KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA YANGIN GÜVENLİĞİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

ÜMİT ŞENYÜREK

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA YANGIN GÜVENLİĞİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

ÜMİT ŞENYÜREK

Prof.Dr. Cenk ÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Hakan Serhad SOYHAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç. Dr. Taner ERDOĞAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. ….....

Doç. Dr. Gökhan COŞKUN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. ….....

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu, - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ümit ŞENYÜREK

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim. Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Ümit ŞENYÜREK

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında elektrikli taşıtlarda kullanılan lityum iyon bataryaların yangın nedenleri, yangın karakteristiği modellenmesi ile proaktif önlemler üzerine odaklanılmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana güvenen, yüreklendiren, çalışmalarıma yön veren ve desteğini bir an olsun esirgemeyen, kıymetli danışmanım sayın Prof. Dr. Cenk Çelik'e; tüm değerli fikir, katkı, destek ve yönlendirmeleri için doktora tez izleme komite üyelerimden sayın Prof. Dr. Hakan Serhad Soyhan'a teşekkür ederim.

Tüm yaşamımda olduğu gibi doktora çalışmamda da beni destekleyen annem Beyhan Şenyürek'e teşekkür ederim. Şu an yanımda olmasa da bana tüm yaşamımda destek olan babam Nurdoğan Şenyürek'e şükranlarımı sunarım.

Haziran – 2025 Ümit ŞENYÜREK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ....i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI....ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR....iii
İÇİNDEKİLER....iv
ŞEKİLLER DİZİNİ....ix
TABLOLAR DİZİNİ....xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ....xiii
ÖZET....xvi
ABSTRACT....xvii
1. GİRİŞ....1
1.1. Tezin Kapsamı....3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI....5
2.1. Elektrikli Taşıtların ve Batarya Teknolojisinin Gelişimi....5
2.1.1. Elektrikli Otomobilin Kronolojik Gelişimi....6
2.1.2. Elektrikli Otomobil Türleri....8
2.1.2.1. Hibrit Elektrikli Taşıtlar (HEV)....8
2.1.2.2. Tümü Elektrikli Taşıtlar (EV)....9
2.1.3. Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Bataryalar....11
2.1.3.1. Şarj Edilemeyen (Primary) Piller....11
2.1.3.2. Şarj Edilebilen (Secondary) Piller....11
2.1.3.3. Pillerin Tarihsel Gelişimi....12
2.1.4. Kullanılan Yaygın Piller....14
2.1.4.1. Kurşun-Asit (Pb-acid) Piller....15
2.1.4.2. Nikel Kadmiyum (NiCd) Piller....15
2.1.4.3. Nikel Metal Hidrat (NiMH) Piller....15
2.1.4.4. Lityum İyon (Li-ion) Piller....16
2.1.4.5. Lityum İyon Polimer (LiPo) Piller....16
2.1.4.6. Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) Piller....16
2.1.4.7. Lityum Sülfür (Li-S) Piller....16
2.1.4.8. Lityum İyon Pil Teknolojisi....16
2.1.5. Lityum İyon Batarya Türleri....20
2.1.5.1. Lityum Demir Fosfat (LFP)....20
2.1.5.2. Lityum Kobalt Oksit (LCO)....21
2.1.5.3. Lityum Manganez Oksit (LMO)....22
2.1.5.4. Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC)....22
2.1.5.5. Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA)....23
2.1.5.6. Lityum Titanat (LTO)....23
2.1.6. Lityum İyon Batarya Çalışma Prensibi ve Yapı Birimleri....24
2.1.6.1. Anot....25
2.1.6.2. Katot....31
2.1.6.3. Elektrolit....42
2.1.6.4. Separatör....43
2.1.6.5. Bağlayıcı (Binder)....43
2.1.6.6. Kollektör....44
2.2. Lityum İyon Batarya içindeki Kimyasal Reaksiyonlar....44

2.3. Lityum İyon Batarya Yapısı 44
2.3.1. Silindirik Şekilli Hücreler 45
2.3.2. Prizmatik Şekilli Hücreler 46
2.3.3. Düğme veya Para Şekilli Hücreler 46
2.3.4. Torba Şekilli Hücreler 47
2.4. Hücreden Bataryaya Doğru Konfigrasyon 48
2.4.1. Seri Bağlama 49
2.4.2. Paralel Bağlama 49
2.5. Temel Pil Tanımları 51
2.5.1. Teorik Pil Potansiyeli, Kapasitesi ve Enerjisi (mAh/g) 51
2.5.2. Serbest Enerji (ΔG°) 53
2.5.3. Nominal Gerilim (V) 53
2.5.4. Teorik Enerji (Wh) 54
2.5.5. Şarj-Deşarj Oranı (C) 54
2.5.6. Enerji Yoğunluğu (Wh/kg – W/L) 55
2.5.7. Güç Yoğunluğu (W/kg) 55
2.5.8. Çevrim Sayısı (Çevrim Ömrü) 55
2.5.9. Teorik Kapasite (Ah) 56
2.5.10. Pil Ömrü Döngüsü 56
2.5.11. Deşarj derinliği (DOD) 57
2.5.12. Şarj Durumu (SOC) 58
2.6. Termal Stabiliteyi Etkileyen Üzerine Çalışmalar 58
2.6.1. Yüksek Termal Stabiliteye Sahip Yeni Separatörler 63
2.6.2. Alternatif Lityum Tuzları 69
2.6.3. Organik Çözücülere İlave Edilen Katkı Maddeleri 70
2.6.3.1. Alev geciktirici katkı maddeleri 70
2.6.3.2. Florür geciktirici katkı maddeleri; 71
2.6.3.3. Fosforlu geciktirici katkı maddeleri 71
2.6.3.4. Azotlu geciktirici katkı maddeleri 72
2.6.3.5. Kompozit geciktirici katkı maddeleri 72
2.6.4. SEI Destekleyici ve Aşırı Şarj Koruma Katkıları 73
2.6.5. Elektrolit Malzemeler Üzerinde Yapılan Çalışmalar 73
2.7. Söndürme Maddelerinin Etkinliğinin İncelendiği Çalışmalar 77
2.8. Batarya Malzemelerinin Etkinliğinin İncelendiği Çalışmalar 81
2.9. Pilin Yanması Esnasında Çıkan Gazların İncelendiği Çalışmalar 82
2.10. Pillerin Termal Durumlarının İzlenmesi Hakkında Yapılan Çalışmalar 83
2.11. Pillerin Yanmasının Süreçleri 86
2.12. Termal Kaçak (Thermal Runaway) Mekanizmasının Sebepleri 90
2.12.1. Mekanik Etki 93
2.12.2. Elektriksel Etki 95
2.12.3. Termal Etki 101
2.13. Li-ion Pillerin Farklı Sıcaklık ve Voltaj Değerlerinde Davranışları 104
2.13.1. Farklı Voltaj Değerlerinde Li-ion Bataryaların Davranışları 104
2.13.2. Li-ion Bataryaların Farklı Sıcaklıklarda Davranışları 107
2.14. Elektrolitlerin Yanma Davranışları 108
2.15. Batarya Yönetim Sistemi ile Termal Kaçağın Kontrol Edilmesi 111
2.15.1. Bataryanın Uygun Tasarımı 111

2.15.2. Batarya Yönetim Sistemi (BMS) 111
2.15.2.1. İzleme 113
2.15.2.2. Koruma 113
2.15.2.3. Şarj ve Deşarj İşlemlerinin Yönetimi 113
2.15.2.4. Teşhis 113
2.15.2.5. Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTMS) 114
2.16. Termal Kaçak Gerçekleşme Mekanizması 118
2.17. Elektrikli Taşıtlar için Li-ion Bataryalarının Sertifikasyon Standartları 119
2.18. Yapay Zeka (AI) ile Modelleme Kurulması 121
2.18.1. Makine Öğrenimi (ML) Nedir? 123
2.18.1.1. Denetimli Öğrenme (Supervised Learning) 124
2.18.1.2. Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning) 125
2.18.1.3. Yarı Denetimli Öğrenme (Semi-supervised Learning) 126
2.18.2. Makine Öğrenme Modelleri 127
2.18.2.1. Karar Ağacı (Coarse Tree) Modeli 127
2.18.2.2. İkili Lojistik Regresyon (Binary Logistic Regression) Modeli 128
2.18.2.3. Verimli Doğrusal Destek Vektör Makinesi (Efficient Linear Support Vector Machine, SVM) Modeli 129
2.18.2.4. Gauss Dağılımlı Naif Bayes (Gaussian Naive Bayes, GNB) Modeli 130
2.18.2.5. K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor, KNN) Modeli 131
2.18.3. Derin Öğrenme (DL): 132
2.18.4. Pekiştirmeli Öğrenme 133
2.18.5. Makine Öğrenmesinde Ki-Kare Yönteminin Kullanımı 134
2.18.6. Makine Öğrenmesinde 5 Katlı Çapraz Doğrulama 135
2.18.7. Beş Katlı Çapraz Doğrulamanın Avantajları 136
2.18.8. Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix) 136
2.18.8.1. Karışıklık Matrisinin Yapısı 136
2.18.8.2. Karışıklık Matrisinin Kullanım Alanları 137
2.18.9. Doğruluk, Kesinlik, Geri Çağırma ve F1 Skoru 137
2.18.9.1. Doğruluk (Accuracy) 137
2.18.9.2. Kesinlik (Precision) 138
2.18.9.3. Geri Çağırma (Recall) 138
2.18.9.4. F1 Skoru 139
2.18.10. Toplam Verimli Bakım için Makine Öğreniminin Uygulanması 139
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE MODELLEME 141
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler 141
3.1.1. Kullanılan Li-ion Pil ve Bataryalar 141
3.1.1.1. Silindirik LCO Tip Pil 141
3.1.1.2. Prizmatik NMC Tip Pil 142
3.1.1.3. Prizmatik NMC Tip Batarya Modülü 142
3.1.1.4. Tam Ölçekli HV Tip EV Bataryası 143
3.1.1.5. Tam Ölçekli PHEV Tip EV Bataryası 144
3.1.2. Termal Kaçağı Durdurmak İçin Kullanılan Kimyasallar 145

3.1.2.1. İnorganik Tabanlı Sıvı 145
3.1.2.2. Kuru Kimyevi Toz 146
3.1.2.3. Karbondioksit Gazı (CO_2) 146
3.1.2.4. Köpük Maddesi 146
3.1.2.5. Organik Tabanlı Madde 146
3.1.3. Modelleme Deneyinde Kullanılan Sarf Malzemeleri 147
3.1.3.1. MQ-4 Gaz Ölçüm Modülü 147
3.1.3.2. MQ-7 Gaz Ölçüm Modülü 147
3.1.3.3. MQ-9 Gaz Ölçüm Modülü 147
3.1.3.4. MQ-135 Hava Kalitesi Algılama 147
3.1.3.5. DHT22 Nem ve Sıcaklık Algılama 148
3.1.3.6. Raspberry Pi 148
3.1.3.7. Termal (IR) Kamera 149
3.1.3.8. Arduino 151
3.1.3.9. Termal Kamera 152
3.1.4. Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeleri 153
3.2. Deney Düzenekleri 153
3.2.1. HV Batarya Termal Kaçak Deneyi Düzeneği 153
3.2.2. Termal Kaçak Gecikme ve Tekrar Başlatılması Den Düzeneği 153
3.2.3. HV Batarya Düşürme Deney Düzeneği 154
3.3. Deneylerin Hazırlık Aşaması 154
3.3.1. Batarya Kapasite Ölçümü 154
3.3.2. 3.3.2. Termal Kamera Konumlandırılması 156
3.4. Deneylerin Gerçekleştirilmesi 156
3.4.1. Termal Kaçak Aşamaları ve Durdurulması Deneyleri 157
3.4.1.1. Deney No: 1; 157
3.4.1.2. Deney No: 2: 160
3.4.1.3. Deney No: 3: 164
3.4.1.4. Deney No: 4: 169
3.4.1.5. Deney No: 5: 173
3.4.1.6. Deney No: 6 179
3.4.1.7. Deney No: 7 185
3.4.1.8. Deney No: 8 189
3.4.1.9. Deney No: 9 195
3.4.1.10. Deney No: 10 197
3.4.1.11. Deney No: 11 202
3.4.1.12. Deney No: 12 205
3.4.2. Termal Kaçak Mekanizmasının Makine Öğrenmesi İle Modellenmesi Deneyleri 210
3.4.2.1. Deney Sırası 211
3.4.2.2. Deneyin Verilerinin Makine Öğrenimi (ML) Metodu İle İşlenmesi 214
3.4.2.3. Önleyici ve Zarar Azaltıcı Bakımın Rolü 218
3.4.2.4. Deney Verilerinin Matlab Programı ile işlenmesi 219
3.4.2.5. Ki Kare Testi 219
3.4.2.6. Model Verileri 223
3.4.2.7. Makine Öğrenmesi ile Elde Edilen Modeller 224

3.4.2.8. Modellerin Değerlendirilmesi 229
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 231
4.1. Termal Kaçak Aşamaları ve Durdurulması Deneyleri 231
4.1.1. Deney No: 1 232
4.1.2. Deney No: 2 233
4.1.3. Deney No: 3 234
4.1.4. Deney No: 4 234
4.1.5. Deney No: 5 236
4.1.6. Deney No: 6 236
4.1.7. Deney No:7 237
4.1.8. Deney No: 8 238
4.1.9. Deney No: 9 239
4.1.10. Deney No:10 240
4.1.11. Deney No: 11 241
4.1.12. Deney No: 12 242
4.2. Termal Kaçağın Makine Öğrenmesi İle Modellenmesi Deneyleri 244
5. ÖNERİLER 245
5.1. Termal Kaçak Öncesi Erken Belirtilerin Önemi 245
5.2. İnorganik Tabanlı Söndürme Maddelerinin Etkisi 245
5.3. Batarya Tasarımı ve Termal İzolasyon 245
5.4. Makine Öğrenmesi ile Erken Uyarı Sistemleri 246
5.5. Batarya Yönetim Sistemlerinin (BMS) Geliştirilmesi 246
5.6. EV Bataryaları Üzerinde Termal Kaçak Önleme Çalışması 246
5.7. Entegre, Akıllı ve Proaktif Güvenlik Yaklaşımı 246
5.7.1. Akıllı Erken Uyarı ve Müdahale Sistemlerinin Geliştirilmesi 247
5.7.2. Aktif Yangın Bastırma Entegrasyonu ile BMS'nin Dönüştürülmesi 247
KAYNAKLAR 248
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 284
ÖZGEÇMİŞ 285

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tarihteki önemli içten yanmalı ve elektrikli otomobiller 8
Şekil 2.2. Elektrikli taşıtların türleri 8
Şekil 2.3. Elektrikli taşıtların çalışma şekline göre türleri 10
Şekil 2.4. Tarihteki ilk piller 13
Şekil 2.5. Çeşitli pillerin spesifik enerjilerinin karşılaştırılması 14
Şekil 2.6. Batarya tiplerinin enerji yoğunlukları karşılaştırması 17
Şekil 2.7. Lityum elementinin periyodik tablodaki yeri, lityum iyonu 19
Şekil 2.8. Li-ion pillerin karşılaştırması 24
Şekil 2.9. Li-ion pil çalışma diagramı 24
Şekil 2.10. Bataryayı oluşturan kısımların ağırlık oranları 25
Şekil 2.11. Silindirik 18650 Li-ion pil kesiti 25
Şekil 2.12. SEI tabakasının anot tarafında oluşumu 29
Şekil 2.13. Anot üzerinde SEI oluşum basamakları 30
Şekil 2.14. Anot üzerinde VC'nin indirgenmesi 32
Şekil 2.15. Alternatif katot ve anot malzemelerinin kapasitesi 33
Şekil 2.16. Katmanlı katot malzeme yapısı 36
Şekil 2.17. Çeşitli NMC katot türlerinin faz diyagramı 38
Şekil 2.18. Olivin katot malzeme yapısı 39
Şekil 2.19. CEI tabakasının katot üzerinde oluşumu 41
Şekil 2.20. Silindirik Li-ion pilin kısımları 45
Şekil 2.21. Prizmatik tip Li-ion pil 46
Şekil 2.22. Düğme tipi Li-ion pil 47
Şekil 2.23. Torba tipi Li-ion pil 47
Şekil 2.24. Çeşitli hücre tiplerinin birleştirilerek batarya elde edilmesi 48
Şekil 2.25. Pil hücrelerinin seri bağlanması ile gerilim ve akımın değişimi 49
Şekil 2.26. Pil hücrelerinin paralel bağlanması ile gerilim ve akımın değişimi 50
Şekil 2.27. EV bataryanın seri ve paralel bağlanması 50
Şekil 2.28. Deşarj derinliği ile ömür döngüsü ilişkisi 57
Şekil 2.29. 26650 LFP, LFP, NMC, LCO pillerin gaz salınımı 83
Şekil 2.30. Gerilim ile sıcaklık sınır değerleri 84
Şekil 2.31. Toplam ısı denklemi 88
Şekil 2.32. Termal kaçak oluşum sebepleri 93
Şekil 2.33. Hücrede mekanik istismar ve kısa devre gerçekleşmesi 94
Şekil 2.34. Kısa devre oluşma ihtimalleri 98
Şekil 2.35. Deneylerde kulanılan Li-ion bataryanın BMS devresi 112
Şekil 2.36. Batarya yönetim sisteminin fonksiyonları 112
Şekil 2.37. Li-ion batarya sistemlerinin termal yönetim sistemleri 115
Şekil 2.38. Li-ion batarya sistemlerinin termal yönetim sistemleri 115
Şekil 2.39. PCM malzemenin ısıyı çevrim grafiği 116
Şekil 2.40. Gözenekli malzemenin ana tutucu malzemeyi oluşturması 117
Şekil 2.41. Pilin yüzeyinden ısının alınması 117
Şekil 3.1. Silindirik, 18650 LCO tipi pil 141
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan PHEV Pil 142
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan PHEV batarya modülü 143
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan HV bataryanın dört yönden gösterimi 143

Şekil 3.5. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın gösterimi 144
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın içi 145
Şekil 3.7. Kullanılan sensörler 148
Şekil 3.8. Termal kamera ile deney esnasında çekilen görüntü örnekleri 151
Şekil 3.9. Test odasının yandan ve perspektiften görünümü 153
Şekil 3.10. Deney düzeneği yandan ve detay görünümü 154
Şekil 3.11. Deneyde kullanılmak üzere tasarlanmış serbest düşme platformu 154
Şekil 3.12. Deney öncesi batarya kapasite ölçümü 155
Şekil 3.13. Pil gerilim sınırları ve tehlike durumu 155
Şekil 3.14. Termal kameranın deney düzeneklerinde yerleşimi 156
Şekil 3.15. Karışık sıralı dört kat 18650 pilin tava içine yerleştirilmesi 158
Şekil 3.16. Termal kaçak başlangıcı 159
Şekil 3.17. Termal kaçak mekanizmasına müdahale öncesi ve sonrası 159
Şekil 3.18. Pillerin dizilimleri 161
Şekil 3.19. Gözlemlenen termal kaçak gelişimi 162
Şekil 3.20. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 163
Şekil 3.21. Deney sonrası pillerin durumu 164
Şekil 3.22. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 165
Şekil 3.23. Hücrenin emniyet ventilindeki yırtılma ve hücrenin şişmesi 167
Şekil 3.24. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 167
Şekil 3.25. Alüminyum dış katmanın yırtılması ve folyoların açığa çıkması 169
Şekil 3.26. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 170
Şekil 3.27. Tatbik edilen inorganik sıvının soğutma etkisi 172
Şekil 3.28. Söndürme sonrası hücrelerde sıcaklık 172
Şekil 3.29. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 174
Şekil 3.30. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 176
Şekil 3.31. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 177
Şekil 3.32. 1,5 m düşme deneyleri öncesinde, sırasında ve sonrası batarya 180
Şekil 3.33. 2 m düşme deneyleri sırasında ve sonrası batarya 181
Şekil 3.34. Bataryanın düşürülmesi denemeleri ve oluşan hasarlar 183
Şekil 3.35. 1,5 m düşme yüksekliği düşme sayısı ile sıcaklığın değişimi 184
Şekil 3.36. 2 m düşme yüksekliği düşme sayısı ile sıcaklığın değişimi 184
Şekil 3.37. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 186
Şekil 3.38. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 187
Şekil 3.39. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 188
Şekil 3.40. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 188
Şekil 3.41. Yanan batarya içindeki hücreler ve hasar gören batarya alt tablası 189
Şekil 3.42. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 190
Şekil 3.43. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 191
Şekil 3.44. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 192
Şekil 3.45. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 193
Şekil 3.46. Plastik aksam, kablo izolasyonu, metal aksam hasarları 194
Şekil 3.47. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 195
Şekil 3.48. Söndürme eyleminin başlaması 196
Şekil 3.49. Bataryanın yanma aşamaları ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 196
Şekil 3.50. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 198
Şekil 3.51. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 199
Şekil 3.52. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları 200

Şekil 3.53. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği 201
Şekil 3.54. BMS ve sigortaların sökülmesi 202
Şekil 3.55. Kısa devre düzeneği 203
Şekil 3.56. Deneyin başlangıç aşaması..... 203
Şekil 3.57. Bataryanın farklı noktalarından gerilim ölçümü 204
Şekil 3.58. Batarya kısa devre ardından alınan sıcaklıklar ve zaman grafiği..... 205
Şekil 3.59. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları..... 206
Şekil 3.60. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları..... 207
Şekil 3.61. Bataryadan yoğun duman çıkışı 208
Şekil 3.62. Yanma sonrası batarya ve modüllerin durumu 209
Şekil 3.63. Soğutma etkisi ile batarya sıcaklığında düşüş..... 210
Şekil 3.64. Deneyin gerçekleştirilmesi aşamaları..... 213
Şekil 3.65. Deney aşamalarında alınan termal görüntüler..... 213
Şekil 3.66. Deney verilerinin Matlab programına yüklenmesi..... 214
Şekil 3.67. Veri seçimi yapılması ve içe aktarım ekranı 215
Şekil 3.68. Li-ion pilin yanma aşamaları..... 216
Şekil 3.69. Li-ion pilin yanma aşamaları..... 217
Şekil 3.70. Ki-Kare testinin seçilmiş beş yöntemi 219
Şekil 3.71. Eğitim sürecinde kullanılan modeller 220
Şekil 3.72. Doğrulama tekniğinin seçim ekranı 221
Şekil 3.73. Matlab istatiksel analiz yöntemi seçim ekranı 222
Şekil 3.74. Kullanılan modeller..... 222
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan organik ve inorganik sıvıların termal kaçak durdurma performanlarının karşılaştırılması 232

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Pil teknolojileri ve özellikleri 15
Tablo 2.2. Alkali metallerin oksidasyon enerjileri..... 19
Tablo 2.3. Li-ion piller için kullanılan anot malzemeleri 27
Tablo 2.4. Temel katot malzemelerinin özellikleri..... 33
Tablo 2.5. Katot malzemelerinin türlerine göre Li-ion pillerin özellikleri 34
Tablo 2.6. Çeşitli ticari katot türleri ve özellikleri..... 40
Tablo 2.7. 10Ah kapasiteye sahip hücrenin C-oranı değerleri..... 55
Tablo 2.8. Kullanılan solventlerin özelliklerinin karşılaştırılması 74
Tablo 2.9. Yaygın kullanılan lityum tuzlarının özellikleri 75
Tablo 2.10. Termal kaçak mekanizmasının oluşum basamakları..... 92
Tablo 2.11. Termal kaçak sırasındaki gerçekleşen başlıca reaksiyonlar..... 93
Tablo 2.12. Çeşitli standartlar uyarınca yapılan testler 120
Tablo 2.13. EUCAR uyarınca tehlike sınıfları 121
Tablo 3.1. Deneyde kullanılan 18650, LCO tip pilin kapasite özellikleri 141
Tablo 3.2. PHEV araca ait batarya modülü 142
Tablo 3.3. PHEV araca ait batarya modülü 142
Tablo 3.4. Deneyde kullanılan HV bataryanın özellikleri 144
Tablo 3.5. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın özellikleri..... 145
Tablo 3.6. Deneyde kullanılan söndürme maddesinin % içeriği 145
Tablo 3.7. Deneyde kullanılan söndürme maddesinin % içeriği 146
Tablo 3.8. Gazlı söndürme maddesi içeriği 146
Tablo 3.9. Köpük söndürme maddesi içeriği..... 146
Tablo 3.10. Ardunio çeşitleri 152
Tablo 3.11. Testo 868 termal kameranın özellikleri..... 152
Tablo 3.12. Pil türlerine göre gerilim sınırları ile SOC değerleri 155
Tablo 3.13. İki Sıralamanın termal kaçak mekanizma davranışı karşılaştırması..... 163
Tablo 3.14. Düşme deneyi öncesi gerçekleştirilen iç sıcaklık ölçümleri..... 179
Tablo 3.15. 1,5 m'den düşürme deneyleri sonrası ölçülen sıcaklıklar..... 181
Tablo 3.16. 2 m'den düşürme deneyleri sonrası ölçülen sıcaklıklar..... 182
Tablo 3.17. Söndürme ardından zamana bağlı sıcaklıktaki değişim..... 209
Tablo 3.18. Deney prosedüründe adımları..... 212
Tablo 3.19. Karışıklık matrisi 223
Tablo 3.20. Karar ağacı modeli için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri..... 225
Tablo 3.21. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri..... 226
Tablo 3.22. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri..... 227
Tablo 3.23. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri..... 228
Tablo 3.24. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri..... 229
Tablo 3.25. Eğitim ve test sonuçlarıda en verimli modeller 230

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E : Enerji, (J)
F : Faraday sabiti, (C.mol-1)
I : Elektrik akımı, (A)
L : Uzunluk, (m)
m : Kütle, (kg)
m : Molar enerji, (J.mol-1)
N : Kuvvet, (J.m-1)
n : Madde miktarı (mol)
nm : Nanometre
T : Sıcaklık (℃)
u : Hız, (m.s-1)
η : Verim, (%)
Pa : Basınç, (N.m-2)
t : Zaman, (s)
W : Enerji akışı, (J.s-1)
V : Elektriksel potansiyel, (J.A-1.s -1)
V : Hacim, (m3)
ρ : Yoğunluk, (kg/m3)

Kısaltmalar

ABD : Amerika Birleşik Devletleri
AC : Alternative Current (Alternatif Akım)
AFV : Alternative Fuel Vehicle (Alternatif Yakıtlı Taşıt)
AI : Artifical Intelligence (Yapay Zeka)
BMS : Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
BTMS : Battery Thermal Management System (Batarya Termal Yönetim Sistemi)
CA : Capric Acid (Kaprik Asit)
CEI : Cathode Electrolyte Interphase (Katot Elektrolit Arayüz)
CID : Current Interrupt Device (Şarj Kesme Cihazı)
CTB : Cell to Battery (Pil Hücresinden Bataryaya Tasarım)
DC : Direct Current (Doğru Akım)
DL : Deep Learning (Derin Öğrenme)
DOD : Depth of Discharge (Deşarj Derinliği)
EV : Electric Vehicle (Elektrikli Taşıt)
EC : Ethylene Carbonate (Etilen Karbonat)
egs : Equivalent Gram per Substance (Eşdeğer Miktar)
EIS : Electrochemical Impedance Spectroscopy (Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi)
EUCAR : European Council for Automotive R&D (Avrupa Otomotiv Araştırma ve Geliştirme Konseyi)
F : Faradays Constant (Faraday Sabiti)
GNB : Gaussian Naive Bayes (Normal Dağılım Varsayımına Dayalı Naive Bayes Sınıflandırıcısı)

GPU : Graphics Processing Unit (Grafik İşleme Birimi)
HEV : Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Taşıt)
HRR : Heat Release Rate (Isı Salınım Katsayısı)
IEA : International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IoT : Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IR : Infra Red (Kızılötesi)
İYM : İçten Yanmalı Motor
KA : Karar Ağacı
KKD : Kişisel Koruyucu Donanım
KNN : K-Nearest Neighbors (K-En Yakın Komşu)
LA : Lauric Acid (Laurik Asit)
LCO : Lithium Cobalt Oxide (Lityum Kobalt Oksit)
LEL : Lower Expolison Limit (Alt Patlama Limiti)
LFP : Lithium Iron Phosphate (Lityum Demir Fosfat)
Li-ion : Lithium Ion (Lityum İyon)
LMO : Lithium Manganese Oxide (Lityum Manganez Oksit)
LRO : Lithium Rich Oxide (Lityum Zengin Oksit)
LTO : Lithium Titanate Oxide (Lityum Titanat Oksit)
MCF : Mesocarbon Fiber (Mezokarbon Lif)
MCMB : Mesocarbon Microbeads (Mezokarbon Mikroboncuk)
MDP : Markov Decision Process (Markov Karar Süreçleri)
MFA : Methyl Difluoroacetate (Metil Difloroasetat)
ML : Machine Learning (Makine Öğrenmesi)
MÖ : Milattan Önce
NCA : Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxides (Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit)
NCM : Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxides (Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit)
NiMH : Nickel Metal Hydride (Nikel Metal Hidrür)
NiCd : Nickel Cadmium (Nikel Kadminyum)
PA : Palmitic Acid (Palmitik Asit)
PE : Polyethylene (Polietilen)
PEG : Polyethylene Glycol (Polietilen Glikol)
PET : Poly-Ethylene Terephthalate (Poli-Etilen Tereftalat)
PPESK : Poly-Phthalazinone Ether Sulfone Ketone (Poli-Ftalazinon Eter Sülfon Keton)
PW : Paraffine Wax (Parafin Mumu)
PHEV : Plug in Hybrid Vehicle (Kablolu Hibrit Araç)
PCM : Phase Change Material (Faz Değişim Maddesi)
PP : Polypropylene (Polipropilen)
PMIA : Poly m-Phenylene Isophthalamide (Poli m-Fenilen İzoftalamid)
PI : Polyimide (Poliimid)
PFN : Ethoxy-Pentafluoro Cyclotriphosphazene (Etoksi-Pentafloro Siklotrifosfazen)
POMDP : Partially Observable Markov Decision Process (Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreçleri

RUL : Remaining Useful Life (Kalan Faydalı Ömür)
RL : Reinforcement Learning (Pekiştirmeli Öğrenme)
RSEI : SEI Resistance (SEI Katman Direnci)
RS : Electrolyte Resistance (Elektrolit Direnci)
SA : Stearic Acid (Stearik Asit)
SEI : Solid Electrolyte Interphase (Katı Elektrolit Arayüz)
SOC : State of Charge (Batarya Şarj Miktarı)
SOF : State of Function (Pilin Genel Durumu)
SOH : State of Health (Batarya Sağlık Durumu)
STEL : Short Term Exposure Limit (Kısa Süreli Maruziyet Sınırı)
TEP : Triethyl Phosphite (Trietil Fosfit)
THR : Total Heat Release (Toplam Isı Salınımı)
TML : Total Mass Loss (Toplam Kütle Kaybı)
TWA : Time Weighted Average (Zaman Ağırlıklı Ortalama Değer)
XPS : X-Ray Photoemission Spectroscopy (X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi)
VC : Vinylene Carbonate (Vinilen Karbonat)
VEC : Vinyl Ethylene Carbonate (Vinil Etilen Karbonat)
VOC : Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Buhar)
$: United States dollar (Amerika Birleşik Devletleri Doları)

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA YANGIN GÜVENLİĞİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Elektrikli taşıtlarda kullanılan lityum iyon bataryaların başlıca riskleri; kısa vadede ısıyı artıran zincirleme bir kimyasal reaksiyonun neden olduğu yangın ve patlama, toksik gaz salınımıdır. Bu durum Termal Kaçak olarak adlandırılmaktadır. Termal kaçağın nedeni esas olarak aktif malzemelerin ve elektrolitlerin ayrışmasıdır. Bataryanın termal kararsızlığı nedeniyle, oluşan koşullar yangın ve patlama riskini tetikler. Batarya kapasitesini ve enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik geliştirme girişimleri de bu riski artırabilir.

