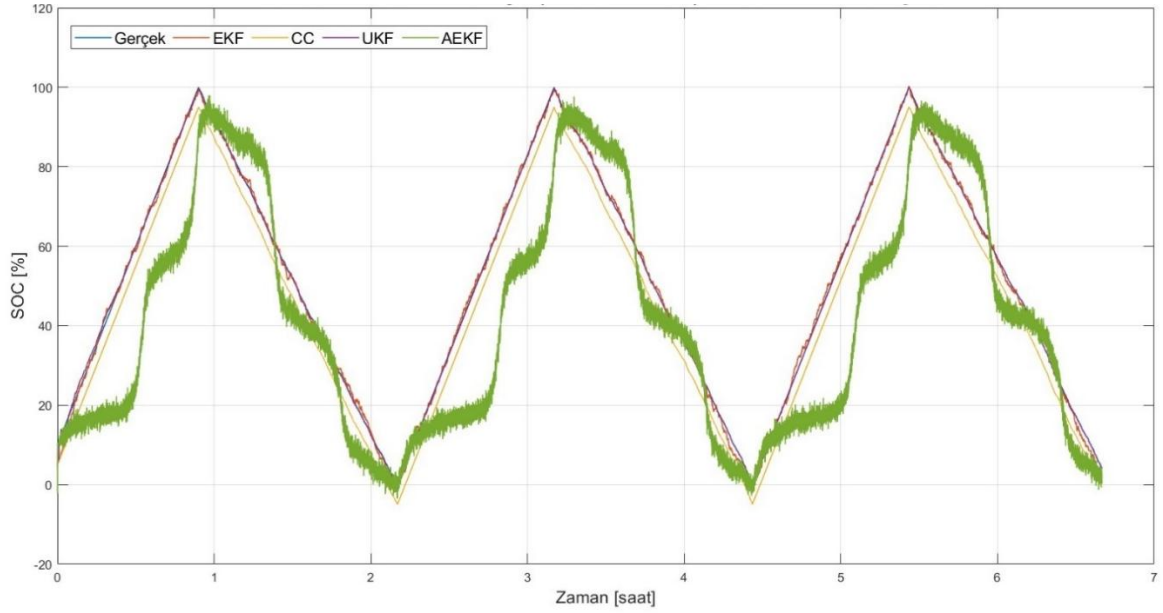
Yukarıda sunulan zamana bağlı karşılaştırmaların yanı sıra, her bir SOC tahmin algoritmasının genel doğruluğunu sayısal olarak değerlendirmek amacıyla istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve maksimum hata gibi performans ölçütleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her algoritmanın genel eğilimlerini ve sapma karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. İlgili analiz sonuçları Şekil 4.8'de sunulmakta olup, UKF metodunun istatistiksel olarak en düşük hata değerlerine sahip olduğu, buna karşın CC yönteminin dinamik yük koşullarında daha büyük sapmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle CC metodunda başlangıç SOC değeri hatalı belirlendiğinde, batarya yaşlandıkça bu hata artarak birikimli şekilde büyümekte ve tahminin güvenilirliğini ciddi ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, dinamik sistemlerde model tabanlı ve adaptif yöntemlerin daha güvenilir sonuçlar ürettiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8 Farklı SOC tahmin algoritmaları performanslarının istatistiksel analizi

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, tahmin edilen SOC değerlerinin genel olarak saha verileriyle tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Küçük sapmalar, ölçüm cihazlarındaki tolerans farklılıkları, çevresel koşulların tam olarak simülasyona yansıtılamaması veya sıcaklık kaynaklı parametre değişimleri gibi nedenlerle açıklanabilir. Buna rağmen, modelleme yaklaşımı ve algoritmaların davranışı genel olarak saha gözlemleri ile yüksek oranda örtüşmüştür. Bu durum, geliştirilen batarya modelinin geçerliliğini ve algoritmaların uygulama açısından güvenilirliğini göstermektedir. Özellikle Kalman filtre temelli algoritmalar (EKF, UKF ve AEKF), hem simülasyon hem de deneysel ortamda yüksek dinamik doğruluk göstermiştir. Bu algoritmalar, ani yük geçişlerinde ve düşük SOC seviyelerinde bile referans SOC değerine yakın tahminler sunabilmiş, sapma ve gecikme seviyeleri ise oldukça düşük kalmıştır. EKF yöntemi, daha az hesaplama gerektirmesiyle öne çıkarken; UKF, doğrusal olmayan sistem davranışlarını daha iyi modelleyebilmiş; AEKF ise çevresel etkilere karşı adaptif yapısı sayesinde kararlı bir tahmin yeteneği sergilemiştir.

Kalman filtre parametrelerinin hatalı tanımlandığı durumu temsilen, Şekil 4.7’de yer alan simülasyon koşturulmuştur. AEKF parametreleri batarya modeline göre uyumsuz seçildiği durumda SOC tahmin başarısı kötüleşmektedir. Özellikle korelasyon katsayısı R’de, MAPE ve SMAPE’de ciddi bir düşüş mevcuttur.



Şekil 4.9 Filtre parametrelerinin hatalı ayarlandığı simülasyon sonucu

Simülasyon ve deneysel verilerin uyumu, yalnızca algoritma karşılaştırması açısından değil, aynı zamanda geliştirilen batarya eşdeğer devre modelinin doğruluğunu değerlendirme açısından da kritik bir geri besleme sağlamıştır. Her iki platformdan elde edilen hata analizleri, bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmış ve istatistiksel metriklerle desteklenmiştir.

Sonuç olarak, bu bölümde yapılan karşılaştırmalar göstermektedir ki, uygun şekilde modellenmiş batarya sistemleri ve doğru yapılandırılmış SOC algoritmaları sayesinde laboratuvar ortamındaki simülasyonlar, sahadaki gerçek sistem davranışını büyük ölçüde temsil edebilmektedir. Bu durum, benzer yöntemlerin endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği açısından önemli bir gösterge niteliğindedir.

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, dinamik yük koşulları altında çalışan elektrikli forkliftler bağlamında farklı SOC tahmin yöntemlerinin doğruluğu ve uygulanabilirliği hakkında önemli ve yol gösterici bulgular sunmaktadır. Sayısal bulgular bir sonraki alt bölümde ayrıntılı olarak ele alınmakla birlikte, bu verilerin güncel endüstriyel eğilimler ve gelecekteki beklentiler ışığında değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Gerçek forklift işletim koşullarına dayalı olarak gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz, kullanılan SOC tahmin algoritmaları arasında belirgin performans farklarını ortaya koymuştur. İstatiksel karşılaştırma metotlarının sonuçları Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

En temel yöntemlerden biri olan CC yaklaşımı, simülasyon ortamında değerlendirilen kontrollü veri seti içerisinde en düşük hata oranlarını sağlayarak dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Bu yöntemin gerçekleştirdiği tahminlerde, RMSE değeri 0.00016, MAE değeri 0.00012 ve MAPE ise yalnızca %0.16 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, CC yöntemi $R = 1$ ve $R^2 = 1$ korelasyon katsayısı ile neredeyse kusursuz bir izleme başarısı göstermiştir. Bu durum, teorik açıdan yöntemin oldukça başarılı olduğunu ortaya koysa da, pratik uygulamalarda akım sensöründeki ölçüm hataları veya sistemde zamanla biriken entegrasyon hataları nedeniyle uzun vadeli sapmalara açık olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle CC yöntemi, zaman içinde sıfırlama (resetleme) mekanizmaları veya referans noktaları olmadan bağımsız olarak kullanıldığında sistematik hata birikimine neden olabilmektedir.

Model tabanlı yaklaşımlar arasında en başarılı sonuç, UKF ile elde edilmiştir. UKF yöntemi, doğrusal olmayan sistem davranışlarını daha yüksek doğrulukla modelleyebilmesi sayesinde simülasyon ortamında $RMSE = 0.0107$, $MAE = 0.00129$ ve $MAPE = \%7.9$ değerlerine ulaşmıştır. Aynı zamanda $R^2 = 0.9986$ değeri ile yüksek korelasyon ve istikrarlı tahmin performansı sergilemiştir. Bu da UKF algoritmasının hem hassasiyet hem de sağlamlık açısından güvenilir bir denge sunduğunu ortaya koymaktadır. EKF yöntemi ise $RMSE = 0.0204$ ve $MAPE = \%20.87$ gibi daha yüksek hata değerleri üretmiş olmakla birlikte, makul düzeyde performans sağlamıştır. Ancak özellikle ani yük değişimlerinin meydana geldiği dinamik koşullarda daha yüksek

sapmalar göstermiştir. Bu durum, EKF algoritmasının doğrusal yaklaşık modellere olan bağımlılığından kaynaklanan sınırlılıkları işaret etmektedir.