Bu çalışma, elektrikli taşıt bataryaları üzerinde yapılan deneyler vasıtasıyla üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada termal kaçak mekanizmasının oluşum sebepleri ve aşamalarının gözlemlenmesi amacıyla mekanik etki, yüksek sıcaklığın etkisi ve kısa devre oluşumunun etkileri gözlemlenmiştir. İkinci aşamada termal kaçak zincir reaksiyonunun, sıcaklığın hızlıca azaltılarak durdurulmasına yönelik farklı maddelerin etkilerinin denemeleri yapılmıştır. Son aşamada ise lityum iyon bataryalarda termal kaçak mekanizması başlamadan önce çıkmaya başlayan ve yangın termal kaçak boyunca da devam eden CO, CO_2 gaz salınımının sensörler vasıtasıyla izlenmesi ve makine öğrenmesi ile modelleme yapılarak termal kaçak mekanizması zincir reaksiyonu hemen öncesi durumun tahmin edilmesine yönelik modelleme çalışması yapılmıştır.

Deneylerden ve makine öğrenimi modellemesinden elde edilecek sonuçlar birleştirilmesi, elektrikli taşıt üreticileri tarafından batarya yangınlarına karşı önleyici bakım düşüncesi ile taşıt bataryasında uygulanması önerilmiştir. Batarya kaynaklı oluşabilecek yangın olaylarının oluşmadan yok edilmesi amacıyla batarya kapalı hücresinin içindeki CO, CO_2 gaz salınımının sürekli ölçülmesi, alınan bilgilerin BMS üzerinde makine öğrenmesi ile en verimli modeller kullanılarak sürekli anlık değerlendirilmesi sağlanmalıdır. Bu değerlendirme esnasında batarya üzerinde termal kaçak mekanizması oluşturabilecek bir etki durumunda batarya kapalı hacmi içerisinde basınçlandırılmış olan ve batarya sıcaklığını hızlı azaltacak inorganik tabanlı sıvı vasıtasıyla batarya içerisine boşaltılması vasıtasıyla oluşabilecek mal ve can kayıplarının en aza indirilmesi amacıyla kullanılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya Yanma Gazları, Lityum İyon Bataryalar, Makine Öğrenmesi, Proaktif Yangın Önlemleri, Termal Kaçak Mekanizması.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF FIRE SAFETY IN ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

The primary risks associated with lithium-ion batteries used in electric vehicles include fire and explosion due to a chain reaction that causes a rapid increase in heat, along with the release of toxic gases. This phenomenon is referred to as Thermal Runaway, primarily caused by the decomposition of active materials and electrolytes. Due to the thermal instability of the battery, these conditions increase the risk of fire and explosion. Efforts to enhance battery capacity and energy density may also elevate this risk.

This study was conducted in three stages through experiments on electric vehicle batteries. In the first stage, the causes and stages of the thermal runaway mechanism were observed, including the effects of mechanical impact, high temperature, and short circuit formation. In the second stage, tests were conducted to evaluate the effectiveness of different materials in halting the thermal runaway chain reaction by rapidly reducing temperature. In the final stage, the emission of CO and CO_2 gases which begins before the initiation of thermal runaway and continues throughout was monitored using sensors. Additionally, a machine learning model was developed to predict the state immediately prior to the onset of the thermal runaway chain reaction.

The integration of results obtained from experiments and machine learning modeling is recommended for use by electric vehicle manufacturers as a preventive maintenance approach against battery fires. To prevent potential fire events caused by batteries before they occur, it is recommended that CO and CO_2 emissions within the battery's closed cell be continuously measured, with the information continuously evaluated in real-time on the Battery Management System (BMS) using highly efficient machine learning models. In cases where an effect capable of triggering the thermal runaway mechanism is detected during this assessment, it is proposed that an inorganic-based liquid, which is pressurized within the closed battery compartment and capable of rapidly reducing battery temperature, be released into the battery to minimize potential losses of life and property.

Keywords: Battery Combustion Gases, Lithium Ion Batteries, Machine Learning, Proactive Fire Precautions, Thermal Leakage Mechanism.

1. GİRİŞ

Elektrikli taşıtlar (EV'ler), sürdürülebilir ulaşım çözümleri olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, elektrikli taşıtların yangın riski, mevcut güvenlik standartları ve istatistiklerle değerlendirilmesi gereği oluşmuştur. EV'lerin yangınları, genellikle batarya teknolojileri ile ilişkilendirilmektedir. Lityum iyon (Li-ion) bataryaların, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle yanıcı olabileceği ve aşırı ısındığında tehlikeli kimyasal reaksiyonlar başlatabileceği bilinmektedir.

EV'ler, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel içten yanmalı motorlu (İYM) taşıtlara kıyasla, EV'ler daha düşük ve hatta sıfır karbon emisyonları ve hava kirliliği ile çevreye daha az zarar verirler. Ancak, bu taşıtların üretim süreçleri ve batarya üretimi bazı çevresel zorluklar da barındırmaktadır (Michaelides, 2018). Elektrikli taşıtlar, fosil yakıtlı taşıtlara göre daha az karbon emisyonu üretimi nedeniyle şehir içi hava kalitesinin iyileştirilmesine ve iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlamaktadır (Alanazi., 2023). Elektrikli motorların, içten yanmalı motorlara göre daha yüksek enerji verimlilliği ön plana çıkan unsurlardandır, bu sebeple enerji tüketimi daha azdır ve fosil yakıt bağımlılığını düşürür. Elektrikli taşıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ile şarj edilebilir. Bu, enerji üretiminde fosil yakıt kullanımını azaltarak çevresel etkileri minimize etmektedir (Sanguesa ve diğ., 2021). Birleşmiş Milletler, Paris Anlaşması kapsamında, küresel ısınmayı 2℃'nin altında tutma hedefi doğrultusunda elektrikli taşıtların yaygınlaştırılmasını desteklemektedir. Paris Deklarasyonu, 2030 yılına kadar dünya genelinde satılan taşıtların %35'inin elektrikli olmasını hedeflemektedir (URL-1).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, yenilenebilir enerji kaynaklarının oranının hızla artması, elektrikli taşıtların sayısının ise 2030 yılı sonuna kadar büyük bir artış göstereceği rapor edilmektedir (URL-2). IEA raporuna göre 2030 yılında dünyada satılan otomobiller içinde elektrikli otomobillerin payı % 60'ı aşması ve 2030'da dünyadaki elektrikli taşıtların toplamının 350 milyon civarında olacağı öngörülmektedir (URL-3). EV yangın riski, içten yanmalı motorlu taşıtlara göre daha düşüktür. Örneğin, Avustralya'da yapılan bir araştırmaya göre, elektrikli taşıtlarda yangın sıklığı milyon taşıt başına altı yangın olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, İYM bu oran milyon taşıt başına 2130 adet yangındır. ABD'de ise, yıllık ortalama 55 EV yangınına karşılık 284130 İYM

taşıt yangını kaydedilmiştir. EV yangınlarından kaynaklanan ölümler, İYM taşıtlara göre daha azdır. Ancak, her iki tür taşıtta da yangın olayları ciddi yaralanmalara ve ölümlere neden olabilmektedir. Örneğin, Çin'de yıllık ortalama 31 EV yangını kaydedilmiş ve bu yangınların %36,9'u ani tutuşma, %26,2'si ise şarj sırasında meydana gelmiştir (Dorsz ve Lewandowski, 2022).

EV yangınları, genellikle Li-ion pillerin termal kaçak mekanizması oluşması ile meydana gelir. Bu tür yangınlar, İYM taşıt yangınlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda yanar ve söndürülmesi daha zor olabilir. Örneğin, bir Tesla Model S yangını, yolun altını bile eritecek kadar yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır. Ayrıca, bu yangınlar saatler veya günler sonra yeniden alevlenebilir, bu da kurtarma ekipleri ve tamir atölyeleri için ek riskler oluşturur (Feng ve diğ., 2018).

EV yangınları, yüksek sıcaklıklar ve toksik gazlar nedeniyle ciddi güvenlik riskleri taşır. Yangın söndürme ekipleri, bu tür yangınlarla başa çıkmak için özel eğitim ve donanım gerektirir. Ayrıca, yangın sırasında veya sonrasında elektrik çarpması riski de bulunmaktadır. EV yangınları, çevreye zararlı kimyasalların yayılmasına neden olabilir. Yangın söndürme sırasında kullanılan su, toksik maddeler içerebilir ve bu da çevresel kirliliğe yol açabilir. Bu nedenle, yangınların önlenmesi, çevresel koruma açısından da kritik öneme sahiptir (Larsson ve diğ., 2017.b).

EV yangınları, taşıt sahipleri ve sigorta şirketleri için yüksek maliyetlere neden olabilir. Yangın sonrası taşıtların tamiri veya değiştirilmesi, büyük mali yükler getirebilir. Ayrıca, yangınların neden olduğu altyapı hasarları da ek maliyetler oluşturur.

Son zamanlarda yaşanmış birkaç kaza Li-ion yangınlarının sonuçlarının ciddi olabileceğini göstermiştir. Bu yangınlara örnekler; Fremantle Highway Feribotu Yangını: 2023 yılında, Fremantle Highway adlı feribotta meydana gelen yangında, EV yangına neden olduğu düşünülmektedir. Bu yangın, bir mürettebat üyesinin ölümüne ve geminin büyük ölçüde hasar görmesine yol açmıştır (URL-4).

2023 yılında Fransa'da bir geridönüşüm tesisisinde 8000 adet Li-ion batarya yanmış, bu yangına 100 itfaiyeci ile ve 60 itfaiye aracı ile müdahale edilmiştir (URL-5).

1.1. Tezin Kapsamı

Bu doktora tezinde, tam boyutlu elektrikli taşıt (EV) bataryaları ile bu bataryaları oluşturan blok ve hücreler üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında birden fazla deney düzeneği kullanılarak üç ana çalışma yönetilmiş ve bu çalışmalar aracılığıyla termal kaçak mekanizmasının özellikleri, oluşum süreçleri ve kontrol stratejileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Teorik bilgilerden yola çıkılarak, termal kaçak mekanizmasının oluşum aşamalarının deneysel olarak gözlemlenmesi, çalışmanın birinci aşamasını oluşturmuştur. Bu amaçla, termal kaçak mekanizmasının nedenleri ve oluşum süreçleri termal kamera ve video kayıt sistemleri ile belgelendirilmiştir. Bu aşamada, termal kaçağın tetiklenmesi için üç farklı yöntem uygulanmış ve bunların etkinlikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir:

- Mekanik Darbe: Bataryalar 1,5 m ve 2 m yüksekliklerden bırakılarak mekanik darbe etkisiyle termal kaçak oluşturulmaya çalışılmıştır.
- Yüksek Sıcaklık Maruziyeti: Bataryanın altına yerleştirilen benzin ve mazot karışımı tutuşturularak, çıkan yoğun ısının termal kaçak oluşturma etkisi incelenmiştir.
- Kısa Devre: Bataryanın kutupları arasında iletken bir bağlantı oluşturularak kısa devre yoluyla termal kaçak tetiklenmiştir.

Bu yöntemlerin her birinde termal kaçak mekanizmasının aşamaları gözlemlenmiş ve elde edilen veriler sistematik olarak kaydedilmiştir.

Deneylerin ikinci aşaması, termal kaçak zincir reaksiyonunun yavaşlatılması veya tamamen durdurulmasına yönelik etkin stratejilerin araştırılmasını kapsamaktadır. Bu aşamada, termal kaçak devam ederken sıcaklığı hızlı bir şekilde azaltabilecek çeşitli maddelerin etkileri test edilmiştir. Yanma sürecinin devamı, yakıt moleküllerinin belirli bir sıcaklığa ulaşmasına bağlıdır; dolayısıyla sıcaklığın azaltılması, zincir reaksiyonunu durdurmak için etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, lityum-iyon bataryalarda termal kaçak mekanizması başlamadan hemen önce ve yangın sürecinde salınan CO ve CO_2 gazlarının sensörler aracılığıyla izlenmesi ve bu verilerin makine öğrenmesi modelleri ile analiz edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma şu şekilde yürütülmüştür:

Tam boyutlu bir EV batarya hücresi, mekanik darbe etkisiyle (hücreye çivi batırılarak) zarar verilmiştir.

Çıkan gaz verileri Arduino Mega ve Raspberry Pi 4 platformları aracılığıyla anılık olarak toplanmış ve bu veriler Matlab (akademik sürüm) kullanılarak geliştirilen izleme ve raporlama uygulamasına aktarılmıştır.

Bu analizler sonucu geliştirilen makine öğrenmesi modelleri, termal kaçak zincir reaksiyonunun öngörülmesi ve erken uyarı sistemlerinin oluşturulmasına yönelik temel bilgiler sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve modelleme çalışmaları birleştirilerek elektrikli taşıt yangınlarının önlenmesine yönelik önleyici bakım stratejilerine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulgular, taşıt üreticilerine ve ilgili sektör paydaşlarına yol gösterici olması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Elektrikli Taşıtların ve Batarya Teknolojisinin Gelişimi

M.Ö. 3000 yılında tekerleğin Sümerler tarafından bulunması ile birlikte ulaşım ve taşıma kavramı önemli bir sürecin içine girmiştir. Otomobile giden yolda ilk önce arabanın tarihsel gelişimine değinmek gerekir (Aşık, 2013).

Aşık (2013) çalışmasında tekerleğin icadını izleyen dönemlerde, araba yapımı izlerinin Orta Asya topraklarına uzandığı ve Çinlilerin de araba yapmayı Mezopotamya ve Ön Asya'dan öğrendiklerini gösteren de bir takım belgeler olduğunu, M.Ö. 1450-1050 arasında savaş arabalarının yaygınlaştığını belirtmiştir.

Bununla birlikte yine aynı çalışmada Akdeniz çevresinde yerleşmiş kültürlerde M.Ö. 1500'lerden başlayarak bu geniş bölgeler içinde özellikle de savaşçı amaçlarla özel olarak arabalar kullanıldığı belirtilmiştir. Ayrıca bu atlı arabaların M.Ö. 600'lerden başlayarak savaşlarda kullanılmak amacıyla silahlandırıldığı ve hafif olması amacıyla özellikle üretildiği bilinmektedir. 1389-1405 yılları arasında Bavyera Kraliçesi Isabeau'nun kullandığı, 'Damerot'adlı araba, gerçek anlamda bireysel bir taşıt olarak ilk arabanın başlangıcı olarak kabul edilir.

İngiltere'de başlayan Sanayi Devrimi'nden sonra, önce buharlı ardından da elektrikli ve benzinli otomobiller üretilmeye başlanmıştır. Yaşamımızın bir parçası konumunda olan otomobil kelime anlamı olarak "auto" ve "mobile" sözcüklerinden oluşmaktadır. Auto, Yunancada 'kendi kendine'anlamına gelirken, 'mobile'ise Latincede 'hareket eden'anlamına gelmektedir (Aşık, 2013).

Roger Bacon, 13. yüzyılda Guillaume Humbert'e yazdığı bir mektupta, at ile çekilmeden, kendi kendine çalışan ve hayal bile edilemeyecek hızda hareket edebilen bir aracın yapılabileceğinden söz etmiştir.

İlk taşıt motorunun şekli Leonardo Da Vinci'nin 15. Yüzyıla ait Codex Atlanticus adlı eserinde atsız hareket eden bir aracın ilk çizimleri yer almaktadır. Yine Da Vinci'den önce yaşamış Rönesans döneminin mühendislerinden Francesco di Giorgio Martini'nin de, kabaca dört tekerlekli bir araca benzeyen ve "otomobil" adı ile anılan bir çizimi

mevcuttur ve Isaac Newton (1642-1727) tarafından çizilmiştir. Fransız mühendis Nicholas Joseph Cugnot 1769 yılında ise, bir arabayı da buhar gücüyle çalıştırmayı başarmıştı. Üç tekerlekli olan bu arabada su miktarının yetmezliği nedeniyle çalışma süresi çok sınırlıydı (URL-6).

Buharla çalışan taşıtların ortaya çıkması ve zamanla geliştirilmesiyle birlikte, 1820'nin başlarında William Cecil "gazlı motor" denemelerine başladı. Zaman içerisinde bu çalışmalar daha da geliştirilmiş ve örneğin, 1829'da Sir Goldswort Guyney, 25 km/h hızla giden buharlı bir araba yapmıştır. 1863 yılına gelindiğinde, Fransız Lenoir gazla çalışan ilk otomobili yapmış, 1867'de ise iki Alman araştırmacı, Otto ve Langen patlamalı motoru üretmişlerdi. 1875'te, yine bir Alman olan Sigfried Marcus bu kez ilk benzin motorlu aracı imal etmişti. 1886 yılına Maybach ve Gottlieb Daimler, motorlarını ilk kez dört tekerlekli bir at arabasına taktılar.

Bu taşıt, tarihin ilk "dört" tekerlekli benzin motorlu otomobili oldu. İYM otomobilin ilk üretimi 1886 yılında Karl Benz ve Gottlieh tarafından gerçekleştirilmiştir, Şekil 2.1 (a)'da bu taşıt gösterilmiştir. Alman Gotlieb Daimler 1894'te çift silindirli "V" tipi bir motor geliştirerek bunu başarıyla bir platforma yerleştirmiştir. Daimler'in bu aracı, birçok kaynak tarafından günümüzün benzin yakıtlı taşıtlarına benzerliği nedeniyle "ilk otomobil" olarak kabul edilmektedir.

1896'da, Henry Ford bisiklet tekerleğini kullanarak ilk otomobilini yapmıştır. 1897'de ise, Detroit'te Oldsmobile fabrikası kurulmuştur. Otomobilin ilk seri imalatçısı ise, Ransom E. Olds olmuştur. 1903'te Michigan'da kurduğu fabrikada Henry Ford, 562 kg ağırlığında olan "A" modelinden 1750 adet üretti. 1907'de ise "Ford T" üretilmiştir. Ford, fabrikaya 1913 yılında ilk montaj bandını kurarak dünyadaki en hızlı ve en büyük otomobil üreticisi konumuna gelmiştir (Aşık, 2013).

2.1.1. Elektrikli Otomobilin Kronolojik Gelişimi

Tarihi konusunda netlik olmamasına rağmen ilk elektrik tahrikli aracın Anyos Jedlik tarafından, 1827'de Macaristan'da yapıldığı iddia edilmektedir.

İlk gerçek elektrikli motor kabul edilen ve 15 watt gücünde olan motor 1834 yılında Moritz Herman Jacobi tarafından yapılmıştır (Dalgıç, 2021).

İlk elektrikli taşıt modeli Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da geliştirmiştir. 1838 yılında ise Robert Davidson 6,4 km/h hıza ulaşabilen elektrikli lokomotifi üretmiştir. Kurşun-asit bataryaları 1859 yılından sonra geliştirilmiş ve elektrikli taşıtlarda kullanılmaya başlanmıştır (Kerem, 2014).

Siemens, Elektromote isimli elektrikli troleybüsü 1882'de üretmiştir. Bu taşıt iki adet 2,2 kW'lık motora sahip olup ortalama 12 km/h hızındaydı. Elektromote Şekil 2.1 (c) 'de verilmiştir (Kerem, 2014).

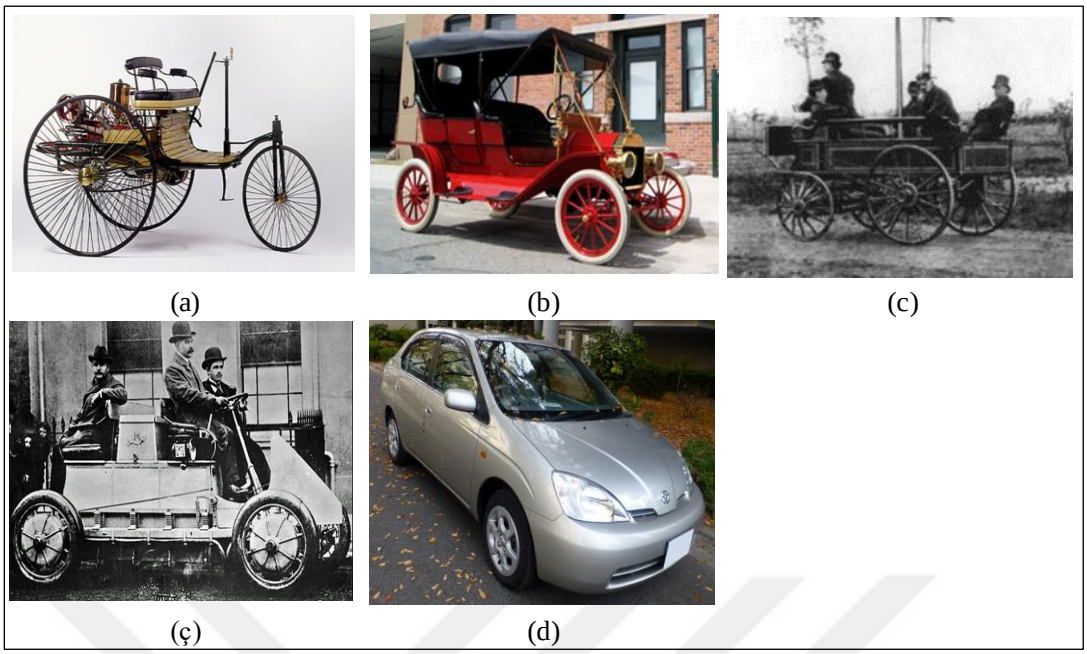
1900 yılında French Electroautomobile, 1903 yılında Krieger elektrik ve benzin motorlarını kullanarak ilk kez hibrid model denenmiştir. Ferdinand Porsche, aynı yıllarda ilk hibrid elektrikli aracın (HEV) tasarımını yaparak Mixt Wagen adını vermişti. Şekil 2.1 (ç)'de gösterilen İYM'a sahip aracın her bir tekerleğine elektrik motorları doğrudan tahrikli olarak yerleştirilerek taşıtta kurşun-asit bataryalar kullanılmıştır, bu taşıt 60 km/h hızına çıkabilmekteydi. 1916 yılında "Woods Motor Taşıt Şirketi" tarafından paralel HEV üretilmiştir (Kerem, 2014).

1920'lerin başından 1960'lara kadar neredeyse tüm EV üreticileri İYM kullanarak üretimlerini sürdürmüşlerdir. 1920-1960 yılları arasında EV'lara olan ilgi azalırken İYM'lu taşıtlar dünya çapında ilgi odağıydı (Kerem, 2014).

EV'lara olan ilginin bu dönemde azalmasının sebepleri olarak, 1912 yılında marş motorunun icat edilmesi ile birlikte İYM taşıtları daha pratik hale getirmesi olmuştur (Kerem, 2014).

Henry Ford'un içten yanmalı motora sahip taşıtları seri üretmeye başlaması ile birlikte taşıt maliyetlerinde düşme gerçekleşmiştir. Şekil 2.1 (b)'de seri üretilen Model T gösterilmiştir. Bir başka sebep ise ham petrol kaynaklarının artışı ve uzun menzile sahip taşıtlara olan ihtiyacın artması olmuştur (Kerem, 2014).

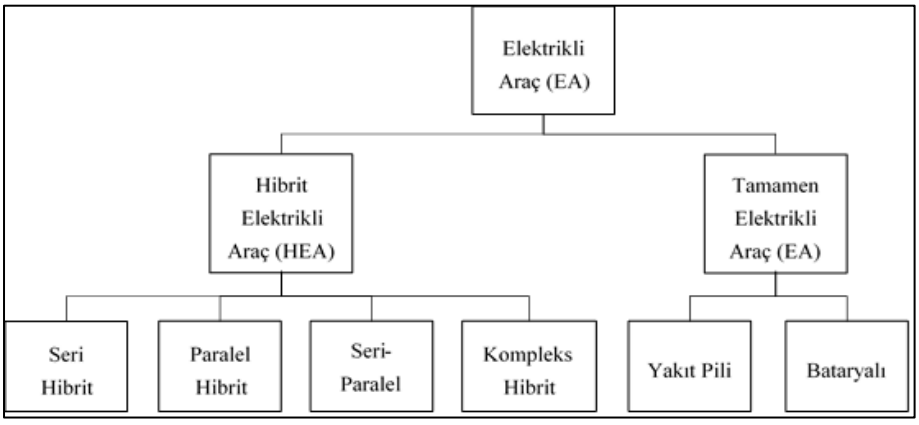
Otomotiv de hibrit teknolojisi 1990'ların sonundan itibaren batarya teknolojisinin gelişimine paralel yaygınlaşmış ve ilk seri üretim hibrit taşıt, 1997'de Japonya'da piyasaya sürülen Şekil 2.1 (d)'de gösterilen Toyota Prius olmuştur (Kerem, 2014).



Şekil 2.1. Tarihteki önemli içten yanmalı ve elektrikli otomobiller (a) ilk İYM taşıt, (b) ilk seri üretim model T, (c) ilk elektrikli troleybüs (ç) ilk hibrid elektrikli taşıt (d) ilk hibrit otomobil

2.1.2. Elektrikli Otomobil Türleri

Elektrikli taşıtlar tahrik edildikleri motorlara uygun olarak temelde iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar; hibrit elektrikli taşıtlar ve tamamen elektrikli taşıtlardır. Şekil 2.2'de elektrikli taşıtların türleri gösterilmiştir (Balcı ve diğ., 2020).



Şekil 2.2. Elektrikli taşıtların türleri (Balcı ve diğ., 2020)

2.1.2.1. Hibrit Elektrikli Taşıtlar (HEV)

Hibrit elektrikli taşıtlar, hareket için gerekli gücü iki farklı motordan almaktadır. Yapısında içten yanmalı motor ve elektrik motoru mevcuttur. Karakteristik olarak seri,

paralel, seri-paralel ve karmaşık olmak üzere dört çeşit hibrit elektrikli taşıt mevcuttur (Muratoğlu, 2017).

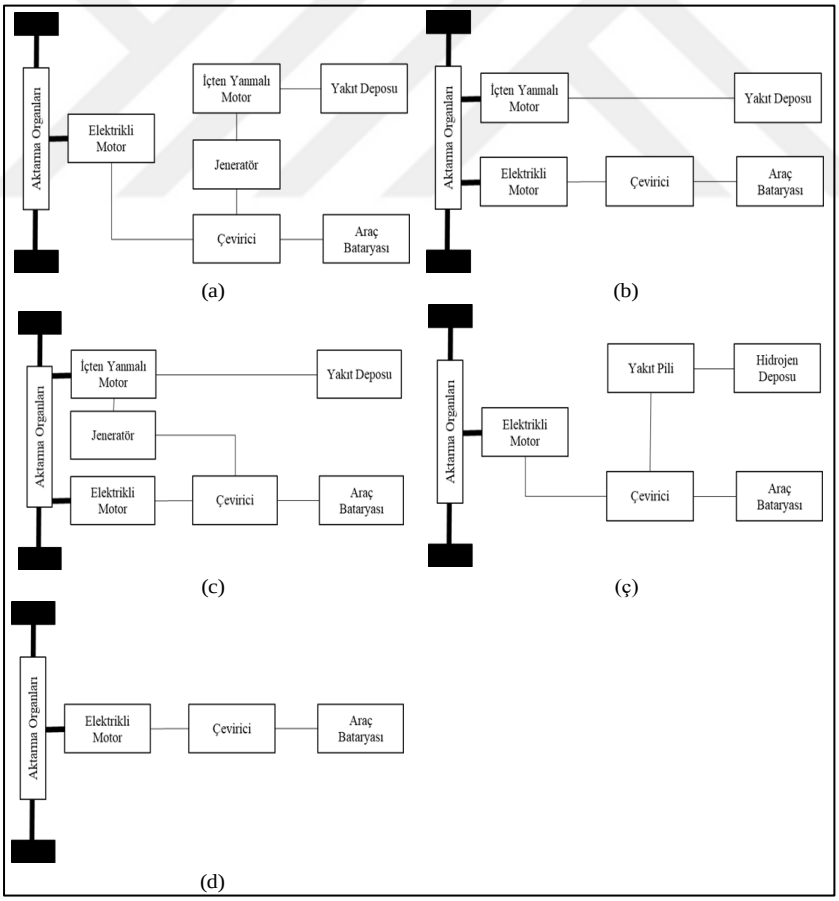
a. Seri Hibrit Elektrikli Taşıtlar: Bu tür taşıtlarda hareket için gerekli güç sadece elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Elektrik motorunu çalıştıracak enerji, yapısında bulunan bir içten yanmalı motorun jeneratör olarak görev yapması ve bataryayı beslemesi ile elde edilmektedir. Bataryanın şarj edilmesi, jeneratörden ve rejeneratif frenleme sisteminin, frenleme esnasında oluşan kinetik enerjinin geri kazanılması ile gerçekleştirilir. Şekil 2.3 (a)'da bu tür taşıtların çalışma şekli verilmiştir.
Bu tür taşıtlarda, elektrik motoru ile doğrudan tahrik edildiği için, debriyaj sistemi ve çok vitesli şanzıman kayıpları oluşmamaktadır (Balcı ve diğ., 2020).
b. Paralel Hibrit Elektrikli Taşıtlar: Bu tür taşıtlarda hareket, içten yanmalı motor ve elektrik motorunun gücünün, aktarma organları ile beraber doğrudan sağlamaktadır. Bu taşıtlarda güç aktarımı için bir sistem mevcuttur. İçten yanmalı motorları konvansiyonel taşıtların sahip olduğu içten yanmalı motorlara göre küçük ve pahalıdır. İçten yanmalı motorun devrede olduğunda verim kaybı oluşturmamaktadır. Şehir içi kullanımında verimi nispeten azalmaktadır Şekil 2.3 (b)'de bu tür taşıtların çalışma şekli gösterilmiştir, (Balcı ve diğ., 2020).
c. Seri-Paralel Hibrit Ve Kompleks Hibrit Elektrikli Taşıtlar: Bu tür taşıtların diğerlerinden en temel farkı, gerektiğinde içten yanmalı motor vites kutusundan ayrılıp seri hibrit elektrikli taşıtlardaki gibi jeneratör ile üretilen elektrik enerjisinin bataryaya gönderilerek şarj edilebilmesidir. Şekil 2.3 (c)'de seri-paralel hibrit elektrikli taşıtların çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir (Balcı ve diğ., 2020).