Uyarlamalı AEKF algoritması ise, yapısı gereği ölçüm ve sistem belirsizliklerine adaptif olarak yanıt verebilme yeteneğine sahip olsa da, tahmin doğruluğu bakımından UKF ve EKF'ye göre daha yüksek hata değerleri üretmiştir. Yine de AEKF'nin elde ettiği korelasyon katsayısı ($R = 0.9979$) oldukça güçlü olup, genel eğilim takibi açısından başarılı bir görünüm sergilemiştir. Sonuç olarak, bu karşılaştırmalı analiz, elektrikli forklift uygulamalarında SOC tahmini açısından farklı yöntemlerin avantajlarını ve sınırlılıklarını açıkça ortaya koymuş; her bir algoritmanın hangi koşullarda daha uygun olduğunu gösterecek kapsamlı bir değerlendirme zemini sunmuştur.

5.1 Sektörel Bakış ve Teknolojik Beklentiler

Lojistik ve malzeme taşıma sektörlerinde sürdürülebilirlik ve operasyonel verimliliğe yönelik artan vurguyla birlikte, elektrikli forkliftlerin küresel pazar payının 2030 yılına kadar %70'in üzerine çıkması beklenmektedir. Bu büyümenin temel itici güçleri arasında düzenleyici zorunluluklar, karbon salımını azaltma hedefleri ve elektrifikasyonun sağladığı ekonomik avantajlar yer almaktadır. Mevcut enerji depolama teknolojileri arasında, Li-ion bataryalar; çok daha kısa şarj süreleri (kurşun-asit bataryalar için 8–10 saate kıyasla genellikle 3 saatin altında), bakım gerektirmeyen tasarımları, fırsat şarjına uyumlulukları ve üstün çevrim ömürleri sayesinde sektör standardı haline gelmiştir.

Dönüşüm sürecinde, özellikle doğru ve uyarlanabilir SOC tahmin algoritmalarıyla donatılmış BYS rolü giderek daha kritik hale gelmektedir. Endüstride, kestirimci bakım, gerçek zamanlı filo optimizasyonu ve veri odaklı operasyonel stratejilere olanak tanıyan, bulut bağlantılı ve yapay zekâ destekli BYS platformlarına geçiş gözlemlenmektedir. Forklift operasyonlarından elde edilen enerji kullanımı verilerinin giderek daha ayrıntılı hale gelmesiyle birlikte, farklı sıcaklık koşulları, dinamik yük profilleri ve hücre yaşlanması gibi değişkenlere rağmen doğruluğunu koruyabilen sağlam SOC tahmin yöntemlerinin entegrasyonu; yeni nesil batarya yönetim sistemi mimarilerinin tasarımı ve tedariki açısından hayati bir öneme sahip olacaktır [13].

5.2 Endüstriyel Forklift Uygulamaları İçin BYS Tasarım Önerileri

Bu çalışma, EKF, UKF ve AEKF gibi algoritmaları içeren model tabanlı ve hibrit SOC tahmin yaklaşımlarının, yüksek doğruluk ve gürültü ile parametre belirsizliklerine karşı daha güçlü dayanım sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu yöntemler, ani ve doğrusal olmayan akım değişimlerine sıkça maruz kalan elektrikli forklift gibi endüstriyel araçlar için son derece uygun bir çözüm sunmaktadır. Tasarım ve mühendislik bakış açısından değerlendirildiğinde, üreticilere aşağıdaki hususları göz önünde bulundurmaları önerilmektedir:

- SOC tahmin algoritmalarının gelişmiş termal yönetim sistemleriyle entegre edilmesi, böylece farklı ortam sıcaklıklarında dahi yüksek doğrulukta tahmin performansı sağlanması,
- Modüler ve ölçeklenebilir BYS mimarilerinin geliştirilmesi, böylece NMC, LTO ve NCA gibi gelişmekte olan Li-ion kimyalarının entegrasyonuna karşı forklift platformlarının geleceğe dönük olarak uyumlu hâle getirilmesi,
- CAN-BUS ve Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü (Message Queuing Telemetry Transport - MQTT) gibi standartlaştırılmış ve birlikte çalışabilir veri iletişim protokollerinin uygulanması, böylece depo otomasyon sistemleri ve filo yönetim yazılımlarıyla kesintisiz entegrasyonun sağlanması.

Bu tür tasarım yaklaşımları, yalnızca Li-ion batarya ile çalışan forkliftlerin güvenliğini, güvenilirliğini ve performansını artırmakla kalmayacak; aynı zamanda giderek daha fazla otomasyona ve veri odaklı işleyişe sahip endüstriyel ortamlarda forkliftlerin etkin bir şekilde çalışmasını da destekleyecektir.

5.3 Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, elektrikli forklift uygulamalarında kullanılan Li-ion bataryalar için SOC tahmin yöntemlerinin hem simülasyon hem de gerçek saha verileri altında, kapsamlı bir karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmuştur. Gerçekleştirilen analizler, kontrollü bir ortamda CC yönteminin en yüksek doğruluk oranlarını sunduğunu ortaya koysa da bu yöntemin pratik uygulamalarda uzun vadeli sapmalara açık olması, bağımsız olarak kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Özellikle ölçüm hataları, sıcaklık etkileri ve sensör kalibrasyonu gibi dış etkenler altında entegrasyon hatalarının

birikmesi, CC yönteminin uygulama sahasında yalnızca destekleyici bir araç olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Buna karşılık, model tabanlı yaklaşımlar özellikle UKF yüksek dinamik doğruluk, parametre belirsizliklerine karşı dayanıklılık ve sıcaklık değişimlerine karşı adaptif tepkisiyle öne çıkmıştır. UKF yöntemi hem doğruluk hem de sistem dayanımı açısından endüstriyel kullanım için en dengeli ve güvenilir çözüm olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, UKF tabanlı SOC tahmini, forklift gibi ağır hizmet uygulamalarında yaygınlaşmaya başlayan BYS mimarileri için güçlü bir adaydır. Ayrıca, CC yönteminin hesaplama basitliği ile model tabanlı filtrelerin (örneğin UKF) adaptif yeteneklerini birleştiren hibrit çerçeveler, gelecekteki BYS tasarımları için umut vadeden bir yön olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımlar hem gerçek zamanlı takip hem de uzun dönem güvenilirlik açısından performans/karmaşıklık dengesi sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, özellikle yapay zekâ temelli ve makine öğrenimi algoritmalarına dayalı SOC tahmin yöntemleri ön plana çıkacaktır. Gerçek zamanlı çoklu sensör verilerinin (gerilim, akım, sıcaklık, iç direnç, kapasite vb.) füzyonu ile çalışan algoritmalar hem doğruluğu hem de çevresel koşullara adaptasyonu artıracaktır. Bununla birlikte, batarya SOH duyarlı ve zamanla değişen parametrelere adapte olabilen çerçevelerin geliştirilmesi de uzun vadeli sistem güvenilirliği açısından kritik bir ihtiyaçtır. Bu kapsamda önerim, yalnızca simülasyon ve laboratuvar ortamlarında değil, aynı zamanda farklı forklift filosu türlerinde (tek vardiyalı, çok vardiyalı, ağır hizmet gibi) ve farklı çevresel koşullarda (soğuk hava depoları, dış saha kullanımı vb.) geniş ölçekli pilot uygulamaların gerçekleştirilmesidir. Bu tür saha çalışmaları, geliştirilen algoritmaların ölçeklenebilirliğini ve endüstriyel uygulanabilirliğini doğrulamak açısından önemli bir adım olacaktır. Sonuç olarak bu tez çalışması, elektrikli forklift uygulamalarında SOC tahmini için güçlü bir metodolojik çerçeve sunmakta; akademik doğrulama ile endüstriyel uygulama arasında köprü kurmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen yaklaşım ve elde edilen bulgular, yalnızca bugünün ihtiyaçlarına değil, aynı zamanda gelecekteki BYS tasarımlarına yön verecek şekilde stratejik bir katkı sağlamaktadır.