2.1.2.2. Tümü Elektrikli Taşıtlar (EV)

Bu tür taşıtlarda elektrik motoruna gereken elektrik enerjisi bataryadan elde edilmesi ve aracın hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu tür elektrikli taşıtlarda, emisyon açığa çıkmadığı ve taşıtların sıfır emisyonlu taşıtlar olarak adlandırıldığı bilinmektedir. Oldukça sessiz çalışmaları ve yokuş tırmanma kabiliyetlerinin konvansiyonel taşıtlara göre çok daha yüksek olması diğer avantajlarındandır. Rejeneratif frenleme ile elektrik motoru üzerinden kinetik enerji geri kazandırılmaktadır. Dolayısıyla kazanılan bu enerji ile bataryalar yeniden şarj edilerek menzil ve sürüş verimi arttırılmaktadır (Balcı ve diğ., 2020).

a. Yakıt Pili Elektrikli Taşıtlar: Aracın hareket ettirilmesi için gereken güç bataryadan temin edilen elektrik enerjisi, elektroliz işlemi ile elde edilen hidrojen vasıtası ile sağlanmaktadır. Yakıt pilinde kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülür ve işlem sonucunda sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Yapı olarak seri hibrit elektrikli taşıtlara benzemektedir. Seri hibrit elektrikli taşıtlarında bulunan yakıt deposu yerine hidrojen tankı ve içten yanmalı motor ile jeneratör yerine ise yakıt pili bulunmaktadır. Yakıt pilinden elde edilen elektrik enerjisi bataryayı doldurmakta ve aynı zamanda elektrik motorunu çalıştırmaktadır (Muratoğlu, 2017). Şekil 2.3 (ç)'de yakıt pilli aracın çalışma prensibi gösterilmiştir.

b. Pil Paketli Elektrikli Taşıtlar: Bu taşıtlarda, yakıt deposu, içten yanmalı motor ve jeneratör bulunmamaktadır. Elektrik motoru için gerekli olan elektrik enerjisi sadece bataryadan elde edilmektedir. Batarya boşaldığında doldurulurlar (Muratoğlu, 2017). Şekil 2.3 (d)'de bu tür taşıtların çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2.3. Elektrikli taşıtların çalışma şekline göre türleri (a) Seri hibrit elektrikli taşıt (b) Paralel hibrit elektrikli taşıt (c) Seri-paralel hibrit ve kompleks hibrit elektrikli taşıt (ç) Yakıt pili elektrikli taşıt (d) Pil paketli elektrikli taşıt.

2.1.3. Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Bataryalar

Piller, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır (Mühendis, 2019). Elektrikli taşıtlarda kullanılan bataryalar en küçük yapı birimi pillerden (hücre) oluşmaktadır. Piller bir araya getirilerek grup, gruplar bir araya getirilerek modül, modüller bir araya getirilerek de batarya oluşturulmaktadır. Bu oluşuma örnek olarak; 2012 yılında 85 kWh pil paketine sahip Tesla S modeli 7104 adet silindirik yapıda 18650 tipi lityum-iyon pilden meydana gelmektedir. Tesla S modeli örneğinde batarya, seri olarak birbirine bağlanmış 16 modülden oluşmaktadır. Her modül 6 grubun seri bağlanmasıyla elde edilmiştir. Bu gruplar ise paralel bağlanmış 74 hücreden oluşmaktadır (Hançar ve Kaymaz, 2021). Piller, elektrik yüklenme durumuna göre, birincil pil (tekrar şarj edilemeyen) ve ikincil pil (tekrar şarj edilebilen) olarak iki gruba ayrılır.

2.1.3.1. Şarj Edilemeyen (Primary) Piller

İlk kez kullanımlarının ardından tekrar yüklenemezler ve bir kere kullanıldıktan sonra kullanılmazlar. Birçok birincil pil, portatif ekipmanlarda kolay bulunmaları ve ucuz olmaları sebebiyle oyuncaklar, el feneri, fotoğraf çeken cihazlar, kumanda cihazları gibi ekipmanlarda sıklıkla kullanılır. Bunların yanında, rezerv pil denilen bir tür ise kendi kendine deşarj olmayan uzun süre enerjisini depolayabilme kabiliyetine sahip olan ve çevre şartlarından iyi şekilde izole edilmiş bir pil grubudur. Kısa sürede, yüksek enerji ihtiyacının olduğu askeri uygulamalarda oldukça yoğun bir kullanımı vardır (Doğrusöz, 2014).

2.1.3.2. Şarj Edilebilen (Secondary) Piller

Akım uygulandığında tekrar şarj edilebilen pillerdir. Bu piller depolama sistemleri olarak sınıflandırılabilir.

İkincil pillerin uygulama alanı ikiye ayrılır. İlk uygulama grubunda bir elektrik sistemine sürekli bağlı olarak çalışarak elektrik enerjisi gereksinimini destekleyen, otomobil, uçak ve kesintisiz güç kaynağı gibi enerji sistemlerdir. İkinci uygulama grubunda ise, herhangi bir elektrik sistemine bağlı olmayan ve kullanıldığı süre boyunca sürekli deşarj olan, cep telefonları, bilgisayarlar, fotoğraf makineleri, elektrikli otomobiller gibi yerlerde kullanılan batarya sistemleridir. Yakıt pili, dışarıdan pile verilen yakıtlarla (örneğin

hidrojen) beslendiğinde enerji verebilen pillerdir. Yakıt pilleri genellikle otomobil ve otobüs gibi taşıtlarda kullanım örnekleri artmaktadır (Doğrusöz, 2014).

2.1.3.3. Pillerin Tarihsel Gelişimi

Pillerin ilk örneği sayılabilecek Bağdat pili, 1938 yılında Bağdat'ın güneydoğusunda bulunan Khujut Rabu bölgesinde Alman arkeolog Wilhelm Konig tarafından bulunmuştur. MÖ 250-224 yılları arasına tarihlenen kilden yapılmış 14 cm uzunluğunda ve en geniş kısmı 8 cm olan bir çömlekten oluşmaktadır. Çömleğin içinde, demir bir çubuk etrafına sarılmış 9 cm uzunluğunda ve 26 mm çapında bir bakır bir silindir bulunmaktadır. Bu pil düzeneği içine konulan sıvının özelliğine göre elektrik üretebilmektedir. Bir pil özellikleri taşıyan ilk bulgu olması sebebiyle önemlidir (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (a)'da bu pil gösterilmiştir.

Volta pili, sürekli elektrik akımı sağlayan ilk pil olan ve Alessandro Volta'nın 1800 yılında ürettiği pilin çalışma prensibi bakır ve çinko levhaların bir sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisine batırılması ile elektrik üretimi şeklindedir (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (b)'de bu pil gösterilmiştir.

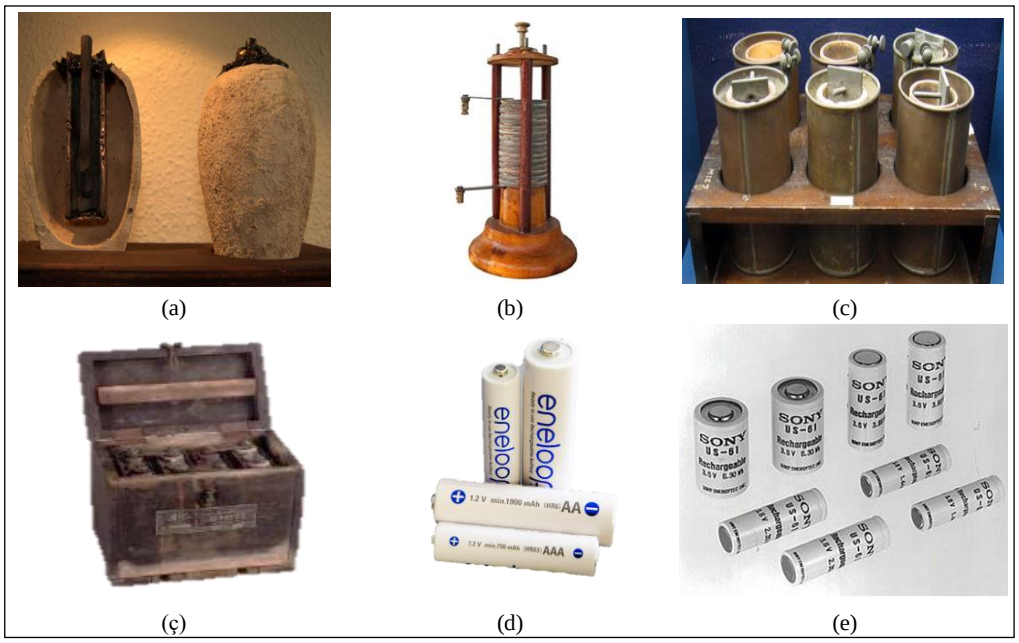
Daniell pili, 1836 yılında, John F. Daniell tarafından derişik bakır sülfat ($CuSO_4$) çözeltisine anot olarak bakır çubuk, çinko sülfat ($ZnSO_4$) ya da seyreltik sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisine daldırılmış çinko çubuk katot olarak kullanılmıştır (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (c)'de bu pil gösterilmiştir.

Nikel-Kadmiyum (NiCd) pili, 1901 yılında, Waldmar Jungner tarafından bulunmuştur. Şarj edilebilen ilk pil olarak bilinmekte olup NiCd piller günümüzün ticari pillerinin de temeli olarak sayılmaktadır. Bu piller taşınabilir aletler için güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu pillerin en büyük dezavantajı pilin hafıza etkisidir. Pilin hafıza etkisi o pilin şarj edilmesi ile ilgili olup, pilin son şarj seviyesini hatırlayıp bir sonraki şarjda sadece son şarj seviyesine kadar şarj edilebilmesini sağlayan olgudur. Bu nedenle NiCd piller artık kullanılmamaktadır (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (ç)'de bu pil gösterilmiştir.

1989 yılında piyasaya sürülen Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) pilinde, anot elektrot olarak metal hidrür, katot elektrot olarak ise $Ni(OH)_2$ ve alkalin elektrolit (KOH)'ten oluşmaktadır. Hidrojen elementi ilk önce metal (negatif elektrot) yüzeyine adsorbe olur

ve daha sonra metalin içine difüze olarak hidrojen absorbsiyonu ile hidrür oluşumu gerçekleşir (Küçükdeveci, 2018). Nikel kadmiyum (NiCd) pillerinden temel farkı kadmiyum yerine hidrojen kullanılmıştır. Pil sistemi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda Ni-MH pillerinin birim hacim esasına göre enerji yoğunlukları NiCd pillerinin çok üzerine çıkartılmıştır. Ni-MH pillerinin geliştirilmesi çok yönlü boyutlarda gerçekleştirilmiş olup, elektrot ve elektrolit bileşenleri farklılaştırılmış, pillerin çevrim ömürleri arttırılmış ve NiCd pillerine yakın bir seviyeye getirilmiştir (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (d)'de bu pil gösterilmiştir.

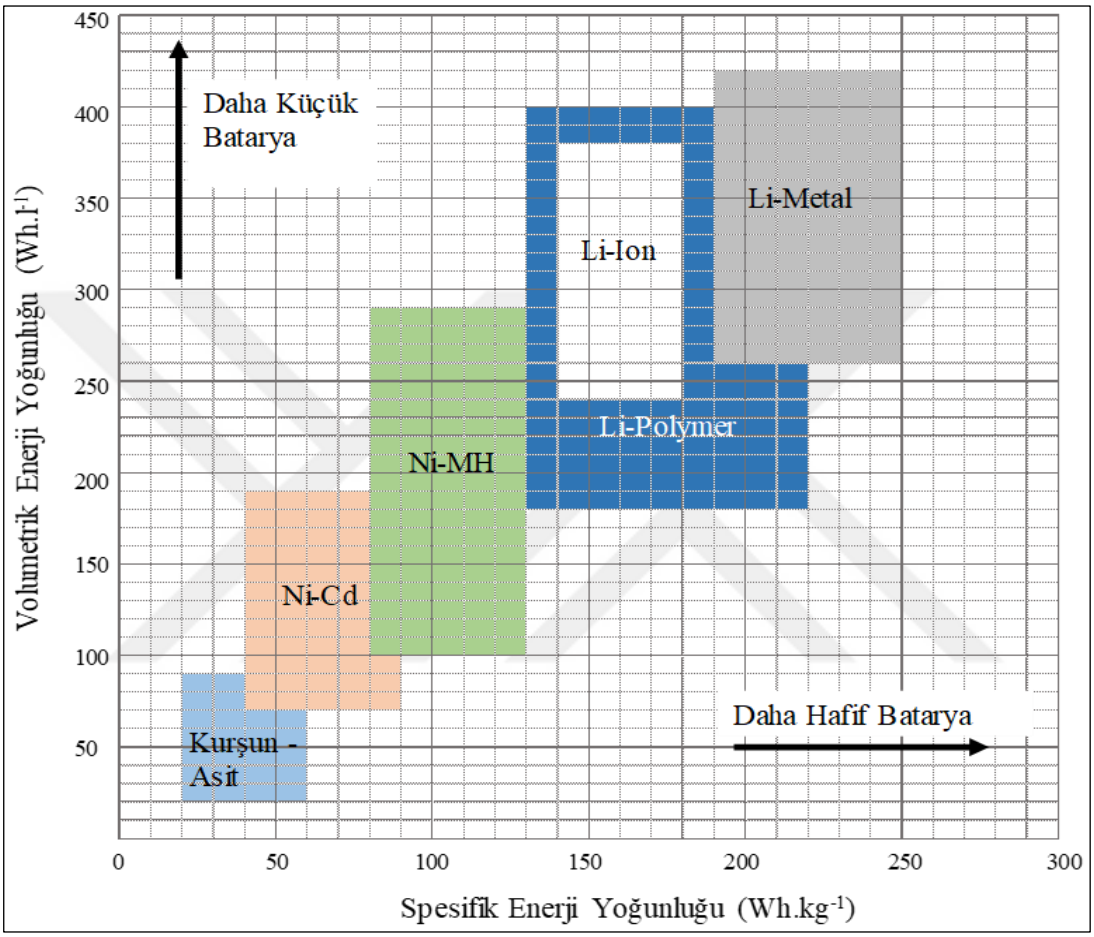
Lityum İyon Pil, 1912 yılında Gilbert N. Lewis tarafından keşfedilmiştir. Sony tarafından ticari amaçla 1991'de piyasaya sürülmüştür. NiCd pillerin çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı Li-ion pillere geçiş başlamıştır. Exxon tarafından ilk defa 1972 yılında TiS_2 (Titanyum disülfit) yapısında katot üretilerek, lityum metalini anot olarak kullanarak lityum pili üretilmiştir. 1980 yılında katmanlı yapıdaki sülfür içeren katot malzemelerinin uzun çevrimler boyunca kararlı kalmadığı keşfedilmiş, Goodenough ve çalışma arkadaşları tarafından katot için alternatif malzeme metal oksitlerin kullanılması önerilmiştir. Sony tarafından ticari olarak üretilen ilk Li-ion pillerinde $LiCoO_2$ 'in katot, karbon ise anot olarak kullanılmış, 3,6 V üstünde potansiyel elde edilmiştir. (Sönmez, 2023). Şekil 2.4 (e)'de bu pil gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Tarihteki ilk piller (a) Bağdat pili, (b) Volta pili, (c) Daniell pili, (ç) Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) pili, (d) NiCd pil, (e) Li-ion pil

2.1.4. Kullanılan Yaygın Piller

Günümüzde farklı anma voltajı ve enerji yoğunluğuna sahip çeşitli pil teknolojileri bulunmakta ve geliştirilmektedir. Pillerin gelişimi ile birlikte enerji yoğunlukları artarken daha hafif ve hacimsel olarak daha az yer kapladığı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Çeşitli pillerin spesifik enerjilerinin karşılaştırılması

Elektrikli taşıtlarda yaygın olarak kullanılan ve henüz araştırma aşamasında olan pil teknolojileri ve özelikleri Tablo 2.1'de verilmiştir

.Elektrikli taşıtlar için en önemli parametrelerden biri de depolayabildiği enerji ile yakından ilişkili olan şarj başına sürüş menzilidir.

Bu sebeple elektrikli taşıtların bataryalarının enerji yoğunluğu ve ağırlık oranı en önemli faktör olduğu için uzun bir sürüş menzili sağlamak için birçok batarya üreticisi yüksek enerji yoğunluğuna sahip LIB'lerin tasarlanması hedeflemektedir (Hao ve diğ., 2017).

Tablo 2.1. Pil teknolojileri ve özellikleri

Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (adet)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Pb-Asit	2	35	1000	Yok	-15, +50
NiCd	1,2	50-80	2000	Var	-20, +50
NiMH	1,2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
Zebra	2,6	90-120	>1200	Yok	+245, +350
Li-Ion	3,6	118-250	2000	Yok	-20, +60
LiPo	3,7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
$LiFePO_4$	3,2	120	>2000	Yok	-45, +70
Zn-Hava		460	200	Yok	-10, +55
Li-S		350-650	300	Yok	-60, +60
Li-Hava		1300-2000	100	Yok	-10, +70

2.1.4.1. Kurşun-Asit (Pb-acid) Piller

Kurşun-asit piller birçok uygulamada kullanılmakta olan eski ve yaygın bir teknolojidir. Kurşun-asit pillerde negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit (PbO_2) ve elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) materyalleri kullanılmaktadır. Yüksek deşarj akımı, düşük özboşalım, hafıza etkisinin bulunmaması ve ucuz olması gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak düşük nominal voltaj ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca kullanılmadıkları zaman pil ömürleri düşmektedir (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.2. Nikel Kadmiyum (NiCd) Piller

Nikel kadmiyum piller güvenli ve ucuz bir teknolojidir. Nikel kadmiyum pillerde negatif yüklü elektrotta kadmiyum/ kadmiyum hidroksit ($Cd/Cd(OH)_2$), pozitif yüklü elektrotta nikel hidroksit/nikel oksihidroksit ($Ni(OH)_2/NiOOH$) ve elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) materyalleri kullanılmaktadır. Yüksek deşarj akımı sağlayan bu piller kurşun-asit pillere göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak önemli dezavantajlara sahiptir. Bunlar zayıf şarj/deşarj verimi, yüksek özboşalım ve hafıza etkili olmasıdır (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.3. Nikel Metal Hidrat (NiMH) Piller

Nikel metal hidrat pil teknolojisi nikel kadmiyum pillerin dezavantajlarına alternatif olarak geliştirilmiştir. Kadmiyum elektrotu yerine metal hidrat kullanılmıştır. Nominal voltaj değerleri eşit iken nikel metal hidrat piller daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak nikel metal hidrat piller nikel kadmiyum pillerine göre daha yüksek özboşalım oranına ve aşırı şarj durumunda daha düşük güvenirliğe sahiptir (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.4. Lityum İyon (Li-ion) Piller

Li-ion pillerde pozitif elektrot olarak diğer materyallere göre düşük toksitite, yüksek kapasite ve ucuz olması avantajı ile lityum metal oksitler kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan oksitler: Lityum kobalt oksit – $LiCoO_2$, Lityum nikel oksit – $LiNiO_2$, Lityum manganez oksit – $LiMn_2O_2$. Li-ion pil teknolojisi nikel tabanlı pil teknolojilerinden farklı özelliklere sahiptir. Nikel tabanlı pil gruplarına göre daha yüksek nominal voltaj ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.5. Lityum İyon Polimer (LiPo) Piller

Li-ion pillerle hemen hemen aynı özelliklere sahiptirler. Aralarındaki tek fark Li-ion polimer pillerde elektrolit olarak polimer materyalinin kullanılmasıdır. Polimer elektrolit materyalin elektriksel iletkenliği diğer organik sıvı elektrolitlere göre daha yüksektir. Ayrıca bu materyalin kullanımı lityum polimer pillerinin daha kolay, daha hızlı ve farklı şekillerde üretilmelerine olanak sağlamaktadır (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.6. Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) Piller

Pozitif elektrot malzemesi lityum demir fosfat olan lityum tabanlı pillerdir. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim oranı ve daha güvenilir kullanım gibi avantajlara sahiptir. Ancak Li-ion pillerle karşılaştırıldığında performansı daha düşüktür (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.7. Lityum Sülfür (Li-S) Piller

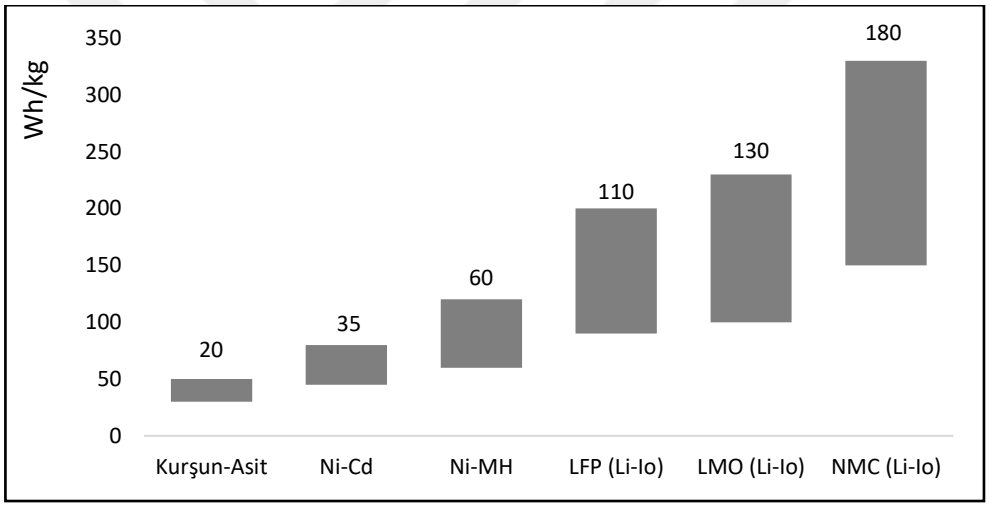
Lityum tabanlı pil gruplarından katot malzemesi olarak sülfür kullanılan pillerdir. Yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek şarj verimine, düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrüne sahip pillerdir (Muratoğlu, 2017).

2.1.4.8. Lityum İyon Pil Teknolojisi

Lityum-İyon temelli bataryalar yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleriyle özellikle elektrikli taşıtlarda diğer batarya tiplerine nazaran yoğunlukla tercih edilen batarya çeşitleridir (Ceylan ve diğ., 2013).

Lityum-iyon bataryalar, yaklaşık 120 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 1000 çevrimlik derin deşarj döngüsüne sahiptir. Bu bataryalar, %80 şarj seviyesine bir saatten kısa sürede ulaşabilmektedir.

Yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle, günümüzde elektrikli taşıt uygulamaları için en uygun potansiyele sahip bataryalar olarak değerlendirilmektedirler. Önümüzdeki 15-20 yıl içinde, lityum-iyon bataryaların maliyetlerinin düşürülerek elektrikli taşıtlarda ekonomik olarak kullanılabilir hale geleceği öngörülmektedir. Hibrit elektrikli taşıt uygulamalarında, bataryaların yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve uzun ömür sunması beklenmektedir. Özgül enerji yoğunluğu, enerji kaynağının birim kütlesinde depolanan enerji miktarını ifade ederken, özgül güç ise enerji kaynağının birim kütlesinin sağladığı gücü ifade etmektedir (Avgın ve diğ., 2014).



Şekil 2.6. Batarya tiplerinin enerji yoğunlukları karşılaştırması

Lityum-İyon akülerde depolama esnasında kolaylıkla enerji kaybı yaşanmaz. Nikel-Kadminyum ve Nikel-Metal Hibrit akülerden farklı olarak tamamen deşarj olmasa dahi tekrar şarj edilmesi kapasite kaybına yol açmaz. Üretildiği içerik bakımından çevreye daha az zarar veren maddelerden oluşur.

Diğer akülere kıyasla daha fazla maliyete sahiptir. Bunun nedeni ise akünün içeriğini oluşturan lityumun daha düşük atomik ağırlıkta olması ve daha fazla negatif potansiyele sahip olmasıdır. Lityumun bu özelliği sayesinde de elektrikli taşıtların ihtiyacı olan yüksek performans da elde edilmektedir. Lityum-İon aküler diğer akülere göre çok daha kısa sürede şarj ve deşarj olur. Ayrıca Nikel-Metal Hidrit aküye göre % 40 oranında daha

az yer kaplar. Bu iki özelliği sayesinde elektrikli ve hibrit taşıtlarda, yüksek tork gücü gerektiren taşıtlarda bu akü türü kullanılır (URL-7). Şekil 2.6'da pil tiplerinin enerji yoğunlukları gösterilmiştir.

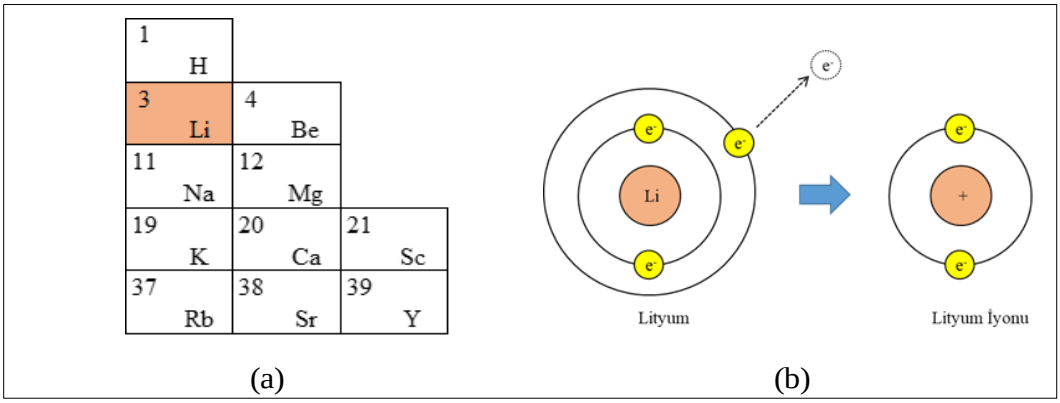
Avantajları arasında; kapalı hücre, bakım gerektirmemesi, uzun ömürlü, geniş çalışma sıcaklık aralığı, uzun raf ömrü, çabuk şarj olabilme kabiliyeti, yüksek güçlü deşarj kapasitesi, yüksek enerji verimi, yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu, hafıza etkisinin olmayışı sayılabilirken dezavantajları olarak; fiyatının fazla oluşu, yüksek sıcaklıklarda bozunması, koruyucu devre ihtiyacının oluşu, aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozunma gibi özellikleri en en çıkanlarıdır (Linden ve Reddy, 2002).

1970 yılında lityum metalinin enerji uygulamalarında kullanımına ait avantajlar farkedildikten sonra 1972'de Exxon ilk defa TiS_2 yapısında katot üreterek (lityum metali anot olarak kullanıldı) lityum pilini üretmiştir.

1980'de katmanlı yapıdaki sülfür içeren katot malzemelerinin uzun çevrimler boyunca kararlı kalmadığı keşfedilmiş, Goodenough ve arkadaşları alternatif malzeme olarak metal oksitlerin katot olarak kullanılmasını önermişlerdir. 1991 yılında ilk defa Sony bu görüşü geliştirerek ilk ticari Li-ion pili üretmiştir. $LiCoO_2$ 'in katot, karbonun anot olarak kullanıldığı bu hücrelerde 3,6 V üstünde potansiyel elde edilmiş, uzun çevrimler boyunca kararlılık gösteren Li-ion pillerin üretilmesi başarılmıştır.

Daha sonraki yıllarda pil teknolojisinde rekabet hızla artmış ve özellikle pillerin çevrim ömürleri (şarj-deşarj çevrimi), spesifik enerjileri, hacimsel enerji yoğunlukları, güvenlikleri ve yüksek sıcaklıklarda kararlı yapıları üzerinde gerçekleştirilen geliştirme çabaları hız kazanmıştır (Yoshio ve diğ., 2009).

John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham ve Akira Yoshino, 2019 Nobel Ödülü'nü Lityum elementi üzerine yaptıkları çalışmalarınından dolayı almışlardır. Lityum elementi alkali metalleri içeren periyodik tablonun 1A grubunda yer alan hidrojen, helyumdan sonra üçüncü en küçük atom olduğunu bilinmektedir. Şekil 2.7 (a)'da gösterilmiştir (URL-8).



Şekil 2.7. Lityum elementinin (a) periyodik tablodaki yeri, (b) lityum iyonu

1A grubu elementlerin özelliği, Şekil 2.7 (b)'de gösterildiği gibi elektronlarını serbest bırakma ve pozitif yüklenme eğilimleridir (URL-8). 1A grubu ametalleri karşılaştırıldığında Tablo 2.2'de görüldüğü üzere enerji yoğunluğunun en fazla olduğu element lityumdur (Uyumaz, 2023).

Tablo 2.2. Alkali metallerin oksidasyon enerjileri

Alkali Metal	E^0 oksidasyon (V)	ΔG^0 (kJ/mol)
$Li \rightarrow Li^+ + e^-$	3,04	293,3
$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	2,71	261,5
$K \rightarrow K^+ + e^-$	2,93	282,7
$Rb \rightarrow Rb^+ + e^-$	2,98	287,5
$Cs \rightarrow Cs^+ + e^-$	3,03	292
$Fr \rightarrow Fr^+ + e^-$	2,9	279

Bu özelliklerin dışında piller için en uygun element lityumdur. Tüm metal elementler arasında en önemli elektrokimyasal potansiyele ve ağırlık başına daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Periodik cetvelde yer alan, 0,53 g/cm^3 yoğunluğa sahip en hafif üçüncü element olması ve aynı zmanda da düşük standart indirgeme potansiyeline (-3,05V) sahip bir element olmasından ötürü yüksek hücre potansiyeline sahip pil malzemeleridir (Ekici, 2022).

Yüksek enerji yoğunlukları, pil biriminin kütlesi başına güç, yüksek gerilim, uzun çevrim ömürleri ve hafıza etkisinin olmaması nedeniyle Li-ion tipi piller öncelikle EV'de tercih edilmektedir. Son zamanlarda yapılan araştırmalar, pil ağırlıklarını ve boyutlarını rekabetçi fiyatlarla azaltmaya odaklanmıştır. Li-ion piller için en büyük pazar EV'dir (Iclodean ve diğ., 2017).

Avantajları ve en önemli pazarı elinde tutma sebepleri; orta düzeyde enerji tüketimidir (14,7 kWh/100 km). Bu özellikler, Li-ion pilleri bu alanda makul bir seçim haline getirmektedir. Ancak diğer yandan enerji performanslarını ve yaşam döngülerini olumsuz etkileyebilecek yüksek çalışma sıcaklıkları gibi bazı dezavantajları, yangın ve taşıt patlaması gibi güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir (Iclodean ve diğ., 2017).