6 KAYNAKÇA

- [1] E. Johnson, Disagreement over carbon footprints: A comparison of electric and LPG forklifts, *Energy Policy*. 36 (2008) 1569–1573. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.014>.
- [2] M.A. Rajaeifar, P. Ghadimi, M. Raugei, Y. Wu, O. Heidrich, Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective, *Resour. Conserv. Recycl.* 180 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106144>.
- [3] R. Xue, L. Huang, Y. Zhang, Analysis and Simulation of Hybrid Battery System on Electric Forklifts, *I CPS Asia 2022 - 2022 IEEE IAS Ind. Commer. Power Syst. Asia*. (2022) 577–581. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia55496.2022.9949633>.
- [4] J. Kim, V. Mathew, B. Sambanam, M.H. Alfaruqi, S. Kim, Recent developments of Zinc-Ion batteries, *Energy-Sustainable Adv. Mater.* 33 (2021) 27–57. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57492-5_2.
- [5] T. Paul, T. Mesbahi, S. Durand, D. Flieller, W. Uhring, Sizing of lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system for forklift vehicle, *Energies*. 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13174518>.
- [6] D. Pavlov, **Lead–Acid Batteries: Science and Technology**. Elsevier, 2011.
- [7] X. Zhang and J. Lee, "A review on state of charge estimation for electric vehicle lithium-ion batteries," **J. Power Sources**, 2020.
- [8] M. Chen, J. Smith, and L. Wang, "State of health estimation in lithium-ion batteries," **J. Power Sources**, vol. 412, pp. 512–522, 2019.
- [9] A. Barai, K. Uddin, and A. McGordon, "Impact of characterization techniques on battery performance models accuracy," **Appl. Energy**, 2015.
- [10] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for SOC estimation," **Energies**, 2011.

- [11] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2," **J. Power Sources**, 2004.
- [12] I. S. Kim, "A novel state of charge estimation method using sliding mode observer," **J. Power Sources**, 2006.
- [13] R. Zhao, J. Liu, and J. Gu, "Battery thermal management systems for electric vehicles: A review," **Appl. Therm. Eng.**, 2015.
- [14] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Impedance characteristics and aging states of lithium-ion batteries," **Appl. Energy**, 2013.
- [15] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "Comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," **J. Power Sources**, 2012.
- [16] E. Schaltz, S. J. Andreasen, and P. O. Rasmussen, "Comparison of lithium-ion battery models," **J. Power Sources**, 2009.
- [17] Y. Li and C. Zhang, "A hybrid approach to estimating SOC based on data fusion," **IEEE Trans. Ind. Electron.**, 2021.
- [18] X. Feng, M. Ouyang, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery," **Energy Storage Mater.**, 2018.
- [19] C. Zhang and Y. Wang, "SOH estimation for lithium-ion batteries based on charging curve," **Energy**, 2016.
- [20] R. Pan and Y. Du, "Adaptive Kalman filter for lithium-ion battery SOC estimation," **Energies**, 2022.
- [21] F. Sun, X. Hu, and Y. Zou, "Adaptive unscented Kalman filtering for lithium-ion battery SOC estimation," **Energy**, 2011.
- [22] H. Tian and W. Qiao, "Online SOC estimation using adaptive Kalman filter," **IEEE Trans. Ind. Electron.**, 2014.