Ana riskler, kısa vadede ısıyı artıran zincirleme kimyasal reaksiyondan kaynaklanan yangın ve patlamadır. Bu duruma Termal Kaçak denir. Termal kaçışın nedeni esas olarak aktif materyallerin ve elektrolitlerin ayrışmasıdır. Bu ayrışma zincirleme reaksiyon, yangın ve patlama ile sonuçlanır. Pilin termal kararsızlığı nedeniyle aşırı koşullar yangın ve patlama riskini tetikler (Guo ve diğ., 2018).

Li-ion pillerin enerji yoğunluğu 110-160 Wh/kg arasındadır. Son yıllarda birçok araştırmacı, güvenlik limitleri dahilinde enerji yoğunluklarını artırmak için kimyasal yapıyı iyileştirmek için çalışmaktadır (Solmaz ve Kocakulak, 2020).

Li-ion pillerin yangın güvenliği endişesi, günlük hayatımızda artan kullanımları nedeniyle daha da önem kazanmaktadır. Li-ion pillerin günlük hayatımızda kullanım alanlarının genişletilmesi ancak özgül & hacimsel enerji yoğunluklarının geliştirilmesi ile mümkündür. Anot ve katot malzeme çeşitliliğine göre 4 fiziksel şekilde olabilen altı ana pil tipi vardır.

2.1.5. Lityum İyon Batarya Türleri

Katot aktif malzemesine göre çeşitlenen altı tip batarya mevcuttur. Bunlar bu aktif maddenin kimyasal sembolünün baş harfleri kullanılarak isimlendirilirler (URL-9).

2.1.5.1. Lityum Demir Fosfat (LFP)

$LiFePO_4$ tipi piller 1996 yılında Teksas Üniversitesinde bulunmuştur. Bu pillerin elektrokimyasal potansiyelleri yüksek olup düşük direnç gösterirler. Yüksek akım verebilme potansiyeline sahiptir. Yaşam döngüsü nispeten uzundur. Sıcaklık dengesi iyi olan güvenli bir bataryadır. İçeriğindeki fosfat elementi sayesinde elektrot fazla şarj durumunda daha kararlı halde olurlar. Çalışma sıcaklık aralığı oldukça geniştir. Bu tür piller diğer lityum pillere göre daha fazla kendiliğinden deşarj oranına sahiptir ancak

gelişmiş batarya paketleri ve üst düzey kontrol elektroniği (BMS) sayesinde iyileştirilmektedir. Bu pillerin bir başka olumsuz özelliği de nem yaşam sürelerinin azaltmaktadır (Bostan, 2019).

Bu pillerin katot malzemesi fosfattır ve anot malzemesi grafit-karbondur ve yüksek bir yaşam döngüsüne sahiptir. Termal kararlılığı ve elektrokimyasal performansları nispeten iyidir. Bu sebeple de yüksek güç gerektiren uygulamalar için daha uygundurlar. Dayanıklılık, uzun kullanım ömrü ve yüksek güvenlik diğer avantajlardır. Yaşam döngüleri 2000 döngüden fazladır. Ancak, deşarj oranı etkisi pil ömrünü azaltır. Malzemelerin direncinin düşük olması nedeniyle sağlam ve güvenli pillerdir. Termal kaçak başlangıç noktası 270 ℃ civarındadır, bu da % 100 şarj seviyesinde olsalar bile LFP pilleri en güvenli tip yapar.

Bazı dezavantajlar; özgül enerji daha küçüktür ve düşük sıcaklıklar lityum kaplamaya ve kısa devrelere neden olabilir (URL-9).

2.1.5.2. Lityum Kobalt Oksit (LCO)

$LiCoO_2$ piller ticari olarak 1991 yılında Sony firması tarafından geliştirilmiştir. Enerji yoğunluklarının yüksek oluşu sebebiyle cep telefonları, laptoplar ve dijital kameralarda kullanılır. Pilin katot elektrodunda kobalt oksit, anot elektrodunda ise grafit kullanılmaktadır.

Katot elektrodu katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu pil türü diğer lityum tabanlı pillere kıyasla kısa kullanım süresine sahiptir. Düşük sıcaklık dengesine sahiptir. Geliştirilen nikel, manganez ve alüminyum bazlı piller ile yaşam süresi arttırılmıştır. Kobalt elementi doğada az bulunur olduğundan pahalıdır. Bu sebeple de elektrikli taşıtlarda fazlaca kullanılmaz (Bostan, 2019).

Güvenlik sorunları ve yüksek malzeme maliyeti (kobalt) nedeniyle, bu tip piller gelecekte diğer türlerle değiştirilecektir. Bu pillerin en önemli avantajı, bu gücü uzun bir süre boyunca ancak düşük bir yük ile sağlayan yüksek özgül enerjileridir ve bu da birçok uygulamada kullanımlarını sınırlamaktadır. Öte yandan, daha kısa bir ömür (500-1000 devir) ve küçük özgül enerji popülerliğini azaltmaktadır. Güvenlik endişeleri yaratan termal dengesizlik, bu pillerin bir başka dezavantajıdır (URL-9).

2.1.5.3. Lityum Manganez Oksit (LMO)

$LiMn_2O_4$ tipi piller 1980'lerde bulunmuş olup ticari olarak 1995'lerde yaygınlaşmıştır. Bu tür pillerin üç boyutlu bir omurga yapısı vardır. Söz konusu bu yapı sayesinde iyonlar elektrotlardan daha kolay bir şekilde geçiş yapar. Bu sayede pil daha düşük bir iç dirence sahiptir. Bunun etkisi iç direncin düşük olmasına ve hızlı şarj ile yüksek akımlarda deşarj yapılmasını sağlar (Bostan, 2019).

Bu piller, tıbbi ekipmanlarda, elektrikli el aletlerinde, ve elektrikli taşıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca avantajları; yüksek şarj hızı ve yüksek özgül güç sayılabilmektedir. LCO pillerle karşılaştırıldığında daha iyi bir termal kararlılığa ve daha fazla akım sağlamasıdır (Bostan, 2019).

Bu, çalışma aralıklarının LCO akülerinden daha yüksek olabileceği anlamına gelir, bu da bu aküleri yüksek yüklü uygulamalar için uygun tip yapar. Dezavantajı kısa ömürlü olmasıdır. Diğer Li-ion tiplerinden daha az, yaklaşık 300-700 devirdir (URL-9). Lityum manganez piller, lityum manganez kobalt oksit bataryalarla birleştirilerek elektrikli taşıtlar için kullanılabilir. LMO ve NMC kimyasının birlikte kullanıldığı birçok taşıt vardır (Bostan, 2019).

2.1.5.4. Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC)

Bu pillerde katot malzemesi olarak başlıca üç element (nikel, manganez, kobalt) kullanılmaktadır. Nikelin özgül enerjisi yüksektir, ancak kararlı değildir ve manganez kararlıdır, ancak özgül enerjisi düşüktür. Kararlı ve yüksek özgül enerji gereksinimleri yaratmak için en iyi nikel-mangan karışımını bulan bir birleştirme problemidir (URL-9).

$LiNiMnCoO_2$ tip piller yüksek akım verebilir veya çekilebilir. Anot kısmına grafit yerine silikon eklenerek batarya kapasitesi arttırılabilir ancak bu artış bataryanın kullanım ömrünü düşürür. NMC bataryaların başarısı nikel ve manganezin birleşiminden gelmektedir. Nikel yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir element olması, manganez elementinin ise sahip olduğu omurgasal yapı nedeniyle düşük iç dirence sahip olması bunu sağlamaktadır. Bu iki element bir araya gelerek düşük iç dirençli ve yüksek enerji yoğunluğu olan bir yapı oluşturmaktadır. Bu piller yüksek enerji yoğunluğuna ve uzun ömüre sahip olduğundan elektrikli bisikletlerde ve diğer elektrikli mobilite çözümlerinde

yoğun olarak kullanılmaktadır. Pil üreticileri kobalt katot malzemesi yerine nikel yapılı katot geliştirmeye başlamışlardır. Bu durum kobalta göre daha az maliyet ile çözüm sunmaktadır (Bostan, 2019).

2.1.5.5. Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA)

$LiNiCoAlO_2$ tipi piller 1999 yılından bu yana kullanılmaktadır. Özellikleri bakımından NMC ye çok benzemektedir. Ömür uzunluğu ve enerji yoğunluğunun yüksek olan bir pil çeşididir ve son yıllarda kullanımı artma potansiyeline sahiptir.

Bu sebeple de elektrikli taşıtlar için popüler pil türü olarak kullanılmaktadır (Bostan, 2019). Bu pillerin dezavantajı ise; diğer pillere kıyasla nispeten pahalı ve güvensiz olmasıdır (URL-9).

2.1.5.6. Lityum Titanat (LTO)

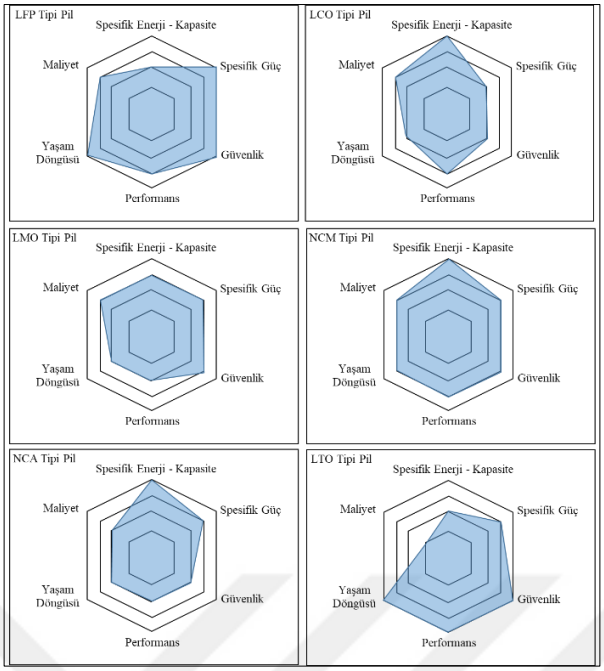
Li_2TiO_3 tipi piller 1980 li yıllarda kullanıma başlamıştır. Diğer pil gruplarından farklı olarak anot aktif maddesi olan grafit yerine lityum titanat kullanılmaktadır.

Katot maddesi ise LMO ya da NMC olabilmektedir. En güvenli Li-ion pil türü olduğu bilinmektedir. Uzun ömürlü olmaları, düşük enerji yoğunluğuna sahip olmaları temel özellikleridir, bunun yanında pahalıdırlar (Bostan, 2019).

Bu pil, diğer Li-ion pillere göre daha kısa şarj süresi gereksinimine sahiptir. Daha önce bahsedilen tüm piller, katot malzemeleriyle adlandırılmıştır. Elektrikli taşıtların şarj istasyonları, temiz enerji güç depoları, bazı havacılık ve askeri uygulamalar bu tipin en yaygın kullanım alanlarıdır.

Avantajları, yaygın olarak kullanılmalarının nedenidir: hızlı şarj yeteneği, daha geniş çalışma sıcaklıkları ve uzun ömür. Termal kararlılıkları nedeniyle en güvenli pillerden biridir; ancak bazı dezavantajları vardır.

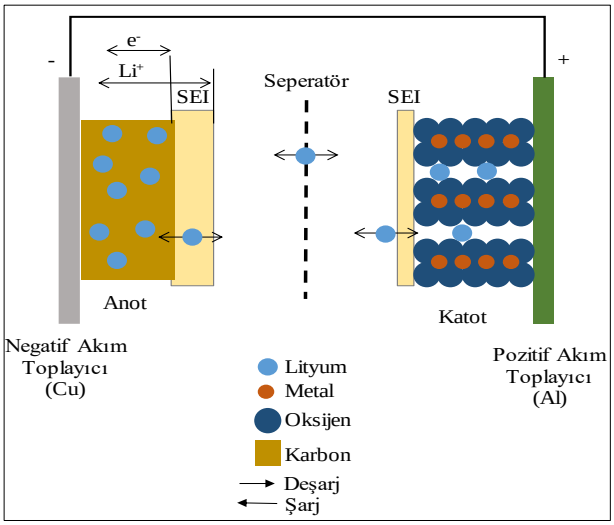
En kritik dezavantaj ise; Düşük enerji yoğunluğu. Pilin diğerlerinden daha az enerji depolamasının ve nispeten pahalı olmasının nedeni budur (URL-9). Li-ion pillerin özellik karşılaştırması Şekil 2.8'de verilmiştir (Miao ve diğ., 2019).



Şekil 2.8. Li-ion pillerin karşılaştırması

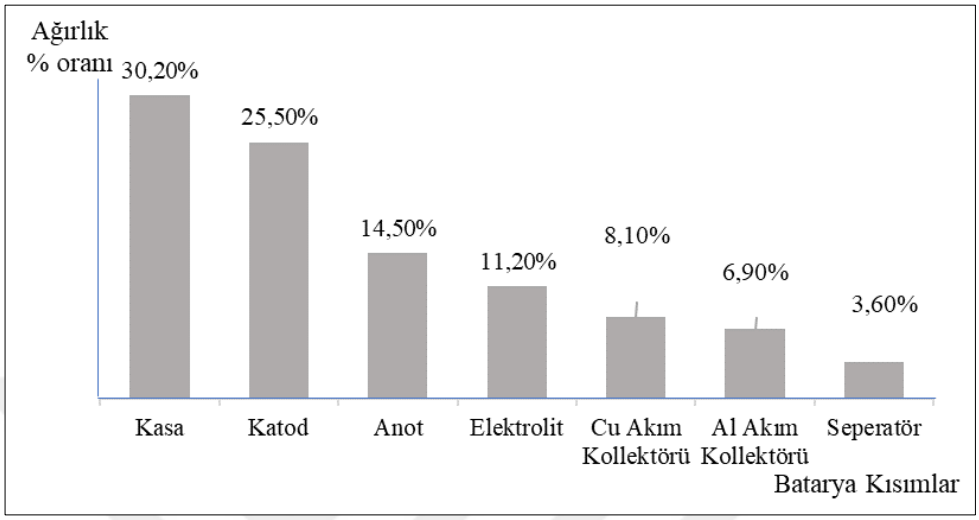
2.1.6. Lityum İyon Batarya Çalışma Prensibi ve Yapı Birimleri

Negatif elektrotlar (anot) esas olarak mikro geçitli bir gövdeye sahip bir karbon malzemedir. Lityum pozitif elektrottur (katot). Deşarj sırasında (pil kullanılırken elektrik akımı oluşumu), iyon iyonları anottan (grafit) katoda geçer ve bu elektronlar elektrik üretir. Şarj işlemi sırasında, iyonlar zıt yönde hareket eder. Li-ion pilin çalışma prensibi Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Guo ve diğ., 2018).



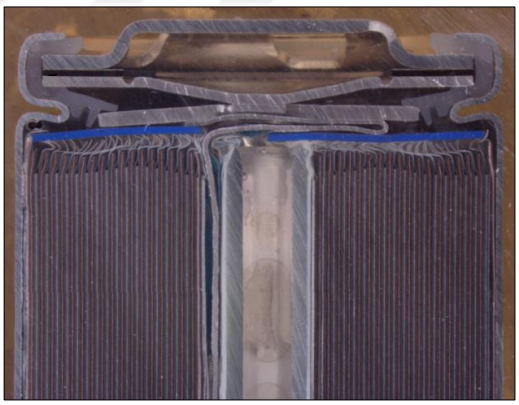
Şekil 2.9. Li-ion pil çalışma diagramı

Li-ion bataryaların kollektörleri ağırlık olarak bataryanın % 15'ini oluşturmaktadır. Bu durum bataryanın enerji yoğunluğuna etki etmektedir. Şekil 2.10'da bataryayı oluşturan parçaların nispi ağırlık oranları verilmiştir (Zhu ve diğ., 2021).



Şekil 2.10. Bataryayı oluşturan kısımların ağırlık oranları

Kesit alınmış silindirik yapıaki bir Li-ion 18650 ölçüsündeki pil aşağıda Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Silindirik 18650 Li-ion pil kesiti

2.1.6.1. Anot

Anot, bir pilin temel iki elektrotundan biridir ve elektrokimyasal reaksiyon sırasında elektron kaybetmektedir. Hücre içinde oksidasyon reaksiyonu ile elektrolitin içindeki negatif iyonlara elektron kazandırır. Elektronların anottan bu hareketi ile onu pozitif yüklenmesine sebep olarak elektrotlar arasında bir potansiyel farkı oluşur (Kaba, 2023).

Anot, malzemelerin enerji depolama yoğunluğu olarak bataryanın çok önemli bir parçasıdır (Rahman, 2021). 1970'li yıllarda anot aktif maddesi olarak lityum metali kullanılmıştır. Lityum elementinin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması avantajına rağmen su ile ekzotermik reaksiyona girmekte ve bunun sonucunda hızlı ısınması sorununu beraberinde getirmiştir. Bununla birlikte, bu anotlarda şarj-deşarj sırasında değişen lityum morfolojisi nedeniyle elektrot yüzeylerinde oluşan ve kısa devrelere sebep olabilecek dendritler zamanla pillerde güvenlik sorunları meydana getirmiştir (Ekici, 2022).

Bu sorun daha güvenli bir anot maddesi olan karbonun kullanımını sağlamıştır. Karbonun bir takım dezavantajları nedeniyle alternatif maddelere yönelimi gerektirmiştir (Örnek, 2013).

Karbon, yapısının düşük elektrokimyasal özelliği, çevrimsel kararlılığının, elektrik ve termal iletkenliklerinin yüksek olması, kolay ve bol miktarda düşük maliyetle erişimleri sebeplerinden ötürü yaygın kullanılan katod malzemesidir (Ekici, 2022).

Kullanılmakta olan en yaygın negatif elektrot aktif maddesi 372 mAh/g teorik kapasitesi ile grafittir, diğer grafit çeşitleri olarak; doğal grafit, mezokarbon mikroboncuk (mesocarbon microbeads, MCMB) veya mezokarbon lif (mesocarbon fiber, MCF) anot malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Kullanılan maddelerden doğal grafitin yüzey alanının sınırlı olmasından dolayı şarj ve deşarj esnasında Li+ transferine karşı direnç göstermektedir. MCMB ve MCF ise geniş yüzey alanına sahip olması ve MCF'nin % 10'a kadar olan hacim genişlemelerine karşı dayanıklı olmasının uzun çevrim ömrüne etki ettiği ortaya konulmaktadır (Aydın, 2011)

372 mAh/g teorik kapasitesine sahip grafitin yetersiz kalmasıyla daha yüksek depolama kapasitesi elde edebilmek için Li+ ile alaşım oluşturabilen ve teorik kapasitesi grafitten daha yüksek, yeni metalik bazlı (LixM) anot malzemesi geliştirilmiştir. Sn, Al, Sb, Ge, Mg, Si, Pb gibi pek çok element ile yapılan anot alternatif maddeleri mevcuttur (Bilici, 2017).

Li-ion piller için belli başlı anot malzemelerinin elektrokimyasal karşılaştırması Tablo 2.3'te verilmiştir (Uyumaz, 2023).

Tablo 2.3. Li-ion piller için kullanılan anot malzemeleri

Materyal	Voltaj aralığı ve lityum, V	Teorik özgül kapasite, Ah/g
Li metal	0,0	3,86
LiAl	0,3	0,8
$Li_{0,5}C_6$	0,0 – 1,3	0,185
LiC_6	0,0 – 0,1	0,372
$LiWO_2$	0,3 – 1,4	0,12
$LiMoO_2$	0,8 – 1,4	0,199
LiTiS0.0	1,5 – 2,7	0,266

Anot malzemeleri, pilin kapasitesini ve termal kararlılığını iyileştirmek için incelenmektedir. Anot yüzeyi lityum dendritlere karşı hassastır. Bu dendritlerin anot üzerinde genişlemesine ve kararsız SEI (katı elektrolit tabakası) filmi oluşturmasına neden olacak önemli miktarda ısı oluşturabilmektedir. Bu da, termal kaçak mekanizması ile sonuçlanmaktadır (Song ve diğ., 2022).

Karbonat bazlı sulu tip olmayan elektrolit içeren yeni bir Li-ion pilin ilk şarj işlemi esnasında SEI 0,6 – 1,3 V aralığında anot elektrdodu tarafında oluşum gösterir (Barré ve diğ., 2013; Xu ve diğ., 2004).

Konvansiyonel SEI kararlı inorganik kompanentlerden (LiF, Li_2O ve Li_2CO_3 gibi) ve bazı yarı kararlı organik kompanentlerden (polimerler, $ROCO_2Li$, $(CH_2OCO_2Li)_2$ ve ROLi) meydana gelmektedir (Zhao ve diğ., 2006).

Lityum iyonları 0,065–0,2 V değer aralığında fazla şarj ile grafit içine girer. Pontansiyelin 0 V altında kaldığı durumda lityum iyonları grafit yüzeyinde birikim göstererek anot yüzeyinde seperatörü delebilecek ve bu yüzden de kısa devre oluşumuyla birlikte ısı üretimine sebep olabilecek lityum dentritleri oluşturabilir (Waldmann ve diğ., 2018).

Genel olarak, SEI filmi nispeten kararlıdır ve grafit ile reaksiyona girmek için Li+ geçirebilir. Bununla birlikte, çalışma sırasında, aşırı akımlar, aşırı şarj, dahili/harici kısa devre veya yüksek sıcaklık gibi bazı kötüye kullanım koşulları altında, Li-ion ısı üreterek tutuşacaktır. Bazı araştırmalar SEI filmlerinin 69 °C, gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta ayrışabileceğini (Wang ve diğ., 2006) ve stabil organik bileşenlerin 90 °C - 120 °C'de Denklem 2.1 ve 2.2'de gösterildiği şekilde ekzotermik olarak karbondioksit ve etilen gibi bazı gazlara ayrışabileceğini göstermektedir (Aurbach ve diğ., 1997);

$$(CH_2OCO_2Li)_2 \rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4 + CO_2 + 0{,}5O_2 \quad (2.1)$$

$$2Li + (CH_2OCO_2Li)_2 \rightarrow 2Li_2CO_3 + C_2H_4 \quad (2.2)$$

Şekilde de görüldüğü üzere SEI filmi çökmekte, lityum biriken grafit anot exotermik olarak elektrolit ile reaksiyona geçmekte bu durum da sıcaklığın daha da yükselmesine sebep olmaktadır.

Araya giren lityum elektrolitlere maruz kalırsa, yaklaşık 100 °C'de Denklem 2.3, 2.4 ve 2.5'de gösterildiği şekilde karbonat bazlı organik çözücülerle reaksiyona girebilir (Maleki ve diğ., 1999; Spotnitz ve Franklin, 2003);

$$2Li + C_3H_4O_3(EC) \rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4 \quad (2.3)$$

$$2Li + C_4H_6O_3(PC) \rightarrow Li_2CO_3 + C_3H_6 \quad (2.4)$$

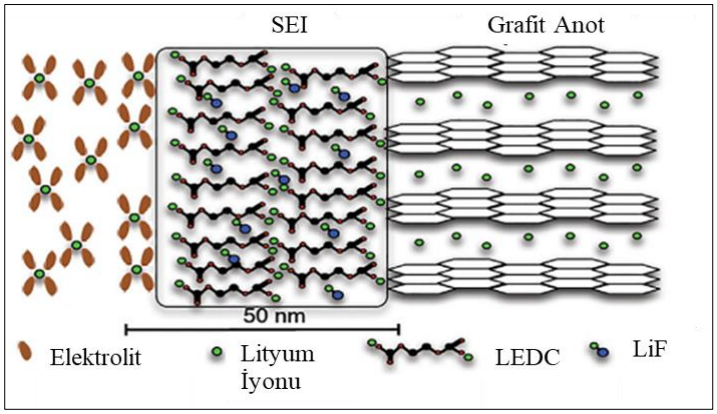
$$2Li + C_3H_6O_3(DMC) \rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4 + H_2 \quad (2.5)$$

Etan ve metan gibi bilinen hidrokarbon gazlarının hücre içinde salınımı bir basınç artışına sebep olacaktır. Bununla birlikte katod un oksijen salınımı ve sıcaklığın uygun koşulları sağlaması halinde yanacaklardır ki bu da Li-ion piller için büyük bir tehlikedir.

Her şeyden önce, grafit ile elektrolit arayüzündeki yan reaksiyonların yanı sıra lityum biriken grafit ve SEI'lerin zayıf termal kararlılığı, anotların güvenlik sorunlarının ana kaynakları olarak kabul edilmiştir.

Li-ion pilin ilk şarj döngüleri esnasında lityum iyonları, pilin şarj işlemi ile birlikte elektrolit bileşenlerinden organik çözücüler vasıtasıyla grafit yapıdaki anot üzerinde bir katı-elektrolit arayüz (SEI) oluşmaktadır (Pinson ve diğ., 2012). SEI, anot yüzeyinde daha fazla elektrolit ayrışmasını engelleyen ve birçok uygulama için gerekli olan uzun çevrim ömrünü sağlayan bir pasivasyon katmanı sağlar (Heiskanen ve diğ., 2019).

Bu tabaka pilin stabilizasyondan sorumludur (Spotte-Smith ve diğ., 2022). SEI tabakası, anot yüzeyinde oluşan 50 nm kalınlığında ince bir tabaka olması yanında elektrolit ve diğer pil bileşenlerini istenmeyen çeşitli reaksiyonlardan korumaktadır (Heiskanen ve diğ., 2019). SEI tabakası Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. SEI tabakasının anot tarafında oluşumu

Li-ion pillerin kapasite düşüşünün en yaygın nedeni SEI oluşumundan kaynaklanan Lityum iyonlarının tersinmez kaybıdır (Pinson ve diğ., 2012). SEI tabakası anodik direncin katodik dirençten yüksek olmasının nedenidir (Moralı ve Erol, 2020).

SEI ilk şarj döngüleri sırasında elektrolitin azalması ve ayrışması sonucunda kendiliğinden birikir. Uygun şekilde oluştuğunda SEI, elektrolitin daha fazla bozulmasını önlerken seçici metal iyonu geçişine izin vererek yüksek Coulombic verimliliğine ve uzun kullanım ömrüne sahip pil oluşumunu sağlar. SEI oluşumu geciktiğinde veya oluşmadığında, indirgeme süreci devam ederek elektrolitin hızla tüketilmesine yol açmaktadır (Spotte-Smith ve diğ., 2022).

Lityum-iyon piller için standart elektrolitler olarak etilen karbonat (EC) ve dialkil karbonatları içeren bir organik karbonat çözücüleri karışımı içinde $LiPF_6$'dan oluşur (Heiskanen ve diğ., 2019).

SEI'nin bileşimi sıklıkla "karmaşık" olarak adlandırılır. Buna ek olarak, SEI'nin yapısının uzun süreli döngüde değiştiği ve daha fazla inorganik tür içeriğine sahip bir SEI tabakası oluşumu ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, SEI evriminin mekanizması anlaşılamamıştır (Heiskanen ve diğ., 2019).

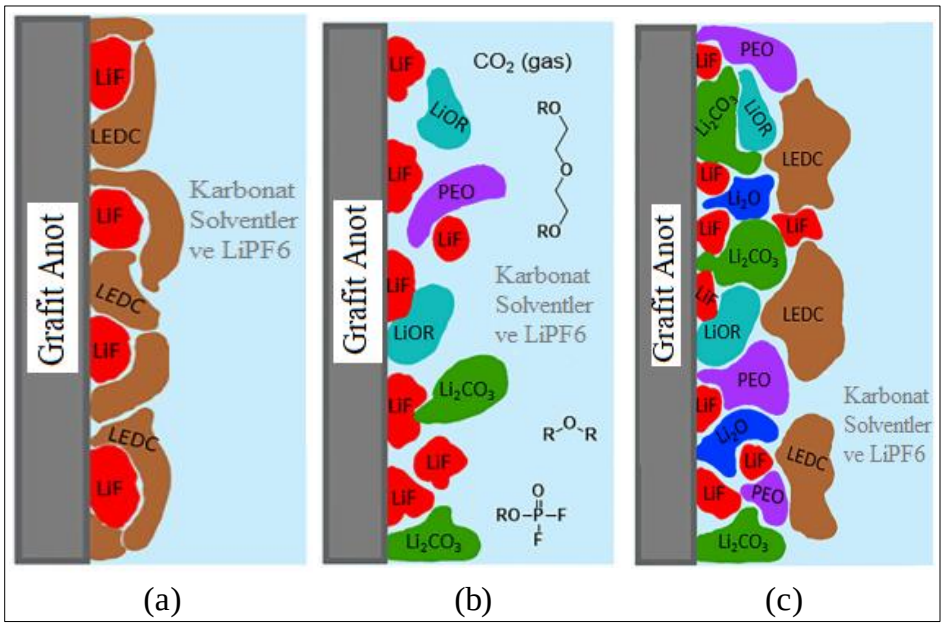
SEI'nin ilk oluşum bileşikleri, elektrolitinden sırasıyla EC, $LiPF_6$, LEDC, LiF'in indirgenme ürünleri hakimdir. Bununla birlikte, SEI'nin karmaşıklığı LEDC'nin çok karmaşık bir bileşen karışımına daha fazla ayrışma reaksiyonlarının sonucudur (Heiskanen ve diğ., 2019).

Bu ayrışmalar, elektrolitte çözünmeyen, elektrolitte çözünen veya gaz halinde olan bileşiklerin oluşmasıyla sonuçlanır. Çözünmeyen bileşenler arasında lityum alkoksitler, lityum florofosfatlar, polietilen oksitler, lityum karboksilatlar, Li_2CO_3, Li_2O ve LiF bulunmaktadır. Çözünebilir bileşenler olarak eterler, oligoetilen oksitler ve florofosfatlar bulunmaktadır. Gaz halindeki bileşikler olarak CO_2 ve etilen bulunmaktadır (Heiskanen ve diğ., 2019).

Gözlemlenen termal ayrışma reaksiyonlarının bazıları yüksek sıcaklıklarda (>200 ℃) gerçekleşirken, şarj ve deşarj sırasında SEI boyunca lityum-iyon taşınımının direnci önemli ölçüde lokal ısınmaya yol açabilir veya geçiş metallerinin varlığı bazı termal ayrışma reaksiyonlarını katalize edebilir (Heiskanen ve diğ., 2019).

Bu ayrışma reaksiyonlarının çoğunun elektrolit içindeki düşük konsantrasyonlu asidik bileşenler (HF, PF_5, vb.) tarafından katalize edilebileceğini belirtmek önemlidir (Heiskanen ve diğ., 2019).

İlk SEI bileşenlerinin gözlemlenen ayrışma reaksiyonları, yaşlanma üzerine SEI bileşiminde gözlemlenen değişikliklerle birleştiğinde SEI'nin evrimi için aşağıda Şekil 2.13'de verilen mekanizmaya yol açtığı belirtilmiştir (Heiskanen ve diğ., 2019).