- [23] D. Wang and X. Lin, "Multi-scale modeling of lithium-ion batteries: A review," **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 2019.
- [24] S. Sheng and H. He, "Data-driven lithium-ion battery SOC estimation using LSTM," **Energy**, 2021.
- [25] G. Liu and C. C. Mi, "BYS and SOC development for electric vehicles," **IEEE Trans. Veh. Technol.**, 2013.
- [26] O. Demirci, S. Taşkın, E. Schaltz ve B. A. Demirci, "Review of battery state estimation methods for electric vehicles – Part I: SOC estimation," *Journal of Energy Storage*, cilt 87, makale 111435, 2024. doi:10.1016/j.est.2024.111435
- [27] O. Demirci, S. Taşkın, E. Schaltz ve B. A. Demirci, "Review of battery state estimation methods for electric vehicles – Part II: SOH estimation," *Journal of Energy Storage*, cilt 96, makale 112703, 2024. doi:10.1016/j.est.2024.112703
- [28] E. Johnson, "Disagreement over carbon footprints: A comparison of electric and LPG forklifts," *Energy Policy*, vol. 36, no. 4, pp. 1569–1573, 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.12.020.
- [29] S. Rajaeifar, R. Heidari, M. Y. Ghazimokri, M. Zamani, and M. Ebrahimi, "Sustainability assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles under different scenarios," *Journal of Cleaner Production*, vol. 372, p. 133699, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133699.
- [30] Y. Xue, X. Zhang, L. Cao, and Y. Ding, "Performance evaluation of hybrid battery systems for electric forklifts using MATLAB/Simulink," *Applied Energy*, vol. 310, p. 118563, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118563.
- [31] H. Kim, Y. Kim, and J. Park, "Zinc-ion batteries: a review of recent developments and future perspectives," *Journal of Power Sources*, vol. 482, p. 228814, 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228814.

- [32] A. Paul, M. Singh, and S. Mukherjee, "Hybrid energy storage systems with supercapacitor and lithium-ion battery for electric forklifts," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, p. 101234, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101234.
- [33] H. Ha, J. Lee, and M. Kim, "Real-time diagnostic algorithm for safe operation of Li-ion batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8775–8783, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2694345.
- [34] R. Nath and D. Rajpathak, "Balancing techniques for multicell Li-ion battery packs in electric vehicles: A comparative study," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 459–470, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.098.
- [35] L. Abronzini, F. Ferrara, and G. Russo, "Thermal management and balancing strategy for lithium-ion battery packs," *Journal of Energy Storage*, vol. 24, p. 100763, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100763.
- [36] T. Huotari, J. Niemi, and M. Partanen, "State of health prediction of lithium-ion batteries using time series models," *Batteries*, vol. 7, no. 1, p. 14, 2021, doi: 10.3390/batteries7010014.
- [37] M. Salameh, M. A. Casacca, and W. A. Lynch, "A mathematical model for lead-acid batteries," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 1, pp. 93–98, Mar. 1992, doi: 10.1109/60.124528.
- [38] X. Zhang, M. Ouyang, and D. Wang, "Multi-scale modeling of lithium-ion batteries: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110015, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2020.110015.
- [39] S. J. Moura, N. A. Chaturvedi, and M. Krstic, "Battery state estimation using a PDE model," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 139, no. 2, p. 021005, 2017, doi: 10.1115/1.4034685.
- [40] M. Schimpe, M. Naumann, N. Truong, H. C. Hesse, S. Santhanagopalan, and A. Jossen, "Comprehensive modeling of temperature-dependent degradation mechanisms in

lithium iron phosphate batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 389, pp. 143–159, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.008.

[41] A. Barai, D. Uddin, R. McGordon, and J. Marco, "A study on the impact of different characterization techniques on the estimation of Li-ion battery equivalent circuit model parameters," *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 461–473, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.04.007.

[42] Q. Ran "In the realm of power batteries, which technology will capture more public favor — ternary lithium batteries or lithium iron phosphate batteries?"
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/89636025>

[43] G. Darding "Technique: Batterie Li-ion"
<https://www.guillaumedarding.fr/technique-batterie-li-ion-5031187.html>

[44] H. Cooper "Battery Energy Storage in Stationary Applications"
https://www.aiche-cep.com/cep magazine/may_2020/MobilePagedArticle.action?articleId=1583420#articleId1583420

[45] "Tutarsız Lityum Pil Paketlerinin Tehlikeleri ve Sorunları Nelerdir?"
<https://tr.shieldchannel.com/blogs/battery/what-are-the-hazards-and-problems-of-inconsistent-lithium-battery-packs>

[46] M. Dubarry and G. Baure, "Differential capacity as a tool for SOC and SOH estimation of lithium ion batteries using charge/discharge curves, cyclic voltammetry, impedance spectroscopy, and heat events: A tutorial," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4764, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184764.

[47] <https://www.istanbulistif.com.tr/still-rx20-20p/>