Şekil 2.13. Anot üzerinde SEI oluşum basamakları (a) ilk indirgeme, LEDC ve LiF oluşumu, (b) gözenekli SEI büyümesi, (c) SEI kalınlaşması ve yüzeyde inorganik madde birikimi

İlk indirgeme LEDC ve LiF üretmektedir, Şekil 2.13 (a). Yaşlanma nedenli LEDC'nin stabil olmaması dekompozisyon ve çözünüme sebep olarak gözenekli SEI büyümesine neden olur, bu durum Şekil 2.13 (b)'de gösterilmiştir.

Devam eden çevrimler Şekil 2.13 (c)'de gösterildiği üzere daha fazla EC indirgenmesine, SEI'nin kalınlaşmasına ve stabil halde daha fazla inorganik maddenin yüzeye birikmesine sebep olur. Bununla birlikte, LEDC kararsızdır ve yukarıda açıklandığı gibi karmaşık bir ürün karışımı oluşturmak üzere ayrışır. Bu bileşenlerden bazıları elektrolit veya gazlarda çözünebildiğinden kalan çözünmeyen SEI daha gözenekli hale gelir. Kalan çözünmeyen bileşenler ağırlıklı olarak inorganiktir, bunlardan bazıları LiF, Li_2CO_3 ve Li_2O bileşikleridir (Heiskanen ve diğ., 2019).

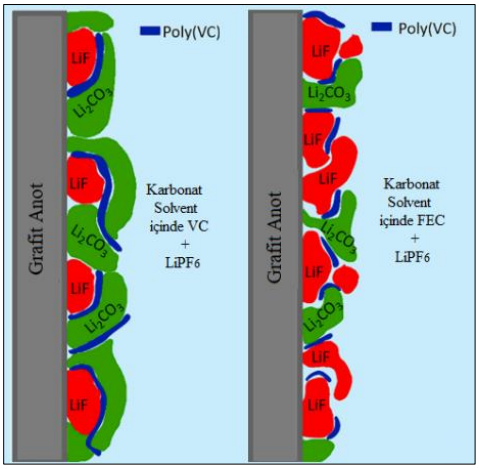
Kalan çözünmeyen bileşenler içteki daha inorganik SEI haline gelir. Aynı zamanda, SEI daha gözenekli hale geldiğinden, elektrolit grafit elektrotun yüzeyine ulaşabilir ve bu da LEDC ve LiF oluşturmak için elektrolitin daha fazla indirgenmesine neden olur. Anotta tekrarlanan ayrışma ve indirgeme reaksiyonları dış SEI'nin kalınlaşmasına neden olur. Yapılan araştırmalar SEI kalınlaşmasıyla ilişkili kapasite kaybı ve empedans büyümesinin döngü sayısıyla azaldığını öne sürmüştür.

Bu çalışmada önerilen model bu araştırmalarla uyumludur, çünkü zaman içinde iç SEI üzerinde LiF ve Li_2O gibi kararlı bileşenlerin oluşumu LEDC ayrışması azalacaktır (Heiskanen ve diğ., 2019).

SEI yapısındaki farklılıklar Şekil 2.14'de gösterildiği üzere VC'nin indirgenmesi, LEDC konsantrasyonunda azalmaya ve anot SEI'deki Li_2CO_3 konsantrasyonunda artışa neden olur. FEC'in tercihli olarak azaltılması aynı zamanda SEI'deki LEDC konsantrasyonunun azalmasına ve Li_2CO_3 konsantrasyonunun artmasına neden olur. Bununla birlikte, LiF oluşturmak için FEC'in indirgenmesinden daha yüksek LiF konsantrasyonları da gözlenmektedir (Heiskanen ve diğ., 2019).

2.1.6.2. Katot

Bir Li-ion pilin kimyasal potansiyeli pilin voltajını ve lityum iyonu miktarı ise şarj kapasitesini belirlediği, pilin katot maddesinin kimyasal ve mekanik kararlılığı artması ise döngü sayısını arttırdığı bilinmektedir (Şahan, 2009).



Şekil 2.14. Anot üzerinde VC'nin indirgenmesi

John B. Goodenough, kimya alanında yapmış olduğu çalışmalardan 2019 yılında Nobel kimya ödülünü almıştır. Söz konusu çalışmasında, Li-ion pillerin $LiCoO_2$ katot malzemesini ticari olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Söz konusu çalışmasında $LiCoO_2$ katod maddesinin teorik kapasitesi arttırmayı amaçlamıştır (Güney, 2023). Günümüzde $LiCoO_2$, sentezinin kolaylığı, uzun döngü ömrüne sahip olması ve kapasitesinin 140 mAh/g değerine ulaşabilmesi nedenleriyle Li-ion pillerde en çok kullanılan maddedir. Bunun yanında birtakım dezavantajları da beraberinde taşımaktadır, bunların başlıcaları; $LiCoO_2$ toksik oluşu, yüksek maliyeti ve belki de en kısıtklayıcı olanı teorik kapasitesinin %50 kadarının kullanılabilmesi nedenleri farklı ve yeni katot aktif maddelerin geliştirilmesine yönelik çalışmaların yapılmasına neden olmaktadır (Şahan, 2009).

Anot elektrodunun kapasitesi Katot elektrodunun kapasitesine göre daha fazla olması sebebiyle Katod elektrodunun kapasitesi pilin kapasitesini belirleyici bir etmen olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu sebeple de pilin uzun çevrim ve yüksek enerji kapasitesine çıkması için içeriği; olivin yapısı ile lityum metal fosfatlar ($LiMPO_4$), katmanlı yapılı ile lityum metal oksitler ($LiMO_2$), spinel yapısı ile lityum metal oksitler ($LiMO_4$), ve katmanlı yapısı ile lityum metal oksitler ($Li_{1+x}M_{1-x}O_{20}$) (M= Ni, Mn, Co) kullanılmaktadır (Güney, 2023).

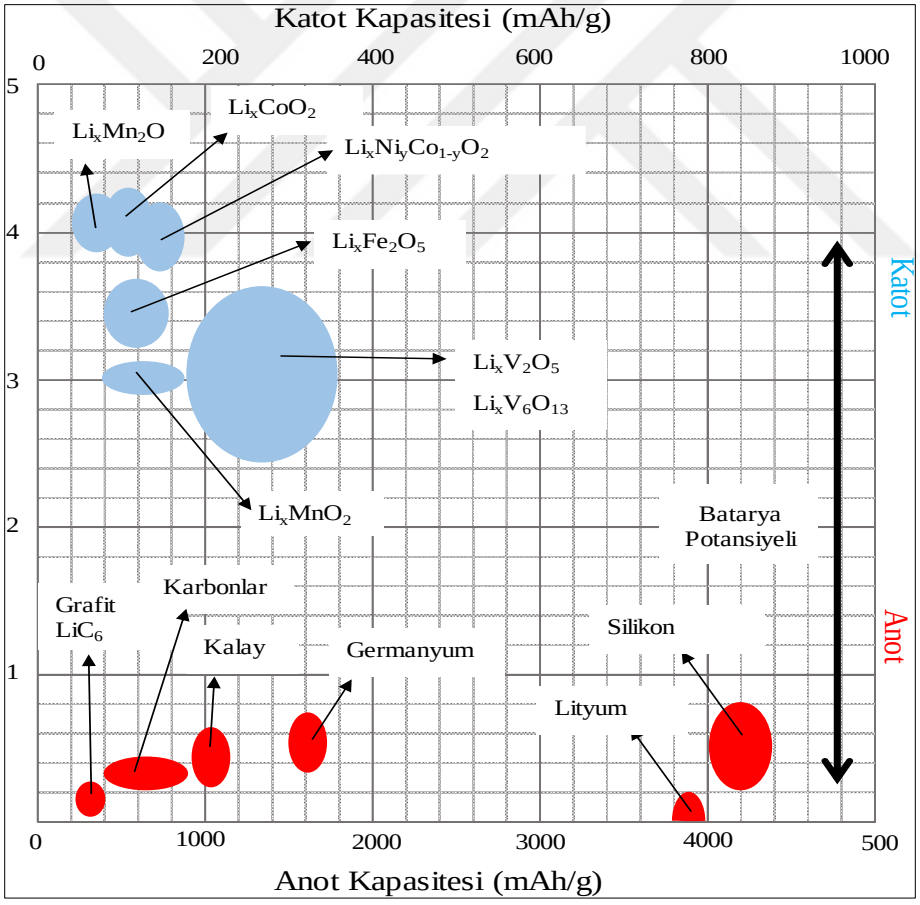
Li-ion pillerde kullanılan yaygın katot malzemeleri Tablo 2.4 'te özetlenmiştir (Uyumaz, 2023).

Tablo 2.4. Temel katot malzemelerinin özellikleri

	$LiFePO_4$	$LiFePO_4$ +5 % C	$LiMn_2O_4$	$LiCoO_2$
Yoğunluk (gcm^{-3})	3,60	3,48	4,31	5,10
Potansiyel (V)	3,50	3,50	4,05	3,90
Özgül Kapasite ($mAhg^{-1}$)	169	159	148	274
Özgül Enerji (Whg^{-1})	0,59	0,56	0,56	0,98

Aktif maddeler esas olarak yüksek redoks potansiyeline sahip lityum bileşikleri içerir. Artırılmış pil kapasitesi ve yüksek çıkış voltajı nedeniyle bileşik en önemli unsurdur (Song ve diğ., 2022). Li-ion pillerin enerji yoğunluğu zamanla katot malzemelerinin gelişmesiyle 150Wh/kg'dan 300Wh/kg'a çıkmıştır (Jin ve diğ., 2022).

Potansiyel ve özgül kapasite ilişkisine dayalı bazı alternatif anot ve katot kapasitelerini gösteren Şekil 2.15'de verilmiştir (Uyumaz, 2023).



Şekil 2.15. Alternatif katot ve anot malzemelerinin kapasitesi

Li-ion piller Tablo da gösterildiği üzere, LFP, LMO ve $Li(X)O_2$ katmanlı oksit (X = Ni, Co, Mn ve Al) olmak üzere üç tür katot malzemesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.5'de katot malzemelerine göre çeşitli Li-ion pillerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Katot malzemelerinin türlerine göre Li-ion pillerin özellikleri

Malzeme	$LiFePO_4$	$LiMn_2O_4$	$LiCoO_2$	$Li(Ni_xCo_yMnz)O_2$	$LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$
Ortalama voltaj (V)	3,4	3,8	3,7	3,6	3,6
Özgül kapasite ($mAhg^{-1}$)	130-140	100-120	135-150	160-220	180-200
Döngü sayısı	2000-5000	500-2000	500-1000	800-2000	800-2000
Güvenlik performansı	Mükemmel	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf

Bunlar arasında LFP, düşük maliyeti, en yüksek termal kararlılığı ve uzun çevrim kabiliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. 350 ℃ sıcaklıkta PO_4 oktahedral yapısındaki güçlü P=O kovalent bağına stabil kalabilir (Jiang ve diğ., 2004.b; Andersson ve diğ., 2000). Aşağıda Denklem 2.6'da, lityum daralması $LiFePO_4$ için ayrışmayı göstermektedir (Röder ve diğ., 2013).

$$2Li_0FePO_4 \rightarrow Fe_2P_2O_7 + Li_2O \quad (2.6)$$

LFP'nin aksine, LMO daha iyi üretim performansına sahiptir. Bununla birlikte, özellikle değerlendirilen sıcaklıkta şarj/deşarj işlemi sırasında Mn çözünmesi nedeniyle düşük enerji yoğunluğu ve zayıf çevrim kararlılığı zayıf noktasıdır. NCA, NCM gibi Ni metal oksit içeren katot malzemeleri daha yüksek özgül enerjileri nedeniyle yaygın olarak araştırma konusu olmuştur. Bunlar arasında saf $LiNiO_2$ zayıf elektrokimyasal özelliklerden ve düşük termal kararlılık gösterir (Dahn ve diğ., 1994; Cao ve diğ., 2004; Yabuuchi ve Ohzuku, 2003).

Ni kafes yapısında Mn, Co veya Al ile değiştirilmesiyle, $LiNi_xCo_yMn_zO_2$ yapısında ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$, $0 < z < 1$, $x + y + z = 1$) olacak şekilde; NCM333 (x: y:z = 3:3:3), NCM433 (4:3:3), NCM532 (5:3:2), NMC622 (6:2:2) ve NCM811 (8:1:1), elektrokimyasal özellikleri geliştirmek için geliştirilmiştir (Bak ve diğ., 2014; Liang ve diğ., 2016).

Bu malzemeler arasında, artan Ni içeriği ile aynı voltaj aralığında daha yüksek lityum kullanımı elde edilmektedir. Bu nedenle, $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ (NCA) ve NCM811 gibi daha yüksek Ni içeriğine sahip katot malzemeleri, elektrikli taşıtların uygulanması için enerji, güç ve maliyet gereksinimlerini karşılamak için yaygın kullanım görmektedir (Wang ve diğ., 2007; Hwang ve diğ., 2014).

Bununla birlikte, daha büyük özgül enerjiye sahip bu malzemelerin daha düşük bir faz geçişi başlangıç sıcaklığı sunacağı ve faz geçişi sırasında büyük miktarda oksijen salınımının olduğu üzerinde sonuca varılmıştır (Bak ve diğ., 2014).

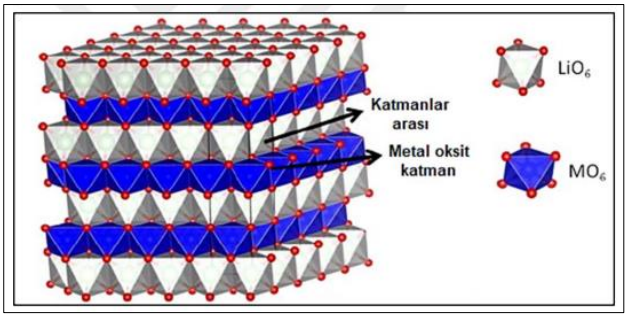
Şarj edilmiş dört tip pilin (NCM433, NCM532, NCM622, NMC811) faz değişikliğinde sıcaklık değişimi incelendiğinde, NCM811'in başlangıç sıcaklığının yaklaşık 260 ℃ olduğu, ancak ilk faz geçişinin yaklaşık 135 ℃'de başladığı görülebilir (Bak ve diğ., 2014). Bu değer NCA ile karşılaştırıldığında, başlangıç sıcaklığının 170 ℃ civarında olduğu görülmüştür (Bang ve diğ., 2006).

Li-ion pillerin güvenliğini ve elektrokimyasal performanslarını etkili bir şekilde artırmak için kapasite bozulması mekanizması ve bu katot malzemeleri için zayıf termal kararlılık derinlemesine anlaşılmalıdır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre EV güvenliği için Li-ion pillerin katot malzemelerinin optimize edilmesi önerilmektedir.

1980'lerde Goodenough'un grubu tarafından üç sınıf oksit katodun türü üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma grubunda Japonya'dan Koichi Mizushima katmanlı oksit katotlar üzerinde, Güney Afrika'dan Michael Thackeray spinel oksit katotlar üzerinde ve Hindistan'dan Arumugam Manthiram polianyon katotlar üzerinde çalışmalarını yürütmüşlerdir (Manthiram, 2020).

Ticari pillerde katot malzemesi genellikle katmanlı, spinel ve olivin yapı olarak çeşitlenmektedir.

Katmanlı yapıdaki katotlar, $LiMO_2$ (M = V, Mn, Co ve Ni) yapısında olan tabakalı yapılar, oksijenin kübik sık istiflenmeyle oluşturduğu konumlara Li^+ ve M^{3+} iyonlarının yerleşmesiyle oluşan Şekil 2.16'da gösterilen yapılardır (Şahan, 2009). Bu yapının oluşumunda Li^+ ve M^{3+} element iyonlarının yarıçap ve yükleri arasındaki fark rol oynamaktadır.



Şekil 2.16. Katmanlı katot malzeme yapısı

$LiMO_2$ yapısında M=Co kullanıldığı $LiCoO_2$ yapısındaki iyonların iyonik yarıçapları arasındaki farkın büyük olması nedeniyle ve Li+ ve Co^{3+} arasındaki etkileşim nedeniyle elektronik iletkenliğe sahiptir. $LiCoO_2$ bileşiği ilk ticari katot malzemesi olması yanında sentezinin kolay olması, döngü ömrünün uzun ve 140 mAh g^{-1} büyük olan kapasiteye sahip olması avantajları olmakla beraber toksik oluşu, maliyetinin yüksek olması, teorik kapasitesinin yaklaşık % 50 kadarının kullanılabilmesi gibi dezavantajlara sahiptir (Güney, 2023). Teorik şarj kapasitesinin yarısından fazlası kullanıldığında, bileşik kararsız hale gelebilmektedir (Şahan, 2009). $LiCoO_2$ temelli katotların 4,2V üzerinde yapısal kararsızlıkların oluşması bu malzemenin yerini alabilecek başka katmanlı yapıların araştırılmasına kapı aralamıştır (Güney, 2023).

Ayrıca Li_2CO_3, MgO, Al_2O_3, $AlPO_4$, SiO_2, SnO_2, ZrO_2, bileşikleri ve C elementi ile yapılan kaplamalar ile bu tür yüksek potansiyelde kapasite kaybının azaldığı tespit edilmiştir (Şahan, 2009). Ayrıca Co^{3+} iyonunun bir kısmı yerine Ni^{3+}, Fe^{3+}, Mn^{4+}, Al^{3+},Ga^{3+}, Mg^{2+} ve Ti^{4+} gibi iyonlarının kullanılması ile yüksek potansiyelde kapasite kaybını azalması ve kapasiteyi artırdığı tespit edilmiştir (Şahan, 2009). $LiMO_2$ yapısında M=Ni kullanıldığı $LiNiO_2$ yapısındaki bileşiği, $LiCoO_2$ bileşiğinden üretim maliyeti daha az ve kapasitesi ise 200 mAh/g ile daha büyüktür. $LiCoO_2$ bileşiğine göre daha fazla lityumun kullanılmaktadır. $LiNiO_2$ bileşiğinin üretimi zor olmakla birlikte tersinmez faz dönüşümü kapasite kaybına sebep olmaktadır.

Üretim sürecinde Ni^{2+} iyonunun Ni^{3+} iyonuna yükseltgenme zorluğu, yüksek sıcaklıkta Li_xNiO_{2-x} ($0<x<1$) bileşiğine geçişindedir. $LiNiO_2$ molekülü 240 mAh g^{-1} pratik kapasite göstermesine karşın Ni^{4+} iyonunun atomik yarı çapı (0,62 nm) Li^+ iyonun çapına (0,60 nm) yakın bir değerde olduğu ve çevrim sırasında Ni elementlerinin yapısal kararlılığın azaldığı bilinmektedir (Güney, 2023).

Pilin kapasite kaybını azaltarak aynı zamanda termal kararlılığı artırmak için metal oksit kaplama ve değişik metal katkılama yöntemleri kullanılmaktadır. $LiNiO_2$ yapısı, $Li_2O.2B_2O_3$, MgO, $AlPO_4$, SiO_2, TiO_2 ve ZrO_2 bileşikleriyle kaplandığında ve çeşitli metaller ile katkılandığında $LiNi_{1-x}M_xO_2$ (M=Al, Mn, Co, Mg, Ca, Ga, Ti ve Nb) bileşiklerinin elektrolit içinde daha kararlı olduğu kapasite kaybı daha az olmaktadır (Şahan, 2009).

$LiMO_2$ yapısında M=Mn kullanıldığı $LiMnO_2$ yapısındaki lityumun 2 - 4,25 V aralığında ve 190 mAh/g değerinde bir kapasitesi mevcuttur. $LiMnO_2$ bileşiğindeki manganın bir kısmı yerine Al, Cr, Ni ve Co gibi metalleri ile yapılan katkılama işlemi vasıtasıyla tabakalı yapı kararlı hale getirilir, bu sayede kapasite kaybı da önlenmektedir (Şahan, 2009).

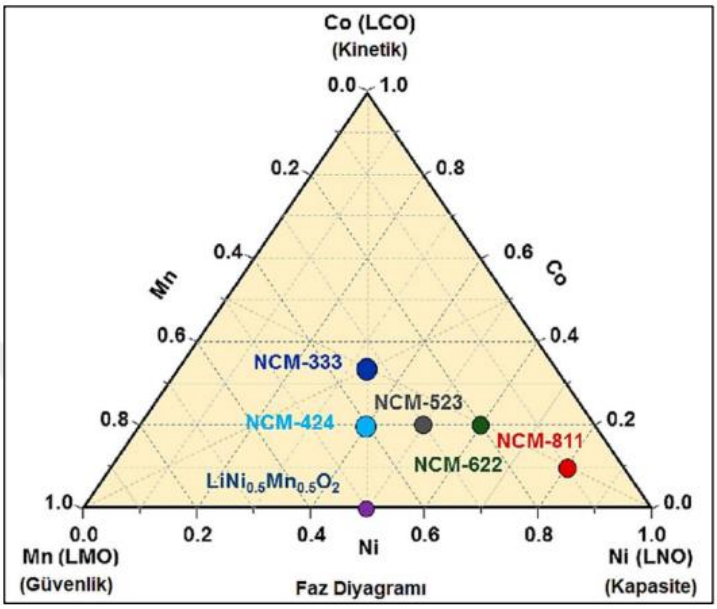
Kapasite kaybını azaltan bir başka yöntem olarak yine $LiMnO_2$ bileşiğinin, Al_2O_3 ve CoO gibi metal oksitler ile kaplanmasıdır (Şahan, 2009).

Li-ion bataryalarda kullanılan geçiş metallerinin (Ni, Mn, Co) katkılanması vasıtasıyla yapısal sorununun giderilmesi denemesinde, her bir geçiş metalinin eşit olarak $LiMO_2$ yapısına eklendiğinde Li-ion pillerden bilinen bir tür olan $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$ (NMC333) malzemesi elde edilmiştir. Li-ion pil içinde Co elementi kinetik olarak avantaj sağlarken Ni elementi kapasiteye önemli ölçüde arttırmaktadır (Güney, 2023).

Li-ion pillerin en temel sorunlarından biri olan kapasite problemi esasen katot elektrotu için geçerli olan bir ayırt edici özelliktir. Bu kapasitenin arttırılması amacıyla katot $LiMO_2$ yapısı içindeki Ni elementi miktarının göreceli arttırılması vasıtasıyla çeşitli çok bilinen pil türleri geliştirilmiştir. Bu piller içinde NMC811 >200 mAh g^{-1} gibi bir kapasiteye sahip olmasına rağmen kararlılığının iyi olmadığı bilinmektedir. Bir sorun olarak bilinen bu durumu iyileştirmek için ise NMC811 üzerine farklı bileşenlerde $Ni_xMn_yCo_{(1-x-y)}O_2$ malzemesi kaplanarak sentez yoluyla çözüm getirilmiştir. Şekil 2.17'de faz diyagramı ve NMC türleri gösterilmiştir. Katot malzemesi NMC811 olarak bilinen türün dışında NMC532 ve NMC622 gibi daha düşük kapasiteye sahip ancak (<200 mAh/g) ticari olarak tercih edilen türlerdir. Katmanlı yapılı katot metal oksitlerden bir diğeri $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ (NCA), 279 mAh/g teorik kapasiteye ve 200 mAh/g pratik

kapasiteye sahiptir. Nikel elementi oranı bu yapıya yüksek kapasite sağlarken kobalt elementi yapıya kinetik özellik kazandırmaktadır (Güney, 2023).

NCA türü Li-ion piller yüksek kapasiteye sahip olmaları ve kararlılık göstermelerine rağmen toksik olmaları Co elementinin pahallı olması nedeniyle üretimi azaltılmıştır (Güney, 2023).



Şekil 2.17. Çeşitli NMC katot türlerinin faz diyagramı

Spinel yapıdaki katotlar, $LiMn_2O_4$ spinel bileşiğinin katot aktif madde özelliği ilk defa Thackeray ve arkadaşları tarafından incelendikten sonra yoğun şekilde araştırılmıştır.

Avantaj olarak bileşik ucuz olması, kolay ve bol bulunması ve en önemlisi, termal yönden kararlı olması nedenlerinden ötürü elektrikli taşıtlarda (EV) ve hibrit elektrikli taşıtlarda (HEV) tercih edilmektedir. Bu bileşiğin bir de bilinen bir dezavantajı yüksek sıcaklıklarda uğradığı kapasite kaybıdır. Kapasite olarak da 120 mAh/g civarı göreceli düşük kapasiteye sahiptir (Şahan, 2009).

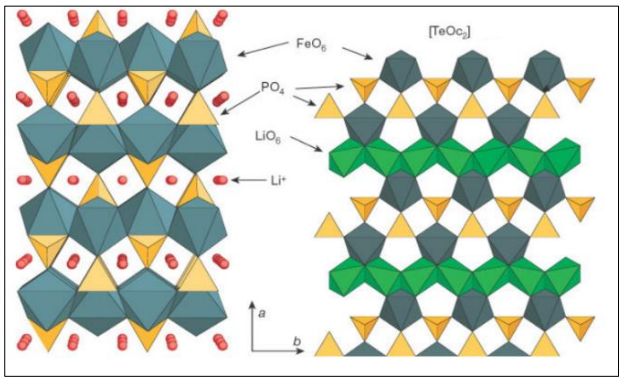
Bileşiğin spinel yapısı genellikle AB_2O_4 ile tanımlanmaktadır. A iyonu iki değerlikli bir birim tetrahedron yapı için dört adet oksijen iyonu, B iyonu ise üç değerlikli halde bir birim oktahedran oluşturmak için altı oksijen iyonu ile çevrelenmiştir (Lökçü, 2024). Kullanılan pillerdeki bulunan karbonat çözücülü elektrolitlerin 4,5 V üzerinde bozulması bu tür katotların kullanımını sınırlamaktadır (Güney, 2023).

Spinel $LiMn_2O_4$ yapısındaki malzemelerde kullanılan Mn elementi ucuz ve yüksek voltaj aralığında çalışabilmesi nedeniyle tercih edilse de çevrim esnasında Jahn-Teller bozunumuna neden olmaktadır. Bu bozunum Ni gibi metallerin eklenmesi ile giderilmeye çalışılmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajlar gözetilerek $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ yapısı katot malzemesi olarak literatüre kazandırılmıştır (Güney, 2023).

Olivin yapıdaki katotların, $LiMPO_4$ (M=Fe, Ni, Mn, Co) bileşiklerinin kararlılıkları yüksektir. Bununla beraber çevrim dayanıklılıklarının uzun, çevre dostu, üretim maliyetinin düşük ve de en önemli özellikleri olan yüksek enerji yoğunluklarına rağmen elektrolit içinde termal kararlılıklarının yüksek olması, yapının lityuma karşı 3,4 V deşarj potansiyeline ve 170 mAh/g gibi yüksek teorik kapasiteye sahip olması nedenlerinden ötürü katot aktif maddesi olarak önemli bir yer tutmaktadır (Güney, 2023). Bununla birlikte yapının düzenli olivin yapısı ve elektrolit maddesinin iyonik iletkenliğinin düşük olması katot aktif madde olarak kullanımını olumsuz olarak etkilemektedir. Bu olumsuz yönleri bertaraf etmek için karbon veya iletken ile kaplama ile birlikte nano boyutta tanecik üretim yöntemleri kullanılmaktadır (Şahan, 2009).

Bu bileşiklerde teorik kapasitenin en fazla 170 mAh/g olması, olivin yapılı $LiMPO_4$ malzemelerinden başka katot aktif malzemelerinin araştırılmasına sebep olmuştur (Güney, 2023).

Aşağıdaki Şekil 2.18'de [001] boyunca iz düşümde olivin yapıdaki $LiFePO_4$ yapısının kristal yapısı verilmiştir. Solda, FeO_6 oktahedra ve PO_4 tetrahedra üzerine kurulu çerçevenin görünümü, Li iyonları kırmızı renkte ve FeO_6 oktahedraları (b, c) düzleminde köşe paylaşımı yoluyla birbirine bağlanmıştır (Tarascon ve Armand, 2001).



Şekil 2.18. Olivin katot malzeme yapısı

Başlıca elektrokimyasal karakteristiklere sahip ticari katot malzemelerinin özeti aşağıda Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Çeşitli ticari katot türleri ve özellikleri

Katot Malzemesi	Yapı Tipi	Potensiyel Li/Li^+, V	Teorik Kapasite mAh g^{-1}
$LiMO_2$	Katmanlı		
$LiCoO_2$		3,7	274
$LiMnO_2$			285
$LiNiO_2$			
$LiNi_{1-x-y}Co_xM_yO_2$	Katmanlı		
$LiNi_{1-x-y}Co_xAl_yO_2$, NCA		4,4	195
$LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$, NCM		4,5	200
$LiMn_2O_4$	Spinel	4,0	148
$LiMPO_4$	Olivin		
$LiFePO_4$		3,5	170
$LiMnPO_4$		4,1	170
$LiCoPO_4$		4,8	167
$LiNiPO_4$		5,2	170

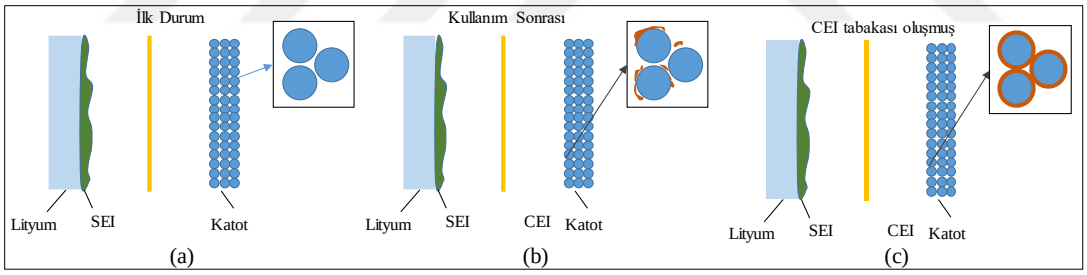
CEI arayüz katmanı, şarj edilebilir Li-ion pillerdeki en önemli ancak en az anlaşılmış bileşenlerden biri olarak kabul edilmektedir (Wu ve diğ, 2021). Katot ve elektrolit arasında katot-elektrolit interfaz (CEI) oluşumu, Li-ion pillerin kararlılığını belirleyen kritik bir faktördür. CEI katmanı, katot ve elektrolit arasındaki redoks reaksiyonlarından ayrışan çeşitli yan ürünlerden örneğin LiF, Li_2CO_3, ROLi ve $ROCO_2Li$ (R: alkil grubu) oluşur ve bu da dramatik kapasite azalmasına ve kararlılık sorunlarına yol açabilir (Kim ve diğ., 2023). CEI, Coulombic verimliliğini ve bataryanın genel kapasite korumasını geliştirmeye yardımcı olur. Bu, ticari karbonat bazlı elektrolitlerde CEI'nin daha önce anlaşılandan farklı bir perspektifini oluşturur (Zhang ve diğ., 2021). CEI'nin anlaşılması, katot ve yanıcı elektrolitler arasındaki ekzotermik reaksiyonların önemli ölçüde ısı üretimine yol açması ve termal kaçağı tetiklemesi gibi pil ömrünü ve güvenliğini etkileyebilecek katot elektrotlarıyla elektrolit reaktivitesini azaltmak için kilit öneme sahiptir (Wu ve diğ, 2021).

CEI'nin varlığı ilk olarak Goodenough tarafından ortaya atılmış ve çok sayıda çalışma ile kanıtlanmış olmasına rağmen, CEI'nin kimyasal bileşimi, evrim süreci, kimyasal ve fiziksel özellikleri ve performans üzerindeki etkisi gibi bazı sorular hala mevcuttur (Wang ve diğ., 2020).

Katot elektrolit ara fazı (CEI) genellikle yüksek voltajda şarj/deşarj işleminde kendiliğinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, kararlılık ve elektrokimyasal özellik katodu korumak için salt özellik teşkil etmemektedir (Wang ve diğ., 2020).

Katotlar üzerinde yüzey CEI katmanlarının oluşumu ve evrimi, katot ve elektrolit arasındaki karmaşık kimyasal yüzey reaksiyonlarını içeren dinamik bir süreçtir (Wang ve diğ., 2020).

Başlangıçta, katot malzemeleri elektrolit ile temas ettiğinde doğrudan gerçekleşir. Kimyasal özellikler açısından, katot malzemelerinin elektrolitin oksijen atomlarına erişme eğiliminde olan güçlü nükleofilik ve Lewis bazı özellikleri olduğu ve böylece redoks reaksiyonunun meydana geldiği gösterilmiştir (Wang ve diğ., 2020). Agresif katotların termal kararlılığını arttırmak ve ara yüzey yan reaksiyonundan kaçınmanın yanı sıra elektrokimyasal performansı sağlamak için, yüksek inorganik içerik (örneğin, Li_2CO_3 ve LiF) içeren ve Li+ taşınmasını kolaylaştırırken elektronik bir yalıtkan olarak hizmet veren 5-50 nm kalınlığında termal olarak kararlı CEI istenmektedir (Wu ve diğ, 2021). Aşağıda Şekil 2.19'da CEI tabakasının oluşumu verilmiştir.



Şekil 2.19. CEI tabakasının katot üzerinde oluşumu

CEI'nin elektrolit ve elektrot arasındaki karmaşık kimyasal yüzey reaksiyonunun neden olduğu inorganik bileşenler ve organik türler içerdiği yaygın olarak kabul edilmektedir, şimdiye kadar ayrıntılı bileşen ve elektrokimyasal evrim hala tartışılmaktadır (Wang ve diğ., 2020).

Spinel katotların katmanlı katotlara kıyasla daha kararlı bir CEI oluşturduğu bilinmektedir. Ni bakımından zengin katotlar yüksek Li_2CO_3 içeriğine sahip kalın yüzeyli CEI oluşturmakta ve sonraki döngülerde oksitlenmiş organik karbonatlara dönüşmektedir (Wang ve diğ., 2020).

Organik karbonatlar, polimerik karbonlar oluşturmak üzere serbest kalan oksijen tarafından oksitlenirken Li zengin katot yüzeyinde Li tuzunu ayrıştırır. Spinel katotlar yüksek elektrolit kararlılığı nedeniyle daha ince ve kararlı bir CEI göstermektedir. Dolayısıyla, CEI esas olarak ayrışmış $LiPF_6$ türlerini içermektedir (Wang ve diğ., 2020).

Pilin yaşam döngüsünün başında katottan Li+ 'un geri döndürülemez kaybı, katot ve CEI katmanının birleşim noktasında Li+ göçüne neden olmaktadır. Lityum iyonları göç ettiğinde, boşluklar eşit şekilde oluşabilir.

Bu boşluklar, katot yüzeyinin yakınında sürekli olarak oluşan negatif yükler olarak hizmet etmektedir. Daha sonraki elektrokimyasal döngüler sırasında, deinterkalasyona uğramış Li+ iyonlarının CEI katmanında birikmesi muhtemeldir, böylece kayda değer bant bükülmesine yol açarak yük yoğunluk değişimini kolaylaştırır. Bu süreç, sonunda elektrolit içinde çözünecek olan kararsız CEI tabakasının oluşumunu hızlandıracak ve lityum-iyon pilin ciddi kapasite düşüşüne neden olacaktır (Kim ve diğ., 2023).

2.1.6.3. Elektrolit

Pilin elektrolit adı verilen kısmı, şarj ve deşarj esnasında lityum iyonların taşımımı sağlayan ve içeriğinde çözünmüş lityum tuzları olan bileşiklerdir. Bu bileşikler organik çözeltilerden meydana gelmektedir.

Bu organik çözeltilerinden beklenen en temel özellikler şunlar olmalıdır; lityum tuzlarını içinde çözebilmeli, düşük bir viskoziteye sahip olmalı, elektrokimyasal aralığı kararlı olmalı, pilin içerisindeki bileşenlere inert olabilme özelliğine sahip olmalı, termal kararlılığı yüksek olabilmeli, elektrotların yüzeyinde ara yüzey (SEI) oluşturabilmelidir.

Elektrolit maddesi, iyonların (Li+) anot ile katot aralığında hareketini sağlar, elektrodların yüzeylerini stabilize eder, pil ömrünü uzatarak pilin performansını iyileştirir.

En fazla sıklıkla kullanılan elektrolitler birer karbonat bileşiği olarak; etilen karbonat, propilen karbonat, dimetil karbonat, dietil karbonat, etil metil karbonat, vinil karbonat ve floroetilen karbonat çözeltileridir. Lityum tuzu olarak ise genellikle kullanılan bileşik; Lityum hekzafloro fosfat ($LiPF_6$) dır (Güney, 2023).

Dimetil veya trimetil fosfatlar gibi alev geciktirici malzemeler ve difenilamin ve politrifenilamin gibi bazı kimyasallar, aşırı şarja karşı koruma sağlamak için bir elektrolite dahil edilir. Fosfor ilavesi, Li-ion pillerin elektrokimyasal özelliğini azaltabilir, ancak termal kaçak meydana geldiğinde sızıntı riski yine de mümkündür (Song ve diğ., 2022).

2.1.6.4. Separatör

Separatörler, pil içindeki elektrotların tam ortasında ve onları birbirlerinden ayırarak elektriksel iletimin önüne geçmektedir. Lityum iyonlarının elektrodlar arasında iletilmesinde gerekli ortamı sağlamaktadır. Separatör pilin kullanımı esnasında veya şarj edilmesi esnasında bir reaksiyona girmemekte, gözenekli olan yapısı vasıtasıyla lityum iyonlarının geçişini sağlamaktadır.

Yalıtkan olması ile pil içinde kısa devre oluşumunu engellemektedir. Separatörün dayanıklı olması ile lityum dendritlerin separatörü yırtması engellenmektedir. Separatörün mekanik olarak yırtılması kısa devreye ve bu sebeple de pilin termal kaçak mekanizmasına girmesine sebep vermektedir. Separatörlerin termal kararlılığı yüksek olması elektrolit ile kimyasal tepkimeye girmesi önlenmelidir. Yukarıda sayılan sebeplerden ötürü separatörler poliolefin grubu maddelerden (polipropilen veya polietilen) seçilmektedir (Güney, 2023).

Diğer bir alternatif malzeme seramiktir, ısıl kararlılığı iyidir, ancak diğer yandan mekanik dayanım ve maliyet etkisi açısından saf seramikten daha iyi çözümler vardır. (Song ve diğ., 2022).

2.1.6.5. Bağlayıcı (Binder)

Bağlayıcı, elektrot malzemelerini bir arada tutan ve elektrotların mekanik dayanıklılığını artıran bir bileşendir. Uygun bağlayıcı malzemeyi seçmek için üç kriter vardır. İlk olarak, anot malzemesinin hacim değişimi esastır; bu nedenle mekanik özellikleri bu hacim değişimini karşılamalıdır. İkincisi, ciddi kapasite zayıflamasını ve korozyonu önlemek için aktif maddelerin elektrot malzemelerinden çözülmesini önlemelidir. Üçüncüsü, iyi bir yaşam döngüsü için elektrot-elektrolit arasındaki kesişmeyi dengeleyebilmelidir. (Song ve diğ., 2022).

2.1.6.6. Kollektör

Kollektör (toplayıcı), elektrotlar arasında elektriksel bağlantıyı sağlayan ve akımın iletilmesini kolaylaştıran bir bileşendir. Kollektörler, bakır veya alüminyum gibi yüksek iletkenliğe sahip metallerden yapılır ve elektrotların her iki tarafında bulunmaktadır. Birincil rolü, katot ve anot arasındaki elektron yoludur; toplayıcı onlarla yakın temas kurmalıdır.

Bakır folyolar ve alüminyum folyolar, toplayıcı malzeme olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük elektron kaybı potansiyeli (oksidasyon) nedeniyle, bakır anot tarafını oluşturur. Alüminyum, yüksek elektron kaybı potansiyeli nedeniyle katot tarafını oluşturur (Song ve diğ., 2022).

2.2. Lityum İyon Batarya içindeki Kimyasal Reaksiyonlar

Temel reaksiyonlar aşağıdaki denklemlerde verilmiştir (Peng ve diğ., 2019):

- Katottaki reaksiyonlar denklemler (2.7) ve (2.8)'de şu şekilde tanımlanır:

$$LiFePO_4 \xrightarrow{şarj} Li_{1-x}FePO_4 + xLi^+ + xe^- \quad (2.7)$$

$$LiFePO_4 \xleftarrow{deşarj} Li_{1-x}FePO_4 + xLi^+ + xe^- \quad (2.8)$$

- Anottaki reaksiyonlar denklemler (2.9) ve (2.10)'da şu şekilde tanımlanır:

$$xLi^+ + xe^- + 6C \xrightarrow{şarj} Li_xC_6 \quad (2.9)$$

$$xLi^+ + xe^- + 6C \xleftarrow{deşarj} Li_xC_6 \quad (2.10)$$

- Toplam reaksiyonlar denklemler (2.11) ve (2.12)'de şu şekilde tanımlanır:

$$LiFePO_4 + 6C \xrightarrow{şarj} Li_{1-x}FePO_4 + Li_xC_6 \quad (2.11)$$

$$Li_{1-x}FePO_4 + Li_xC_6 \xrightarrow{deşarj} LiFePO_4 + 6C \quad (2.12)$$

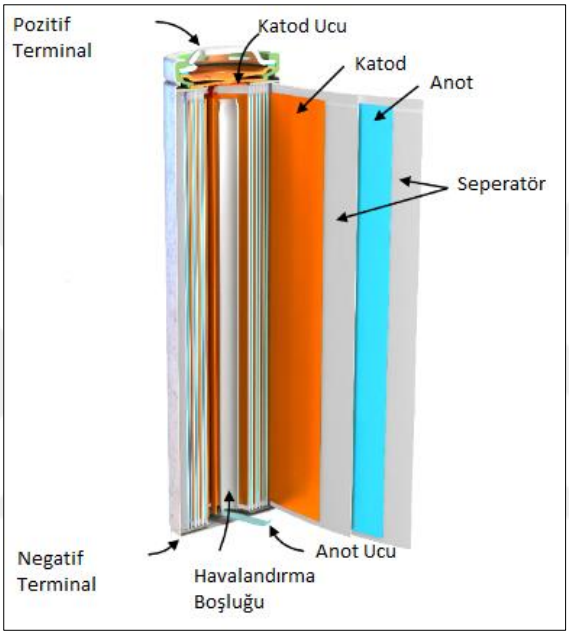
2.3. Lityum İyon Batarya Yapısı

Şekillerine göre, Li-ion piller dört tipe ayrılabilir;

2.3.1. Silindirik Şekilli Hücreler

Başlıca avantajları; imalat basitliği ve iyi mekanik kararlılık. Silindir formu, deformasyon olmadan yüksek iç basınca dayanabilir. Bazılarının güvenlik sistemleri var. (the PTC switch and CID). Şekil 2.20'de silindirik yapıda lityum pilin yapısı verilmiştir.

PTC (Pozitif Termal Katsayısı); pil maksimum akıma ulaşırken, polimerin iletkenliği akım akışını tutar. Kısa devre rölesi gibi çalışır.



Şekil 2.20. Silindirik Li-ion pilin kısımları

CID (Şarj Kesme Cihazı); iç basınç yükseldiğinde, fiziksel olarak hücre bağlantısını keser.

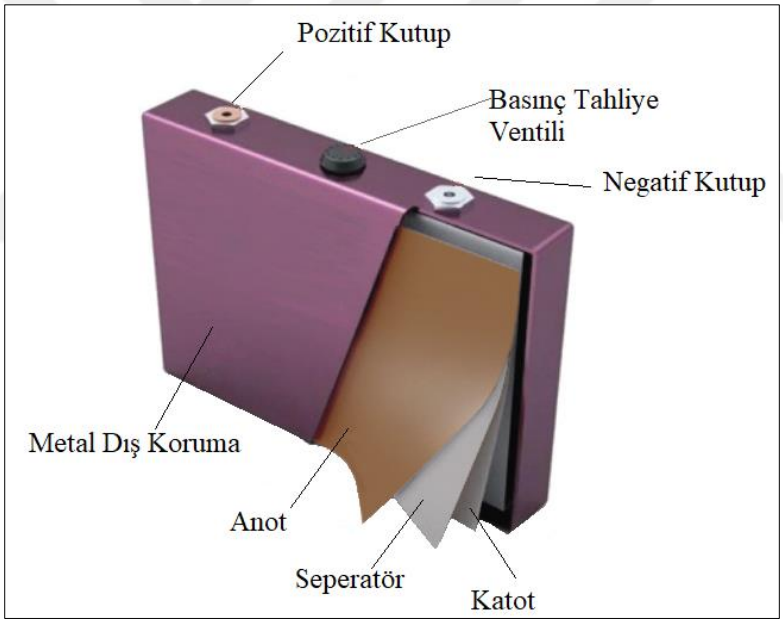
Silindirik hücrelerin ana kullanım alanları elektrikli aletler, tıbbi aletler, dizüstü bilgisayarlar ve e-bisikletlerdir. Tesla Şirketi, EV'leri için bu türü kullanır. Gelecekte pil üreticileri, artan EV talebi nedeniyle malzeme sıkıntısı yaşayabilir. Silindirik Li-ion piller hacimlerine göre 18650, 20700, 21700 ve 22700 olarak adlandırılabilmektedir.

Hücre hacmi ve kapasitesi karşılaştırıldığında 18650 pil hücresi 16 ml olup, kapasitesi 3000 mAh'dir. 21700 pil hücresi 6000 mAh ile 24 ml hacime sahiptir. Hacim %50 artarken hücre kapasitesinin %100 arttığı gösterilmiştir (URL-10). Üretim basitliği ve

uygun değerde kapasite nedeniyle Tesla, Panasonic ve Samsung şirketleri, 21700 tipi silindirik hücre üretmektedir (URL-11).

2.3.2. Prizmatik Şekilli Hücreler

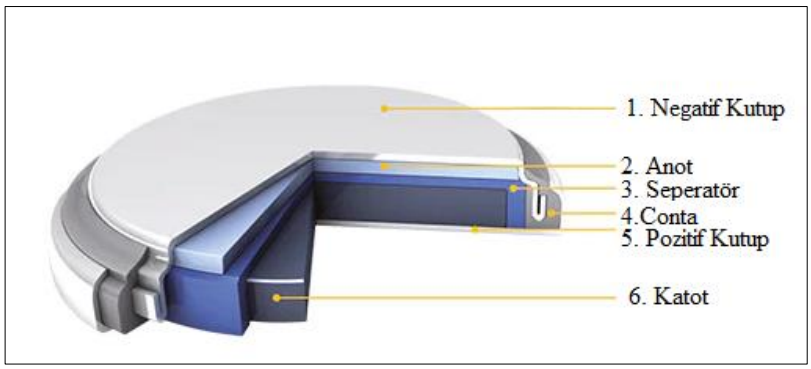
Katmanlar kullanılarak optimize edilmiş boyut öne çıkıyor. Ağırlıklı olarak cep telefonlarında ve taşınabilir bilgisayarlarda kullanılırlar ve enerji kapasiteleri 800 mAh - 4000 mAh arasında değişir. Benzersiz bir biçimleri yoktur; her üretici kendi tasarımını yapar. Ayrıca daha büyük yapıları vardır; enerji kapasiteleri 20–50 Ah arasındadır ve çoğunlukla EV'lerde kullanılırlar (URL-12). BMW, Mercedes-Benz ve Volkswagen bu türün ana kullanıcılarıdır. Bir dış darbeye karşı dayanıklılıkları diğerlerinden daha güçlüdür ancak enerji yoğunlukları daha düşüktür (URL-11). Pil tipi Şekil 2.21'de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Prizmatik tip Li-ion pil

2.3.3. Düğme veya Para Şekilli Hücreler

İnce, madeni para benzeri şekli, taşınabilir el cihazları için en uygundur. Bu akü tipi dış darbelere karşı hassastır. Bu dış darbe yüksek hızda meydana gelirse, pil hücresi şişebilir. Şarj edilemezler ve tıbbi implantlarda, saatlerde ve taşıt anahtarlarında kullanılabilirler. Düğme tip pil Şekil 2.22'de gösterilmiştir (URL-12).

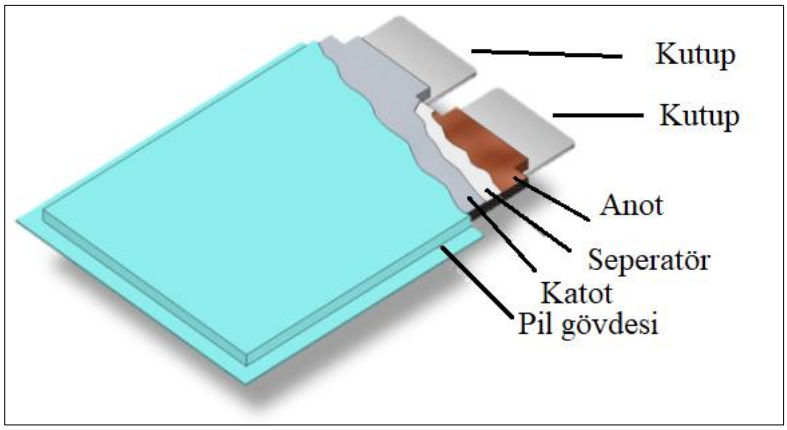


Şekil 2.22. Düğme tipi Li-ion pil

2.3.4. Torba Şekilli Hücreler

Bu hücreler ince ve esnektir ancak yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (URL-11). Esneklik ve hafif pil tasarım çözümleri sunarlar. Hafif yükleme gerektiren koşullarda yüksek yük akımlarına sahiptirler. Paketleri genellikle lityum polimer formatındadır. Öncelikle dronlarda ve diğer hobi ekipmanlarında kullanılırlar. Aşırı şişme bir güvenlik endişesi olabilir (URL-12). %90-95 paketleme verimliliğine ulaşırlar; GM ve Hyundai şirketleri taşıtlarında, Şekil 2.23'de yapısı gösterilen torba piller kullanmaktadır (URL-11).

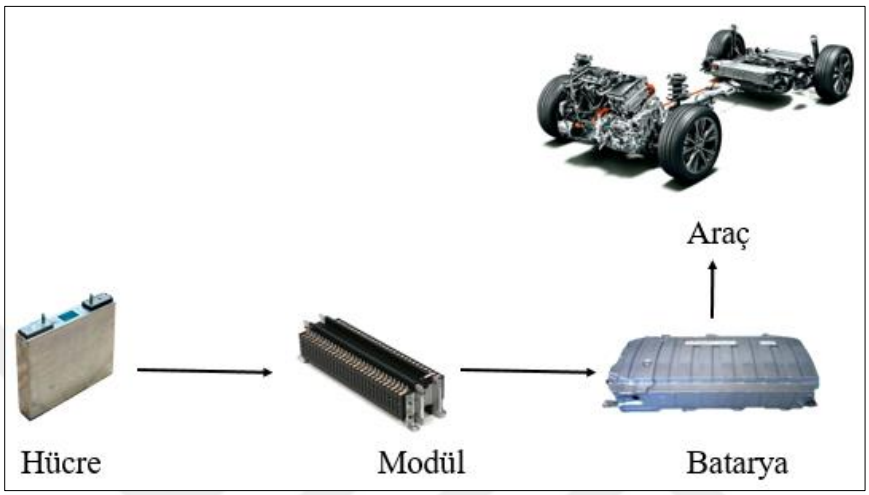
Bu yapı bir yığın olarak durmakta, bu sayede pil kompakt bir yapı oluşturmakta ve dağılmasını engellemektedir. Bu şekilde kullanım süresi oldukça uzundur. 500 dolum-boşaltım sonrası yüzde 8-10 civarında pilin gözvdesinde % 8-10 hacimsel şişme meydana gelmektedir. Prizmatik pil hücrelerinin alternatif olarak kullanılır.



Şekil 2.23. Torba tipi Li-ion pil

2.4. Hücreden Bataryaya Doğru Konfigrasyon

Farklı hücre türleri bir araya toplanır ve modüller oluşturulur. Modüller, Şekil 2.24'de gösterildiği gibi pil hücrelerinin bir araya getirilmesiyle modüllerin oluşturulması, bu modüllerin bir araya getirilmesi ile de pil paketinin (batarya) oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Çeşitli hücre tiplerinin birleştirilerek batarya elde edilmesi

Bataryanın oluşturulması aşamasında kendi içinde bağımsız birer birim olan hücrelerin birbirine doğru bir şekilde bağlanması yoluyla bataryada hedeflenen gerilim ve kapasite değerinin alınmasını sağlamaktadır. Hedeflenen batarya gerilimi ve kapasitesi için hücreler çeşitli yapılandırmalar ile bir araya getirilmektedir. Pil hücrelerinin birbirine seri (s) bağlanmasıyla nihai çalışma gerilimine (V) ulaşmak hedeflenirken paralel (p) bağlanmasıyla nihai kapasiteye (Ah) ulaşmak hedeflenir. EV taşıtlarda bu birleştirme ve tertip etme senaryoları birlikte kullanılarak nihai çalışma gerilimi ve toplam kapasite oluşturulur. Bu birleştirme işleminde dikkat edilmesi gereken hususlar seçilen bağlanırken seçilen pillerin eşit gerilim ve kapasiteye sahip olmalarıdır.

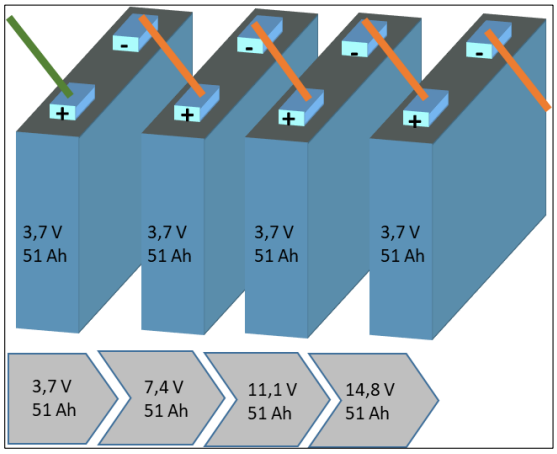
Paralel bağlantı şarj süresi daha uzundur. Hızlı şarj, pile zarar vermeden şarj süresini kısaltabilir (URL-12). Seri bağlı aküler, aynı sistem voltajı değerinde şarj cihazı ile şarj edilmelidir.

Lityum-iyon batarya hücrelerinin seri ve paralel bağlanma biçimi, elektrikli araçların performansını belirleyen temel faktörlerdendir. Hücrelerin seri bağlanmasıyla toplam gerilim artarken, kapasite sabit kalır; bu durum, elektrik motorunun daha yüksek hızlara

ulaşmasını ve enerji verimliliğinin artmasını sağlar. Yüksek voltaj, aynı güçte daha düşük akım çekilmesine olanak tanır, bu da iletim hatlarındaki ısınmayı ve enerji kayıplarını azaltır (URL-13). Ancak, seri bağlantılarda hücreler arasındaki küçük kapasite veya şarj durumu farkları zamanla büyüyerek voltaj dengesizliklerine yol açabilir; bu da batarya ömrünü kısaltabilir ve performansı düşürebilir (URL-14). Öte yandan, hücrelerin paralel bağlanması toplam kapasiteyi artırır ve yüksek akım gereksinimlerini karşılar; bu, özellikle tork gerektiren kalkış ve yokuş çıkışlarında avantaj sağlar. Ancak, paralel bağlantılarda hücreler arasındaki iç direnç farkları, akım dengesizliklerine ve dolayısıyla bazı hücrelerin aşırı ısınmasına neden olabilir (URL-15). Bu nedenle, batarya yönetim sistemleri (BMS), hem seri hem de paralel bağlantılarda hücreler arası dengeyi sağlamak ve güvenliği artırmak için kritik öneme sahiptir (Gandoman ve diğ., 2022).

2.4.1. Seri Bağlama

Gerilimin (V) yükseltilmesi istenen uygulamalardır. Piller seri olarak bağlandığında toplam kapasite (Ah) değişmemektedir. Aşağıdaki Şekil 2.25'da gösterildiği gibi 4 adet 3,7 V gerilime ve 51 Ah kapasiteye sahip prizmatik tipli bir EV pilinin seri bağlanması (4s) gösterilmektedir. Pillerin her birinin artı kutbu diğerinin eksi kutbuna bağlanarak toplamda 14,8 V gerilime sahip ve 51 Ah kapasiteye sahip pil grubu elde edilmiştir.

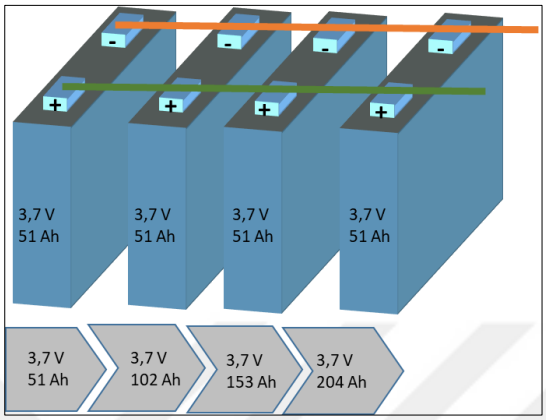


Şekil 2.25. Pil hücrelerinin seri bağlanması ile gerilim ve akımın değişimi

2.4.2. Paralel Bağlama

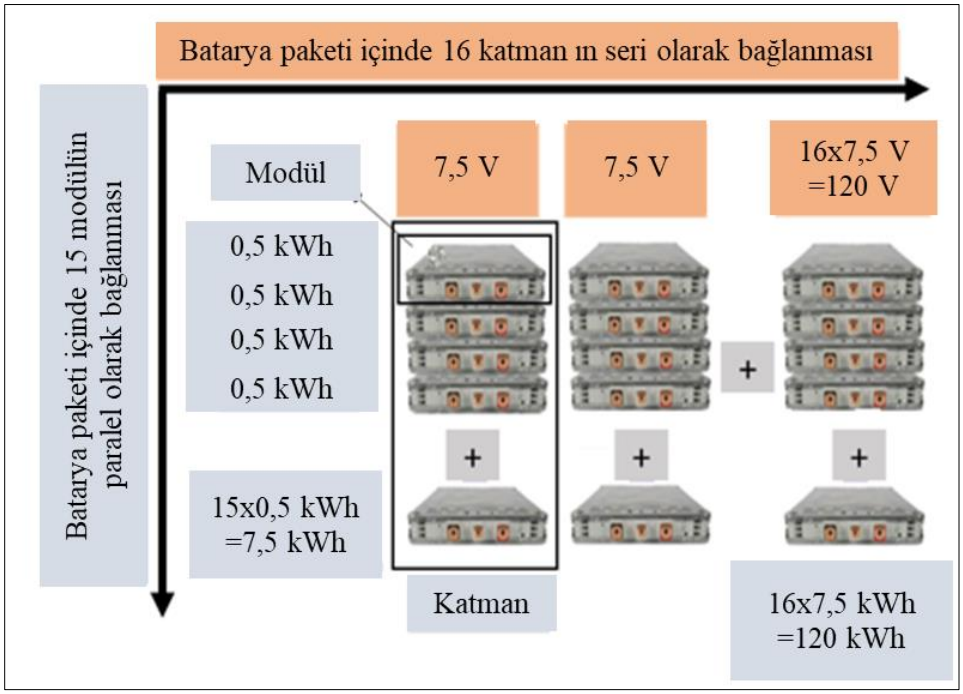
Kapasitenin (Ah) yükseltilmesi istenen uygulamalardır. Piller paralel olarak bağlandığında toplam akım (V) değişmemektedir. Aşağıdaki şekil 2.26'da 4 adet 3,7 V

gerilime ve 51 Ah kapasiteye sahip prizmatik tipli bir EV pilinin paralel bağlanması (4p) gösterilmektedir. Pillerin her birinin artı kutbu birbirine ve eksi kutupları da birbirine bağlanarak toplamda 204 Ah kapasiteye sahip ve 3,7 V gerilime sahip pil grubu elde edilmiştir.



Şekil 2.26. Pil hücrelerinin paralel bağlanması ile gerilim ve akımın değişimi

Paralel bağlı hücrelerden biri arızalanması durumunda toplam kapasite düşmektedir. Hücrelerinden birinde meydana gelebilecek kısa devre, diğer hücrelerden hatalı bataryaya enerji akışına neden olur bu da termal kaçak mekanizmasını tetikleyerek yangına sebep olabilir.



Şekil 2.27. EV bataryanın seri ve paralel bağlanması

Bir EV'nin istenen sistem gerilimi ve kapasitesi (Ah), seri ve paralel bağlantıların kullanıldığı bir yapılandırmadır. Şekil 2.27'de bir örnek verilmiştir. Bu örneğe göre her bir modülün kapasitesi 0,5 kWh ve gerilimi 7,5 V'tur. 240 modül vardır.

Her 15 modülün paralel bağlanması, her son bölümün (veya yığının) 7,5 V ve kapasitesi 7,5 kWh olacaktır. 16 bölüm (veya yığın) serisinde, son pil paketi toplam 120 V olacak ve toplam kapasitesi 120 kWh olacaktır (Bondarenko ve diğ., 2019).

90 kWh pil paketi ile çalışan Tesla Model S P85, 16 pil paketine sahip. 7104 adet silindirik tip 18650 boy hücreler bir kutu içerisine seri ve paralel bağlı olarak monte edilmiştir (URL-16).

2.5. Temel Pil Tanımları

2.5.1. Teorik Pil Potansiyeli, Kapasitesi ve Enerjisi (mAh/g)

Bir pilin teorik potansiyel ve kapasitesi anot ve katot aktif maddelere bağlı olarak değişir (Göktepe, 2009). Bu, serbest enerji veya deneysel olarak hesaplanır.

Pilin potansiyeli, şu şekilde hesaplanır;

Standart pil potansiyeli = Anot (yükseltgenme potansiyeli) + Katot (indirgenme potansiyeli)

Örneğin; $Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$ reaksiyonunda standart potansiyeli Denklem 2.13 ve 2.14'de verilmiştir.

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-} - (-0{,}76\ V) \quad (2.13)$$

$$Cl_2 + 2e^{-} \rightarrow 2Cl^{-} \qquad E° = +1.36\ V \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve 2.14'den E^0_{pil} = 2,12 V olarak bulunur. Konsantrasyon ve sıcaklık değerleri pilin potansiyel değerini etkilemektedir (Göktepe, 2009).

Bir pilin teorik kapasitesi pildeki aktif maddelerin miktarına bağlıdır. Elektrokimyasal reaksiyonlardaki yük miktarı en yaygın şekilde ampersaat ile ifade edilmekte olup pilin kapasitesi aktif maddelerden sağlanan akım miktarı olarak ampersaat cinsinden belirtilir

(Göktepe, 2009). Faraday kanunlarına göre; (1) Belli miktardaki akım uygulandığında elektrotlarda toplanan madde miktarı elektrolit içinden geçen yük miktarı ile doğru orantılıdır, (2) 1 Faraday değerinde (96500 C) akım miktarı her maddenin bir eşdeğer gramının ayrışmasına sebep olur. Bu ifadeler denklem 2.15'de şu şekilde formülize edilebilir;

$$Q = \int_0^t i.\,dt = F.\,egs \tag{2.15}$$

Bu denklemdeki;

Q; yük miktarı,

İ; amper cinsinden akım,

T; saniye cinsinden zaman,

F; Faraday sabiti 96500 C'dir.

Akım sabitse eşitlik denklem 2.16 ve 2.17'de şu şekilde yazılabilir:

$$Q = i * t = F * \text{eşdeğer miktar (egs)} \tag{2.16}$$

$$egs = \frac{i.\,t}{F} \tag{2.17}$$

Bir maddenin eşdeğer gramı; aktif maddenin molekül ağırlığının, reaksiyon esnasındaki elektron alışverişindeki elektron sayısına bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Bir pilin teorik kapasitesi, yalnızca reaksiyona katılan aktif maddelere bağlı olarak tepkimeye giren maddelerin eşdeğer ağırlığından hesaplanır. 1 eşdeğer gramın 96500 C veya 26,8 Ah değere sahip olduğu bilinmektedir (Göktepe, 2009).

Katot aktif maddesi $LiFePO_4$ olan pilin teorik kapasitesi 170 mAh g^{-1}'dir. Bu teorik kapasite şu şekilde hesaplanır

Li atomunun ağırlığı = 6,94 g/mol

Fe atomunun ağırlığı = 55,84 g/mol

O atomunun ağırlığı = 16 g/mol

P atomunun ağırlığı = 30,97 g/mol

$LiFePO_4$'in moleküler ağırlığı = 157,75 g/mol

Lityum eşdeğer ağırlığı = Lityum atomik ağırlığı/alınan-verilen elektron sayısı = 6,94/1 = 6,94, 1 eşdeğer gram için $LiFePO_4$ 157,75 g/mol dur.

$LiFePO_4$'in teorik kapasitesi 26800 mAh / 157,75 g/mol veya 169,88 mAh/g olur (Göktepe, 2009).

2.5.2. Serbest Enerji (ΔG°)

Bir reaksiyon esnasında sistemin serbest enerjisinde bir azalma gerçekleşir. Durumun denklemi 2.18'de şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta G^o = -nFE^o \quad (2.18)$$

Burada,

F = Faraday sabiti (96500 C veya 26,8 Ah),

n = Reaksiyon esnasında alınan veya verilen elektron sayısı,

Eo = Standart potansiyel (V), (Göktepe, 2009).

2.5.3. Nominal Gerilim (V)

Pil üzerinde yazılmış referans voltaj değeri ve normal çalışma gerilimi olarak tanımlanır (Özcan ve diğ., 2021). Pilin gerilimi, elektrokimyasal reaksiyonların Serbest Gibbs Enerjisi tarafından belirlenir.

$$\Phi = \mu i + Zi.F.\varepsilon \quad (2.19)$$

Denklem 2.19'da

μi: pil bileşenlerinin elektrokimyasal potansiyeli,

Zi: bileşiklerin kimyasal potansiyeli,

F: faraday sabiti,

ε: elektriksel potansiyel,

Elektriksel potansiyel ve kimyasal potansiyelin toplamından ibarettir (Biçer, 2012).

Elektrokimyasal potansiyel zamanla katot ve anotta dengeye ulaşır, bu sebeple pilin gerilimini bulmak için Nernst eşitliği 2.20 kullanılır (Biçer, 2012).

$$\Delta\varepsilon = (1 / Zi.F).\ (\mu_{katot} - \mu_{anot}) \qquad (2.20)$$

Hücre gerilimi ile iki elektrot arasında hareket eden lityum iyonlarının kimyasal potansiyeli ifade edilmektedir (Biçer, 2012).

2.5.4. Teorik Enerji (Wh)

Pilin teorik enerjisi, potansiyel ve elektriksel yük miktarları dikkate alınarak (watt.saat) olarak bulunur. Değeri, belli bir elektrokimyasal sistem tarafından sağlanan maksimum değer Denklem 2.21'de gösterildiği şekilde bulunur (Göktepe, 2009).

Wattsaat (Wh) = Potansiyel (V) x Ampersaat (Ah) (2.21)

2.5.5. Şarj-Deşarj Oranı (C)

Pilin şarj-deşarj oranı C/n ile gösterilebilir. Burada C, amper saat olarak (Ah) kapasite oranını n ile deşarj süresi saat olarak verilmiştir (Göktepe, 2009).

C oranı belirlenirken katot aktif bileşeninin toplam kapasitesi hesaplanır. (Göktepe, H., 2009). C ifadesi bir pilin tamamen kapasitesini ne kadar sürede deşarj edilmesini sağlayan akımı gösterir.

1C ifadesi bir pilin kapasitesinin 1 saatte tamamen deşarj edilmesini sağlayan akımdır. 2C ise 30 dakikada kapasitesini tamamen deşarj eden akımı ifade etmektedir.

Aşağıdaki Tablo 2.7'de kapasitesi 10 Ah olan bir pilin çeşitli C değerlerindeki deşarj akımları gösterilmiştir (Biçer, 2012).

Tablo 2.7. 10Ah kapasiteye sahip hücrenin C-oranı değerleri

C Değeri	Deşarj Akımı	Süre
0,1C	1A	10 saat
0,5C	5A	2 saat
1C	10A	1 saat
2C	20A	½ saat
5C	50A	12 dakika
10C	100A	6 dakika
60C	600A	1 dakika

2.5.6. Enerji Yoğunluğu (Wh/kg – W/L)

Pilin her bir deşarj sürecinde enerji miktarıdır. Bu da pildeki malzemelerin (her bir elektrottaki veya tüm pildeki) enerji/kütle (Wh/kg) veya enerji/hacim (Wh/L) cinsleri ile ifade edilir. Teorik enerji yoğunluğu (Wh/kg) ifadesi ile pilin gerilimi kadar sistemin kapasitesi (Ah/kg) ile tanımlanır (Biçer, 2012).

Bir pilin gerçek kapasitesi, akif olmayan pilin yapı elemanları nedeniyle genellikle teorik kapasitesinden daha azdır (Biçer, 2012).

Yüksek deşarj hızında (yüksek güç tüketiminde) kaçınılmaz enerji kayıpları gerçekleşir. Bu kayıpların başında ohmik kayıp gelir (Biçer, 2012).

2.5.7. Güç Yoğunluğu (W/kg)

Pile verilen veya pilden alınan enerji; ağırlıksal (gravimetrik) güç yoğunluğu olarak da adlandırılabilen özgül güç, birim kütle başına en fazla güç miktarı (W/kg) olarak tanımlanır (Özcan ve diğ., 2021).

Pilin şarj edilebildiği veya deşarj esnasındaki maksimum güç, pilin şarj ve deşarj edilebileceği en yüksek hız olarak tanımlanır. Pilin güç yoğunluğu (W/kg); gerilim değeri (V) ile deşarj akım (A/kg) değerinin çarpımı olarak bilinir (Biçer, 2012).

2.5.8. Çevrim Sayısı (Çevrim Ömrü)

Pilin güvenli bir deşarj derinliği seviyesine kadar deşarj ve sonra güvenli bir tam şarj seviyesine kadar şarj edilmesine bir "çevrim" denir. Pilin çevrim ömrü toplam kullanımını bir başka deyişle ekonomik ömrünü tanımlamaktadır. Pilin ömrünü belirlemede esas önemli olan kullanımdaki süresi değil çevrim sayısıdır (Özcan ve diğ.,

2021). Çevrim sayısı ile çevrimdeki deşarj derinliği birbiri ile doğrudan ilintilidir. Pilin çevrim ömrü, yüksek deşarj derinliklerinde tersinmez faz dönüşümleri sebebiyle azalmaktadır (Biçer, 2012).

2.5.9. Teorik Kapasite (Ah)

Pilin teorik kapasitesi, şarj edildiğinde, 1 saat içinde geri verebileceği enerjinin miktarıdır. Birimi Amper.saat (A.h) olarak tanımlanmaktadır.

Pildeki aktif malzemelerin teorik olarak 1 gramı 26,8 Ah veya 96487 Coulomb'dur. Li-ion pilde teorik kapasite elektrokimyasal reaksiyona katkı yapan aktif malzemelerin miktarıdır.

Polimer katot malzemesine sahip Li-ion pilin teorik kapasitesi denklem 2.22'de bulunur.

$$\text{Teorik Kapasite} = \frac{\text{N. F}}{3600\ \left(\frac{\text{Mw}}{1000}\right)} \tag{2.22}$$

N; alınan veya verilen elektron sayısı,

F; Faraday sabiti (96487 C/mol),

Mw; polimerik malzemenin biriminin molekül ağırlığını (gram)

ifade etmektedir (Biçer, 2012).

2.5.10. Pil Ömrü Döngüsü

Pil döngüsü, şarj ve deşarj döngüleri de dahil olmak üzere pilin genel ömrü olarak tanımlanır. Bir Li-ion pilin ömür döngüsü, bir pilin kapasitesi önemli ölçüde düşmeden önce gerçekleştirebildiği toplam şarj ve deşarj döngüsü sayısıdır. Li-ion pil için bu ortalama ömür döngü sayısı sayısı 500 ila 1000 arası bir değerdedir (URL-17).

Li-ion piller kullanılmadığı dönemlerde kendi kendine deşarj olabilmektedir. Aynı zamanda aşırı sıcaklık ve nemden etkilenirler (URL-17).

2.5.11. Deşarj derinliği (DOD)

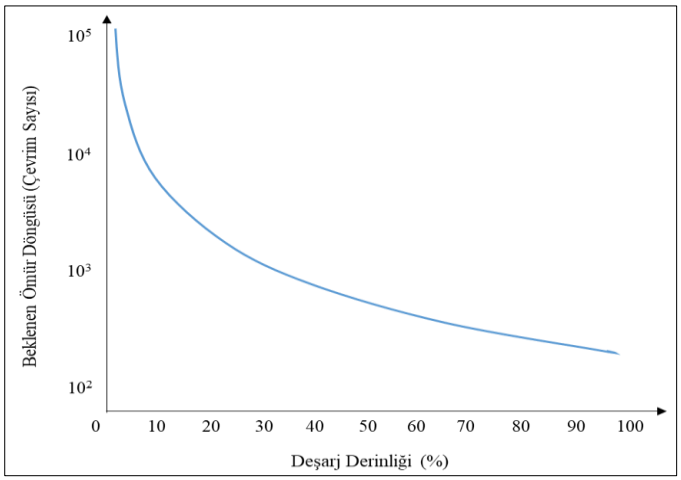
Pilin tam dolu (% 100) durumundan tam boş (% 0) durumuna kadar olan deşarj edilme oranıdır. % 80 DOD ile anlatılan; pilin amper-saat olarak belirtilen kapasitesinin %80'ine kadar deşarj edilmesi olarak tanımlanır (Özcan ve diğ., 2021).

Bu değer pilin ne kadar yaşlandığının bir göstergesidir ve değer ne kadar düşükse üzerine düşen stres nedeniyle eskime hızı da yavaş gerçekleşir. Örneğin 3000 mAh kapasiteli bir pil 1500 mAh e boşaltıldığında DOD değeri %50 olduğu belirtilebilir (URL-17).

Belirli bir sıcaklıkta ve deşarj hızında şarj/deşarj döngüsü başına kimyasal reaksiyonların miktarı, deşarj derinliği ile orantılıdır. Pilin boşalma derinliğinin miktarı, ne kadar fazla kimyasal reaksiyona girdiğini ve pilin ömrünün kısalmasının miktarıdır (URL-17).

Döngü ömrü ile deşarj derinliği arasındaki doğrusal bir bağlantı vardır. Sığ tutulan DOD, pil toplam döngü sayısında üstel bir artışına sebep olmaktadır.

Pil çevrim ömrü %80 deşarj derinliğinde belirtilmektedir. DOD, pil ömrü ile performans arasında denge temsil etmektedir. Derin deşarjlar pil ömrünü kısaltmaktadır, daha sığ deşarjlar ise performans azalmasına sebep olmaktadır (URL-17). Şekil 2.28'de pil çevrim ömrü ile DOD arasındaki ilişkinin grafiği verilmiştir.



Şekil 2.28. Deşarj derinliği ile ömür döngüsü ilişkisi

2.5.12. Şarj Durumu (SOC)

Şarj durumu (SOC), pilin kullanım sonrası kalan kapasitesinin bir ölçüsüdür. Pilin tam kapasitesi üzerinden yüzde kalan değer olarak tanımlanır. 3000 mAh kapasiteye sahip pilin % 50 SOC değerinde kalan kapasitesi 1500 mAh dir (URL-17).

SOC pilin dahili bir durumudur ve doğrudan ölçülemez. Pilin voltaj, akım, sıcaklık ve yaşlanması arasındaki ilişkiye dayanarak tahmin edilebilir (Zhang ve diğ., 2023).

2.6. Termal Stabiliteyi Etkileyen Üzerine Çalışmalar

Lyu ve diğ. (2022), bataryanın içinde oluşan gazların güvenliğe etkisini incelemiş ve bunların operando tekniği ile çeşitli infrared çoklu NDIR gaz sensörleri vasıtasıyla izlenmesi ile ilgili değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Oluşan CO_2 miktarının batarya içindeki akım ve sıcaklık değişkenliği ile değiştiği bulunmuştur.

Ancak CH_4 ve C_2H_4 oluşumu sadece sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Tipik gaz olan CO_2, $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$ tipi pillerin katot elektrodundan oluşan O_2 oluşumuna doğrudan bağlı olduğu ve kritik voltaj değeri olan 4,5 V. altında bu salınım stabil kaldığı tespit edilmiştir.

CO_2 konsantrasyonu izlenmesi, artan miktarda Li_2CO_3 grafit negatif elektrot yüzeyinde deşarj süresince izlenerek farklı sıcaklıklarda ve kesme akımlarında değişmekte olduğu yorumlanmıştır. Deneyler esnasında NCM532 ve LFP tipi piller kullanılmıştır.

Sıcaklık değişiminin O_2 difüzyonuna ve CO_2 değişimine etkisi olmadığı ancak yüksek voltajın elektrod ile elektrolit arasındaki elektrokimyasal reaksiyon oranına etkisinin olması sebebiyle CO_2 konsantrasyonunu arttışına sebep olduğu belirtilmiştir. NCM532 ve LFP tipi bataryalarda sıcaklık sebebiyle elektrolit bozunumu ile birlikte CH_4 ve C_2H_4 gazlarının oluşumu CO_2 gazına göre daha hassas ölçüm olanağı vermektedir.

(Chen ve diğ., 2017) 18650 silindirik şekilli ve katot kimyası $LiCoO_2$ (LCO) olan bataryalarda çalışmalarında iki farklı atmosfer basıncında termal kaçak durumuna girmesini etkileyen unsurları incelemişlerdir. Bu tür durumlar özellikle atmosfer basıncının azaldığı hava yolu ile Li-İo batarya taşımacılığında ve uzay mekiklerinde kullanılan bataryaları etkileyebilmektedir. Yapılan deneyler deniz seviyesine yakın

(100,8 kPa, 24 m) ve nispeten yüksek bir irtifada (64,3 kPa, 3650 m) ve farklı SOC seviyelerinde yürütülmüştür. Elde edilen bulgular SOC seviyesindeki farklılıkların yanma davranışında farklılık olmasının en önemli özelliği oldıuğunu göstermiştir. SOC artmasıyla kütle kaybının artması, tutuşma için gereken sürenin azalması ancak THR ve HRR değerlerinde değişiklik olmaması gözlemlenmiştir. Bununla birlikte % 50 SOC durumunda THR ve HRR değerinde en fazla pik değer görülmüştür. % 100 SOC değerinde THR ve HRR'ın pik değerinin daha az olması ise salınan gazların yanmasının tamamlanmamasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüksek irtifalardaki yanmalarda batarya başına kütle kaybının daha fazla olduğu ve bataryanın tutuşma hızının arttığı görülmüştür. Düşük irtifalarda THR, HRR ve kütle kaybı daha az olduğundan bataryaların irtifa değişikliklerine karşı düşük SOC seviyesinde tutulması gerektiği çalışmadan çıkartılmıştır.

Fazla şarj ve fazla ısınmanın tam ölçekli batarya üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve fazla şarj etmenin daha fazla HRR, kütle kaybı, daha fazla yanıcı gaz salınımına sebep olmasından ötürü daha zararlı olduğu gözlemlenmiştir. Açık havada ise ısıtılma sonucu termal kaçak mekanizmasının oluşumu fazla şarj sonucu oluşumundan daha hızlı gelişmektedir (Huang ve diğ., 2021).

Liu ve diğ. (2022) 18650 tipi ve NCM katod malzemesine sahip bataryaları 4,2 V (% 100 SOC), 4,4 V (% 114 SOC), 4,6 V (% 127 SOC) and 4,8 V (% 142,84 SOC) şarj durumlarında yaptıkları çalışmalarda hafif olarak fazla şarj ile zorlanan bataryaların 4.6 V ve altı kaldığı durumlarda termal stabilitelerinin katod yapısında değişiklik nedeniyle azaldığı ve 4.6 V ve üzerindeki zorlanma değerlerinde ise lityum tabakalaşması nedeniyle termal stabilite azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte hafif fazla şarj etmek, iç direnci arttırmakta bu da batarya içinde ısı üretimini arttırmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda yüksek SOC ve düşük ısı durumu düşük SOC ve yüksek ısı barındıran durumlara göre bazen daha tehlikeli olabilmektedir. Şarj işlemi esnasında ısı üretiminin ve SOC durumunun kontrol altında tutulması önemli olduğu sonucuna varılmaktadır.

Chen ve diğ. (2019) çevresel basınç etkisinin iki farklı katot kimyasalına ($LiFePO_4$ ve $LiCoO_2$) ait 18650 tipi pillerin farklı SOC durumuyla birlikte termal kaçak durumu ve toplam kütle kaybı, toplam ısı yayınımı arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

Deneyler esnasında Sony marka silindirik 18650 tipi ve $LiFePO_4$ kimyasalına sahip standart voltajı 3,2 V. olan ve % 0, 50, 100 değerlerde olan pil hücresi. Samsung marka silindirik 18650 tipi ve $LiCoO_2$ kimyasalına sahip standart voltajı 3,7 V. olan ve % 0, 50, 100 değerlerde olan pil hücresi iki farklı çevresel basınç altında kullanılmıştır. Şarj miktarı (SOC) toplam ısı yayılımı (THR), toplam kütle kaybı (TML) etkisi gözlemlenmiştir. SOC fazla olan pillerin TML ve THR değerlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda çevresel basıncın kütle kaybına etkisinin az olduğu ortaya konulmuştur. Çevresel basıncın yanma ısısına doğrudan etkisi olduğu ortaya konulmuştur. THR değeri 100,8 kPa basınç değeri 64,3 kPa basınç değerine göre daha fazla olduğu ortaya konulmuştur. Bu değerlerin karşılaştırması özellikle havayolu vasıtasıyla gerçekleştirilen pillerin taşınmasında önem kazanmaktadır. Düşük basınç altında gerçekleşen uzun taşınma süresi dikkate alınarak değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Yang ve diğ., 2023, mevcut çalışmaları özetlediği çalışmalarında, elektrikli taşıtlarda karşılaşılan arızalarının ve acil durumların % 60'ını lityum-iyon bataryalar oluşturduğunu ve arızanın hızlı yayılımı, kısa kaçış süresi ve yangınların kolay başlaması özelliklerini belirtmiştir. Bu nedenle de lityum-iyon bataryaların güvenliğinin iyileştirilmesine öncelik verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Lityum-iyon pil yangınları tamamen önlenmesi zor olduğundan, pil yapısını iyileştirerek yangınların önlemesi ve uygun yangın söndürme maddeleri ve yöntemleri geliştirerek de çalışmaların tamamlanmasını önermektedir. Bataryaların güvenliğini artırmak ve arıza riskini en aza indirmek için tasarım, üretim, kullanım ve bertarafın tüm aşamalarında pratik bir kademeli uyarı sistemi oluşturmaya gereksinim olduğu belirtilmiştir.

Elektrolitin geliştirilmesi, batarya arızası ve yangın olasılığını büyük ölçüde azaltabilir ve batarya performansını artırabilir. Ancak, kararsız elektrolit-elektrot temas arayüzü ve daha az döngü gibi uygulamayı kısıtlayan sorunlar vardır. Sodyum-iyon bataryaları daha iyi teorik maliyetlere ve daha yüksek güvenliğe sahiptir, ancak enerji yoğunlukları daha düşüktür ve yalnızca daha kısa menzilli taşıtlar için kullanılabilmektedirler.

Arızalar arasındaki dış parametrelerdeki farklılıklar belirsiz olduğundan, bataryanın iç durumunu doğru bir şekilde tahmin etmek için akım, voltaj ve sıcaklık gibi temel verilere dayanarak batarya sisteminde yaklaşan arızaları tahmin etmek zordur. Mevcut

çalışmalarda tek arızaların uyarılmasına odaklanmış ve çoklu arızaların birleştirilmesine daha az odaklanmıştır.

Bazı arıza uyarı algoritmaları geniş bir zaman aralığında arızaları uyarabilmektedir, ancak çeşitli arıza türleri için uyarı süreleri algoritmalar arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Algoritmalar yalnızca bir arızanın meydana gelip gelmediği konusunda uyarıda bulunabilmekte, ancak uyarı süresini ve arızanın ciddiyetini verememekte ve yolcular algoritmalarla ne yapmaları gerektiği konusunda bilgilendirilememektedir. Bu nedenle, pratik uygulamaların gereksinimlerini karşılayamamakta, bu da arıza uyarı algoritmalarının gerçek taşıtlarda uygulanmasını sınırlamaktadır.

BMS, genellikle yol koşullarında voltaj, akım ve sıcaklık bilgilerini izler ve çıkarılabilecek özellikler azdır, bu nedenle bu aşamadaki küçük arızalar için uyarının doğruluğu zayıftır veya hatta küçük arızaların meydana gelmesini yakalayamaz. Aynı zamanda, orta ve uzun vadeli uyarılar yetersiz özelliklere sahiptir ve taşıt ortamı son derece değişkendir, bu da toplanan verilere kolayca müdahale edebilir, bu da algoritmanın hem yanlış alarm oranı hem de cevapsız alarm oranı gereksinimlerini karşılayamamasına neden olur. Kısa süreli uyarılar kısa uyarı sürelerine, yolcuların kaçması için yetersiz zamana ve acil durum önlemlerinin eksikliğine sahiptir. Bu sorunların bir sonucu olarak, algoritma gerçek taşıtlara uygulanamamakta ve batarya arızası konusunda etkili bir kademeli uyarı elde edilememektedir.

(5) Elektrikli taşıt yangınları için tasarlanmış yangın söndürme maddelerinin eksikliği söz konusudur. Batarya yangınlarıyla karşılaşıldığında, geleneksel yangın söndürme maddelerinin etkisi genellikle tatmin edici değildir, yangınların hızlı bir şekilde kontrol altına alınmasını ve tamamen söndürülmesini sağlayamaz ve yeniden tutuşmaya eğilimlidir.

Daha güvenli batarya yönetimine ulaşmak için, gelecekteki araştırmalar şu alanlara yoğunlaşılmalıdır;

Bataryaların ve batarya sistemlerinin güvenlik tasarımının iyileştirilmesi. Şu anda yapılan iyileştirmeler ve yeni kimyasal sistem bataryalarının geliştirilmesi hızla ilerlemektedir, ancak kısa vadede LiB'lerin yerini alacak olgun ve güvenilir ürünler mevcut değildir. Bu

nedenle, bir yandan kimyasal sistemin iyileştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmeli, diğer yandan da yangın sorunu en kısa sürede temelden çözülmelidir.

Bataryanın yapısal mukavemetini arttırmak için bilgisayar destekli tasarım ve yapısal mukavemet analizi uygulanmalı "Hücreden Gövdeye (CTB)" gibi teknolojiler, enerji yoğunluğunu azaltmadan taşıt gövdesinin mukavemetini arttırmak, harici darbe altında bataryanın güvenliğini sağlamak ve bataryanın termal kaçak riskini azaltmak için uygulanmalıdır.

Yalnızca voltaj, akım ve sıcaklık verilerini kullanarak bataryanın iç durumunu doğru bir şekilde belirlemek zordur. Bataryanın iç durumunun doğru bir şekilde değerlendirilmesini, kararlılık, güvenilirlik, maliyet ve boyutlarının gerçek dünyadaki taşıt uygulamalarının koşullarını karşılamasını sağlamak için yeni sensörlerin veya algoritmaların tasarlanması gerekir.

Daha doğru iç durum gözlemlerine dayalı arıza uyarı algoritmalarının geliştirilmesi, uzun vadeli arızalar için arızanın türü ve ciddiyeti belirlenebilir ve uygun tavsiyeler verilebilir. Kısa ve orta vadeli arızalar için, daha uzun uyarı süreleri ve daha yüksek doğruluk oranları elde edilebilir ve yolcuların zamanında harekete geçmesini kolaylaştırmak için ciddiyet ve tespit süreleri sağlanabilir. Sıradan yolcular arızanın ciddiyetinin farkında olmadıklarından, arızanın gelişimine bağlı olarak beklenen bir bozulma süresi sağlamak önemlidir ve bir bozulma süresi vermek yolcuların sorunu görselleştirmesine ve bununla başa çıkmasına veya kaçmasına olanak tanıyarak algoritmanın kullanışlılığını büyük ölçüde artırır.

Taşıtlar daha akıllı hale geldikçe, gerçek dünya büyük verilerinin ölçeği büyür ve şarj ve deşarj verileri ve sürüş verileri gibi gerçek dünya büyük verilerinde bulunan taşıt bilgileri, taşıt arıza teşhisi için bilgi sağlayabilir ve aracın hedef kullanım durumuna göre hedeflenen güvenlik tasarımını kolaylaştırabilir.

Daha yüksek SOC aralığında bataryanın şarjlı tutmak istenmesi, risk olgusunu da arttırmaktadır. Bu nedenle arıza uyarı ve izleme önlemleri batarya güvenliğini sağlamak tasarlanması elzemdir. Kullanıcıların sürüş alışkanlıkları, şarj alışkanlıkları, kullanım

ortamı ve diğer faktörlerle ilgili verileri birleştirerek, aracı güvenliği odakta tutacak bir şekilde ayarlamak için makine öğrenimi ve sinir ağı yöntemleri tanıtılmaktadır.

Batarya yangınları iç kimyasal reaksiyonlarla yakından ilişkilidir, bu nedenle bataryaların fiziksel ve kimyasal özellikleri için yeni yangın söndürme maddelerinin araştırılması ve yangınların hızlı bir şekilde söndürülmesini sağlamak ve yeniden alevlenmeyi önlemek için bozuk pil hücrelerinin iç kimyasal reaksiyonlarını azaltma perspektifinden bir yangın söndürme sistemi oluşturmaya çalışmak gerekir. Aynı zamanda, elektrikli taşıt yangınlarının neden olduğu kişisel yaralanma ve maddi hasarı en aza indirmek için otonom sürüş teknolojisi ile birlikte aktif izleme, alarm ve yangın söndürme işlevlerini aktif olarak geliştirmek yönünde çalışmalar yürütülmesi gereklidir.

Li-ion pillerdeki ayırıcı separatör, elektronik teması önleme ve pilin çalışması sırasında iki elektrot arasında lityum iyon taşınmasını sağlayan kritik bir bileşendir. Islanabilme ve gözenekli özelliklerin yanı sıra, güvenilir bir Li-ion oluşturmak için istenen separatör membranın yüksek kimyasal/elektrokimyasal kararlılığa, yüksek termal kararlılığa ve mükemmel mekanik özelliklere sahip olması gerekir. Genel olarak, Li-ion piller için yaygın ayırıcılar polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi poliolefn membranlardır, ancak bunlar sırasıyla 130 ℃ ve 170 ℃ sıcaklıklarda eritilir (Chung ve diğ. 2009). Erime işlemi sırasında, ayırıcıların mikro gözenekleri yok olmakta, bu da Li iyonlarının elektrotlar arasındaki yolunu izole edecek ve Li-ion pil iç direncini büyük ölçüde artıracaktır (Orendorf ve diğ. 2012). Ayırıcı erirse, büyük miktarda ısı üretimine yol açabilecek ve termal kaçışları tetikleyebilecek dahili kısa devre meydana gelmektedir (Yamamoto, ve diğ., 2003; Xiang ve diğ., 2016).

2.6.1. Yüksek Termal Stabiliteye Sahip Yeni Separatörler

Zayıf termal stabiliteye sahip poliolefn membranların yapısından kaynaklanan eksikliğinin üstesinden gelmek için yeni tür separatör önerilmiştir. Yüksek ısıya dayanıklı polimer malzemelere dayanan bu separatörlere büyük önem verilmektedir.

Bunlara örnek olarak; poli(m-fenilen izoftalamid) (PMIA), poliimid (PI), poli(etilen tereftalat) (PET) ve poli(ftalazinon eter sülfon keton) (PPESK) 250 °C - 500 °C'e kadar

son derece yüksek termal stabiliteye sahiptir (Gong ve diğ. 2019) ve geleneksel poliolefn membranlara göre bariz bir avantaj sağlamaktadır.

Bununla birlikte, büyük gözenek boyutunun, homojen olmayan gözenek dağılımının yapıdaki dezavantajları; kendi kendine deşarja ve lityum dendritlerinin oluşmasıdır (Zhang ve diğ., 2016; Lee ve diğ., 2012). PVDF/PMIA/PVDF, PE/PI ve PPESK/PVDF membranlar gibi dokunmamış separatörlerin modifiye edilmesi öne sürülmüştür (Shi ve diğ., 2015; Zhai ve diğ., 2014).

PE/PI membranın performansı, PP/PE/PP separatörlerle karşılaştırıldığında (Shi ve diğ., 2015). Al_2O_3, SiO_2 ve TiO_2 gibi bazı inorganik partiküller de elektrokimyasal stabilitesini artırmak için dokunmamış membranı kaplamak için kullanılmaktadır (Lee ve diğ., 2012; Jeon ve diğ., 2014; Lee ve diğ., 2014).

Selüloz kağıt bazlı separatörler düşük üretim maliyetleri, iyi mekanik özellikleri ve yüksek elektrokimyasal kararlılıkları nedeniyle umut vericidir (Jiang ve diğ., 2015; Krol ve diğ., 2015).

Bununla birlikte, makro/mikrofiber selüloz kağıtlar, uygun olmayan gözenekli yapı ve zayıf mekanik/fizikokimyasal özellikleri kendine özgü dezavantajları oluşturmaktadır (Chun ve diğ., 2012).

Kaplama, bu dezavantajların üstesinden gelmek için etkili bir yol olarak önerilmektedir. Al_2O_3 tozlarını ticari kağıt alt tabakaların yüzeyine püskürterek kağıt destekli inorganik kompozit (PIC) membranlar hazırlamış ve bu da penetrasyon testini iyileştirmeye yardımcı olmuştur. Test sırasında, PIC separatör grafit/$LiCoO_2$ tam hücrelerinin sıcaklığı yavaşça 180 ℃'ye yükselmekte ve voltaj 3,78 V olarak kalmaktadır.

Buna karşın, PE separatörlü grafit/$LiCoO_2$ tam hücreleri şiddetli bir şekilde reaksiyona girmiş ve sıcaklık keskin bir şekilde 329 ℃'ye yükselirken, voltaj hızla 0 V'a düşmüştür. PIC membranı, PE'nin 4,2 V'undan daha yüksek olan 4,5 V (Li^+/ Li'ye karşı) oksidasyon ayrışma voltajı ile yüksek elektrokimyasal kararlılık sergilemektedir (Wang ve diğ., 2018). Termal kararlılığa ve güçlü elektrolit ıslanabilirliğine sahip inorganik separatör malzemelerin kullanılması önerilmektedir.

Al_2O_3 ve SiO_2'den oluşan saf inorganik separatörler sırasıyla 2054 ℃ ve 1650 ℃'ye kadar son derece yüksek termal kararlılık göstermektedir (Xiang ve diğ., 2011; Chen ve diğ., 2014.a).

Bu tür separatörler aynı zamanda mükemmel elektrokimyasal performans ve güçlü basınç dayanımı sergiler. Ancak zayıf esneklik ve gerilme mukavemeti geniş ölçekli uygulamalarını kısıtlamaktadır (Xiang ve diğ., 2011).

İnorganik separatörlerin gerilme mukavemetini artırmak için, bir miktar termal performanstan ödün vermelerine rağmen polimer bağlayıcılar kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak PVDFHFP ile $MgAl_2O_4$ bazlı seramik membranlar (PCM'ler) kullanıldığında, termal stabilite polimerler tarafından azaltılmış olsa da, düşük bağlayıcı oranına sahip PCM membranı 350 ℃'ye kadar sıcaklığa dayanmıştır (Raja ve diğ., 2014). Benzer şekilde, bağlayıcı olarak stiren-bütadien kauçuk (SBR) ile Al_2O_3 bazlı seramik membranlar hazırlanmıştır (Zhang ve diğ., 2016). Bir başka çalışmada ise filtrasyon prosedürü ile etkileyici esnekliğe sahip Al_2O_3 nanotellerinden oluşan saf bir seramik membran geliştirmiş ve bu da saf inorganik membranların kırılganlığının üstesinden gelme konusunda yeni bir anlayış sağlamıştır (He ve diğ., 2015).

Yüksek termal kararlılığa ve güçlü mekanik özelliklere sahip separatör, dahili kısa devre oluşumunu büyük ölçüde engelleyebilse de, Li-ion pilin güvenliğini artırmak için seperatöre bazı özel işlevler eklenmiştir. Elektrolitlere yangın geciktiricilerin eklenmesinin Li-ion pillerin yanmasını bastırmak için etkili bir yol olduğu kanıtlanmıştır (Shim ve diğ., 2007).

Ancak çoğu durumda, ilave edilen yangın geciktirici, Li-ion pillerin zayıf elektrokimyasal performansı vermesine sebep olmaktadır (Yim ve diğ., 2015).

Yangın söndürme maddelerinin otomatik bir yangın söndürme cihazı olarak seperatöre dahil edilmesi önerilmiştir. Li-ion pillerin kendi kendini söndürme kabiliyetini gerçekleştirebilecek, sıcaklığa duyarlı mikrokapsülleri yangın söndürme maddeleriyle entegre edilmesiyle modifiye edilmiş yeni bir separatör ortaya konmuştur. Söndürme maddesi olarak (1,1,1,2,3,4,5,5,5-dekafloro-3-metoksi-4-(trifuorometil)-pentan) (DMTP) ve sıcaklığa duyarlı polimerik katman olarak PMMA'yı seçilmiştir. Çivi

penetrasyon testi yapıldığında, sıcaklığa duyarlı mikrokapsüllerin sıcaklık değişimini bastırabildiği saptanmıştır (Yim ve diğ., 2015). Sıcaklığa duyarlı mikrofiberler çekirdek-kabuk yapısıyla entegre edildiği yeni bir seperatör geliştirmiştir. Söndürücü madde (çekirdek) olarak trif enil fosfat (TPP) ve sıcaklığa duyarlı kabuk olarak PVDF-HFP kullanılmıştır (Liu ve diğ., 2017). Sıcaklık, sıcaklığa duyarlı kabuğun erime noktasına kadar arttığında, kapsüllenmiş söndürme maddesi elektrolit içine salınmakta ve sıcaklık artışı etkili bir şekilde bastırılmaktadır (Yim ve diğ., 2015; Liu ve diğ., 2017).

Polipirol, politiyofen ve politrifenilamin gibi bazı elektroaktif redoks polimerleri, oksidasyon sırasında elektronik olarak iletken bir faza p-katkılı hale getirilebilir ve indirgeme esnasında nötr izolasyon durumuna tersine çevrilebilir şekilde n-katkılı hale getirilebilir (Zhang ve diğ., 2013; Kim ve diğ., 2012).

Bu özellik, aşırı şarj durumunda şarj akımını manevra etmek için dahili bir iletken bypass üretebilen potansiyele duyarlı separatörler geliştirerek Li-ion pillerin aşırı şarj olmasını önlemek için yeni bir strateji sağlamaktadır (Kim ve diğ., 2012). Potansiyele duyarlı separatörler hazırlamanın yaygın yolu, elektroaktif redoks polimerlerini separatör membranların gözeneklerine dahil etmektir (Kim ve diğ., 2012; Li ve diğ., 2011). Ticari PE separatörü modifiye etmek için poli(4-metoksitriphe nilamin) (PMOTPA) kullanıldığında yapılan aşırı şarj testi, bu potansiyele duyarlı separatör ile LFP/LTO tam hücresinin voltajının yaklaşık 2,6 V altında güvende kaldığı çalışılmıştır (Kim ve diğ., 2012). Benzer şekilde, $LiFePO_4$/C hücrelerinin voltajını 4 V'un altında güvenli bir değerde tutabilen poli(3-desil tiyofen)-modifiye edilmiş bir separatör hazırlanmış, elektrolit çözeltisinde çözünmüş Mn katyonunun neden olduğu güvenilirlik ve güvenlik sorunları üçlü oksit katotlarda başarı göstermiştir (Li ve diğ., 2011).

Separatörlerin belirli kimyasal işlevlerle modifiye edilmesinin Mn katyonlarının hareket yolunu kapatmak için etkili bir yol olduğu belirtilmiştir. Makromolekül veya organik asitlerin alkali metal tuzları ile işlevselleştirilmiş polimerik matrislerin Mn katyonunu etkili bir şekilde hapsedebileceği belirtilmiştir (Ziv ve diğ., 2014; Banerjee ve diğ., 2017a; Li ve diğ., 2014a; Banerjee ve diğ., 2017b)

Poli(vinilbenzo 18-crown-6) (PVB-18C6) ve poli(divinilbenzen-(vinilbenzil-aza-15-crown-5)-vinilbenzilklorür)) (PVB-A15C5) (Li ve diğ., 2014) eterler ve poli(etilen-

alternat-maleik asit) (PE-alt-MaLi2) dilityum tuzu ile modifiye edilen separatörler, Mn türlerini chelate için parlak bir yetenek göstermektedir. Formerlerle karşılaştırıldığında PE-alt-MaLi$_2$ daha iyi işlevsellik sergilemektedir. Fonksiyonel separatöre sahip hücrelerde grafit anot üzerindeki Mn miktarının %80'in üzerinde azaltılabildiği bulunmuştur (Banarjee ve diğ., 2017a).

PE ve PP'nin farklı erime noktalarının avantajlarından yararlanılarak, kendi kendine kapanma özelliğine sahip modifiye edilmiş bir poliolefn membran geliştirilmiştir (Li ve diğ. 2015).

Üç katmanlı yapılandırılmış bir PP/PE/PP separatöründe daha yüksek erime noktalarına sahip PP katmanları separatörün çökmesini önlemek için çerçeve görevi görürken, ortadaki PE katmanı kapatma rolünü oynar. Ancak, sıcaklık PP'nin erime noktasının üzerine çıkmaya devam ederse bu tür separatörler yine de başarısız olabilir. Poliolefn membranların termal stabilitesinin daha da iyileştirilmesi arzu edilir, etkili olan bir yol olarak; yüksek sıcaklık ve voltaj toleransına sahip diğer polimerlerin bir katmanını kaplamaktır. Fiziksel yöntemle bir makro gözenekli poliarilat (PAR) tabakası kaplanarak PE ayırıcıların termal kararlılığı geliştirilmiştir. Bu sayede modifiye edilmiş separatörün erime sıcaklığı 194 ℃'ye kadar yükseltilmiştir (Roh ve diğ., 2011). Ancak bu fiziksel bağ o kadar zayıftır ki kaplanan katman döngü sırasında soyulabilir (Hu ve diğ., 2016). Buradaki sorunun üstesinden gelmek için, güçlü kendi kendine polimerizasyonu ve yüksek hidrofilikliği nedeniyle poliolefn membranları modifiye etmek için dopamin kullanılmıştır (Hu ve diğ., 2016; Waite, 2008). Bir başka çalışmada ise PP separatörler üzerine aramid nanofber (ANF) sıkıca kaplamak için aracı olarak dopamin kullanılmış ve kararlı döngü performansı ve gelişmiş termal stabilite elde etmiştir (Hu ve diğ., 2016). Bunun yanı sıra, diğer polimerize edilebilir monomerler UV, elektron ışınları ve γ-ışını ışınlaması ile kimyasal bağlarla poliolefn ayırıcıya adapte edilmiştir (Lv ve diğ., 2012; Yamamoto ve diğ., 2003; Ko ve diğ., 2004). Elektron ışını ışınlama tekniği ile siloksan ile aşılanmış PE membranlar hazırlanmıştır (Lee ve diğ., 2009). Mükemmel çevrim performansı ve gelişmiş termal kararlılığın yanı sıra, aşılı PE ayırıcı gelişmiş elektrokimyasal kararlılık göstermektedir. Bu şekilde 5,2 V'a kadar stabil kalabilir, bu da yüksek voltajlı Li-ion pillerin tasarlanmasına ve aşırı şarj dayanıklılığının geliştirilmesine yardımcı olmaktadır (Lee ve diğ., 2009). Polimerlerin yanı sıra, yüksek termal stabiliteye

ve alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2) ve silikon dioksit (SiO_2) gibi mükemmel mekanik özelliklere sahip seramik malzemeler de poliolefn membranları kaplamak için uygulanmıştır (Ko ve diğ., 2004; Zhu ve diğ., 2016). Daha iyi kaplama etkisi elde etmek için, polimer bağlayıcılar genellikle seramik malzemeleri membranlara kaplamak için aracı olarak kullanılır (Xiang ve diğ., 2016), bu da modifiye edilmiş membranın nihai performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Al_2O_3/poli(viniliden fuorid-ko-heksafuoropropilen) (PVDF-HFP) kompozitlerinin, kaplama maddesi Al_2O_3 termal olarak kararlı olmasına rağmen PP separatörlerin termal kararlılığını azaltmaktadır. Sıcaklığın yaklaşık 140 ℃ 'ye yükselmesi, PVDF-HFP bağlayıcının erimesi, Al_2O_3 partiküllerinin topaklanmasına neden olmaktadır. Bu da PP membranların büzülmesi için güçlü bir itici güç oluşturmaktadır.

Aksine, daha yüksek termal kararlılığa sahip poliimid (PI) P84 (Lee ve diğ., 2015) ve fenolftalein polieterketon (PEK) daha iyi seçenekler olarak kanıtlanmıştır (Wang ve diğ., 2015). Bununla birlikte, geleneksel kaplama yöntemi, ayırıcıların gözeneklerini tıkaması nedeniyle hücre iç direnci artıracak aşırı polimer bağlayıcılar nedeniyle kalın membranlar elde etmek kolaydır (Zhu ve diğ., 2016). Ayırıcıların arayüzey direncini azaltmak ve döngü stabilitesini artırmak için aşılama. ALD ve magnetron püskürtme biriktirme (MSD) gibi bağlayıcı içermeyen kaplama yöntemleri önerilmiştir (Zhu ve diğ., 2016; Zhu ve diğ., 2015; Nho ve diğ., 2017; Chen ve diğ., 2014.a; Peng ve diğ., 2015) elektron ışınlarıyla yeni SiO_2-aşılı PE ayırıcılar ve TiO_2-aşılı PE ayırıcılar geliştirilmiştir (Zhu ve diğ., 2016; Zhu ve diğ., 2015).

TiO_2 aşılı PE ayırıcıların hazırlanma mekanizmalarını göstermektedir; elektron ışını ışınlaması, TiO_2'nin düzgün bir şekilde kaplanmasını hızlandıran kusurlar oluşturmak için kullanılır (Zhu ve diğ., 2016). Kaplama malzemeleri ve ayırıcılar arasındaki kimyasal bağlar, TiO_2 aşılı PE ayırıcıların stabilitesini artırmak için kritik faktördür (Zhu ve diğ., 2016). ALD veya MSD yöntemiyle PP membranlar üzerine ultra ince TiO_2 filmleri biriktirilmiştir. Modifiye edilmiş PP ayırıcı, termal büzülmeyi ve zayıf ıslanabilirliği etkili bir şekilde önleyebilmiştir.

Bununla birlikte, özel ekipman ve tekniklere olan talep, kimyasal aşılamayı büyük ölçekli uygulamalar için zorlaştırmaktadır (Chen ve diğ., 2014.b; Peng ve diğ., 2015).

2.6.2. Alternatif Lityum Tuzları

$LiPF_6$, iyi iyonik iletkenliği ve alüminyum akım toplayıcıları pasifleştirme yeteneği nedeniyle ticari olarak bir lityum tuzu olarak kullanılır, ancak kolayca hidrolize olur ve yüksek sıcaklıkta toksik ve aşındırıcı gazlara ayrışır (Kalhoff ve diğ., 2015). Kompleks anyonlara sahip alternatif lityum tuzları aramak, veya $LiPF_6$'nın modifikasyonu termal kararlılığı artırmak için etkili olacaktır. Yapılan çalışmalarda daha kararlı $LiPF_6$ türevleri oluşturmak için; flüorür atomlarını kısmen ikame ederek $LiPF_6$'nın modifikasyonu, $LiPF_6$'nın termal kararsızlığını çözmek için; bazı çalışmalar bir veya daha fazla flüor atomunu ikame etmek için hidrofobik ve elektron çeken gruplar kullanılması önerilmiştir. Bu çalışmalarda, Li-ion piller için üç hidrofobik perflorlu alkil grubunun ($-CF_2CF_3$) üç F atomunun yerini aldığı lityum fluoroalkil fosfatları [$LiPF_3(C_2F_5)_3$, LiFAP] düşünülmüştür. $LiPF_6$ ile karşılaştırıldığında, 70 saat boyunca 1000 ppm su varlığında bile hidrolize karşı üstün kararlılık göstermiştir ve iletkenliği ve özgül kapasitesi $LiPF_6$'dan daha iyi olduğu belirtilmiştir (Schmidt ve diğ., 2001). Florlanmış alkil gruplarının varlığı parlama noktasını yükseltmekte ancak, yüksek maliyetleri dezavantaj oluşturmaktadır (Gnanaraj ve diğ., 2003).

Alternatif bir lityum tuzu olarak lityum tetrafluoro oksalato fosfat [$LiPF_4(C_2O_4)$, LTFOP] araştırılmış; $LiPF_6$'dan daha iyi termal kararlılık sergilediği, iletkenliği, elektrokimyasal pencereleri ve döngü kararlılığının ise 65 ℃'de saklandıktan sonra $LiPF_6$'ya benzediği sonucuna varılmıştır (Xu ve diğ., 2009). Bununla birlikte, artan yüzey empedansı Li-ion pillerin güç kapasitesini etkileyebilir (Qin ve diğ., 2009). Yeni lityum tuzları Li-ion pillerin termal kararlılığını ve elektrokimyasal özelliklerini geliştirmek için, bazı organik ligand bazlı anyonlar [örneğin, bis(oksalat)borat (BOB) ve difloro(oksalat)borat (DFOB)] ve büyük kompleks anyonlar [örneğin, bis(florosülfonil)imid (FSI) ve bis(trifuorometansülfonil)imid (TFSI)] da yenilikçi tuzlar oluşturmak için kullanılmaktadır.

LiBOB iyi termal kararlılık ve SEI oluşumunu hızlandırma etkisi gibi avantajları nedeniyle Li-ion piller için umut verici bir aday olduğu belirtilmiştir (Huang ve diğ., 2009). Düşük çözünürlüğü ve iletkenliği, elektroliti düşük sıcaklık özelliklerine ve düşük hız kabiliyetine sahip Li-ion pillere dönüştürmektedir. Bu nedenle, ayrı bir lityum tuzu yerine bir katkı maddesi olarak kullanılması önerilmektedir. LiBOB ile

karşılaştırıldığında, bir oksalat halkasına sahip LiDFOB, daha iyi bir çözünürlüğe sahiptir. %5 LiDFOB içeren elektrolitli Li-ion pilinin LiDFOB içermeyene göre daha yüksek kapasitede tutma özelliği gösterdiği bulunmuştur (Xu ve diğ., 2011).

LiTFSI ve LiFSI gibi sülfonil grupları içeren diğer lityum tuzları da büyük termal stabilite, yüksek iletkenlik ve iyi çözünürlük göstermektedir, ancak en dezavantajı alüminyum korozyonudur (Younesi ve diğ., 2015).

Bu nedenle, yüksek termal kararlılığa ve iyi elektrokimyasal özelliklere sahip anyonlar tasarlayarak lityum tuzlarının geliştirilmesi tavsiye edilmektedir.

2.6.3. Organik Çözücülere İlave Edilen Katkı Maddeleri

Li-ion pillerdeki en yanıcı bileşen organik çözücülerdir. Lityum tuzlarının termal kararlılığını artırmanın en kolay yöntemi çözücülere fonksiyonel katkı maddeleri eklemek veya yanıcı çözücüleri tamamen farklı malzemeler ile değiştirmektir. Farklı türde katkı maddeleri üzerinde çalışılmıştır (McMillan ve diğ., 1999).

İşlevlerine göre, yanma riskini azaltmak için alev geciktirici katkı maddeleri aşırı şarj voltaj artışını bastırmak için aşırı şarj katkı maddeleri (Korepp ve diğ., 2007) ve kararlı SEI filmlerinin oluşumunu hızlandırmak için SEI destekleyici katkı maddeleri olarak ayrılabilirler (Li ve diğ., 2014.b). Dahası, bu katkı maddeleri sadece basit tek bir işlev değil, birleşerek sinerjik etki de göstermektedir.

2.6.3.1. Alev geciktirici katkı maddeleri

Alev geciktirici katkı maddeleri genellikle yüksek stabiliteye sahiptir. İlavenin sadece yaklaşık yüzde onu elektrolitlerin yanıcılığını etkili bir şekilde azaltabilir. Yanmayı bastırma mekanizmalarına dayanarak, kimyasal geciktiriciler ve fiziksel geciktiriciler olarak ikiye ayrılabilirler.

Birincisi hidrojen radikallerini (H- veya -OH) yakalayarak serbest radikal lineer reaksiyonunu sonlandırırken, ikincisi yanıcı bileşenleri alev geciktirici buhar ile seyreltir. Alev geciktirici mekanizmalara ve element tiplerine göre, alev geciktirici katkı maddeleri dört tipte sınıflandırılabilir:

2.6.3.2. Florür geciktirici katkı maddeleri;

En yüksek elektronegatifliğe ve düşük polarizasyona sahip florür atomu nedeniyle, florlu çözücüler daha yüksek oksidasyon kararlılığı, daha düşük erime noktaları ve daha yüksek parlama noktaları gösterir. Bu nedenle, florür geciktirici katkı maddeleri, fiziksel mekanizma yoluyla Li-ion pillerin elektrolitlerinin termal stabilitesini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, düşük sıcaklık altında düşük viskoziteye de sahiptirler (Chandrasekaran ve diğ., 2009). Florlu çözücüler olarak 1,1,1,3,3,3-hekzafloroizopropil metil eter (HFPM) kullanılarak iyi ıslanabilirlik ve yanmazlık gösteren F-elektrolitler hazırlanmıştır. F-elektrolitli Li//$LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ bataryası, gelişmiş güvenlik ve uzun ömürlülük sunmuştur (Xia ve diğ., 2015).

Bir başka çalışmada, $LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$ katotlu Li-ion için yeni bir elektrolit katkısı olarak bir tür florlu lineer karbonat olan ağırlıkça %5 metil (2,2,2-trifloroetil) karbonat (FEMC) kullanmış ve gelişmiş deşarj kapasitesi ve çevrilebilirlik elde etmiştir (Lee ve diğ., 2014). Ex situ IR ve XPS ile yapılan analiz, FEMC'nin kararlı SEI katmanlarının oluşturulmasında ve katot yüzeylerinin etkili pasifleştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Florlu katkı maddeleri elektrolitlerin termal kararlılığını önemli ölçüde artırabilmesine ve kararlı SEI filmleri oluşturmaya yardımcı olmasına rağmen, yüksek maliyet, $LiPF_6$ ile zayıf uyumluluk ve gerekli yüksek dozaj pratik uygulama için dezavantajlıdır.

2.6.3.3. Fosforlu geciktirici katkı maddeleri

Düşük toksisite, düşük maliyet, uygun fiziksel özellikler, iyi uyumluluk ve mükemmel alev geciktirici etkileri nedeniyle, fosfor geciktirici katkı maddeleri Li-ion elektrolitleri için yaygın olarak çalışılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta fosforlu katkı maddeleri H- ve O'yu yakalamak için PO ve PO_2 üretecektir böylece, bir dizi radikal reaksiyonu kesmek için kimyasal bir mekanizma ile elektrolit çözücülerin yanmasını bastırmaktadır (Xiang ve diğ., 2007; Levchik ve diğ., 2006). Li_2MnO_3'ün aktivasyonundan salınan aktif oksijeni yakalayabilen ve daha sonra bir katot filmi oluşturmak için katmanlı Li-zengin oksit (LRO) üzerinde oksitlenebilen bir elektrolit katkı maddesi olarak trietil fosfit (TEP) üzerinde çalışılmıştır (Tu ve diğ., 2017; Nam ve diğ., 2008). Elektrolite iki benzen halkalı difeniloktil fosfat (DPOP) eklendiğinde $LiCoO_2$/MCMB sisteminde yüksek kapasite

tutma oranları ve deşarj kapasitesi elde edilmiştir. Fosforlu katkı maddeleri iyi termal ve elektrokimyasal özellikler göstermelerine rağmen, sınırlı bir miktarın altında yanmayı bastırmaları zordur.

Ayrıca, dar potansiyel aralığı, yüksek viskozite ve anot yüzeyinde meydana gelen indirgeyici reaksiyonlar da pratik uygulamalarını engellemektedir. Bu tür katkı maddelerinin az miktarda diğer fonksiyonel katkı maddeleriyle birleştirilmesi etkili bir strateji olmalıdır (Wang ve diğ., 2001; Xu ve diğ., 2002).

2.6.3.4. Azotlu geciktirici katkı maddeleri

Genellikle yüksek parlama noktasına, düşük uçuculuğa ve geniş potansiyel aralığına sahiptir. Li-ion piller için yaygın olarak kullanılanlar, elektrolitlerin termal stabilitesini fiziksel mekanizma ile etkileyen bütironitril, süksinonitril, tereftalonitril ve adiponitril gibi nitril türevleridir.

Karbonat bazlı bir elektrolite katkı maddesi olarak dinitriller (n = 2, 5 ve 10 olan CN-[CH_2]n-CN) ve mononitriller (m = 2, 5 ve 10 olan CH_3-[CH_2]m-CN) eklendiğinde, nitril içeren elektrolitlerle, grafit/$LiCoO_2$ tipi hücreler 80 ℃'de 3 gün boyunca saklandıklarında bile küçük boyutsal genişleme göstermiştir (Yoon ve diğ., 2014). Nitril fonksiyonel gruplarının elektronegatifliği ile $LiCoO_2$ katotlarındaki kobaltın elektropozitifliği arasındaki güçlü etkileşim, gelişmiş performanstan sorumludur. Bununla birlikte, grafit anotlarla uyumluluk zayıftır.

2.6.3.5. Kompozit geciktirici katkı maddeleri

Tekli alev geciktirici katkı maddeleri ile karşılaştırıldığında, kompozit katkı maddeleri daha iyi alev geciktirici etkinlik, çözünürlük ve elektrolitlerle uyumluluk sunar. Aynı zamanda, birden fazla elementin sinerjik etkileri nedeniyle küçük bir dozajla iyi elektrokimyasal performans sağlarlar. En çok rapor edilen kompozit katkı maddesi etoksi-(pentafloro)-siklotrifosfazendir (PFN).

PFN daha iyi CEI filmleri ile mükemmel çevrim kararlılığı, yüksek hız ve yüksek voltaj performansları sunmaktadır. Ayrıca, sadece ağırlıkça %5 PFN içeren elektrolit tamamen yanmazdır (Liu ve diğ., 2018).

Yapılan çalışmalarda kompozit alev geciktiricilerin termal ve elektrokimyasal özellikleri aynı anda iyileştirmek için iyi bir seçim olacağını belirtilmiştir. Ancak, yüksek saflıktaki reaktifler endüstriyel olarak kolayca hazırlanamamaktadır ve bu da pratik uygulama için elverişli değildir.

2.6.4. SEI Destekleyici ve Aşırı Şarj Koruma Katkıları

SEI ayrışması ve aşırı şarj, termal kaçak mekanizmasının oluşması için iki kritik faktördür. Bu nedenle, SEI destekleyici ve aşırı şarj koruma katkı maddeleri gereklidir.

Yapılan çalışmalar metil difloroasetat (MFA) katkılarının SEI'lerin önemli bir bileşeni olan CHF_2COOLi oluşumunu hızlandırabileceğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, CHF_2COOLi ve lithiated karbonun reaksiyon ürününün bataryanın termal stabilitesini artırabileceğini göstermiştir (Ihara ve diğ., 2003).

Vinilen karbonat (VC) (Lee ve diğ., 2005; Ota ve diğ., 2004) ve vinil etilen karbonat (VEC) (Vollmer ve diğ., 2003) gibi diğer elektrolit katkı maddeleri de SEI filmlerinin termal kararlılığını artırmak için kullanılmıştır. Aşırı şarj, Li-ion pillerin termal kaçak için tetiklenmesinin başlıca nedenlerinden biridir, bu sebeple de Li-ion pillerin çalışma sırasında aşırı şarj olmasını önlemek kritik önem taşır. Redoks Shuttle katkı maddeleri, Li-ion pillerin güvenlik özelliklerini geliştirmek için içsel aşırı şarj koruması olarak kullanılmıştır.

Daha güvenli Li-ion piller için Redoks Shuttle maddesi kapsamlı bir şekilde gözden geçirildiğinde, ilave olarak, elektrokimyasal polimerizasyon katkı maddeleri de aşırı şarj koruması için kullanılabilir (Chen ve diğ., 2009). Bifenil katkı maddesinin aşırı şarjlı katot yüzeylerinde elektrokimyasal olarak polimerize edilebildiği ve bunun sonucunda hücre voltajının kaçmasını önlemek için dahili bir kısa devre oluşturmak üzere iletken bir köprü görevi gören iletken bir yüzey polimer filmi oluşturduğu bulunmuştur (Xiao ve diğ., 2004).

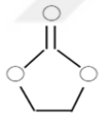
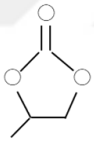
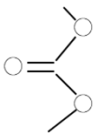
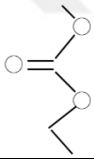
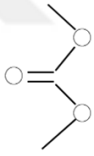
2.6.5. Elektrolit Malzemeler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Elektrolitler iyon yük transferi için bir ortam görevi görür. Karbonat çözücüler ve lityum hekzaflorofosfat ($LiPF_6$) dahil olmak üzere sulu olmayan organik elektrolitler, Li-ion

pillerin icadından bu yana onlarca yıldır kullanılmasına rağmen, esasen güvenli değildir (Nishi, 2001) Elektrolitlerin kararsızlığı hem çözücülerden hem de lityum tuzundan kaynaklanmaktadır. Tablo 2.8 ile çeşitli solvent türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir (Kalhoff ve diğ., 2015).

Siklik karbonatlar (örneğin EC, PC), yüksek konsantrasyonlu lityum tuzlarının ayrışma kabiliyetini sağlamak için yüksek dielektrik sabitlerine sahip elektrolit çözücüler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek erime noktaları ve yüksek viskoziteleri depolama işlemi sırasında iyon taşınmasını engelleyecektir. Pratik uygulamaları karşılamak için, düşük viskoziteye sahip doğrusal karbonatlar (örneğin DMC, DEC ve EMC), uygun kimyasal/elektrokimyasal kararlılığa ve iyi ara yüzey özelliklerine sahip kompozit elektrolitler haline gelmek için döngüsel karbonatlarla karıştırılır (Xu, 2014).

Tablo 2.8. Kullanılan solventlerin özelliklerinin karşılaştırılması (Kalhoff ve diğ., 2015)

	Solvent				
○: Yüksek Δ: Orta ×: Düşük	EC	PC	DMC	DEC	EMC
Yapı					
Dielektrik sabiti	○	○	×	×	×
Vizkozite	○	○	×	×	×
Uçuculuk	×	×	○	○	○
Kaynama sıcaklığı	○	○	×	×	×
Parlama noktası	○	○	×	×	×
Erime sıcaklığı	○	×	Δ	×	×
SEI oluşturma	○	×	×	×	×
Anodik stabilite	○	○	Δ	Δ	Δ
Güvenlik	○	Δ	×	×	×

Siklik etilen karbonat (EC), Li/Li^+ karşısında yaklaşık 0,8 V'ta elektrokimyasal olarak ayrışarak akış potansiyelli anotların yüzeyinde koruyucu SEI filmleri oluşturabilir (Jiang ve diğ., 2004.a).

Karbonatlar neredeyse en iyi kapsamlı özelliklere sahip çözücüler olarak kabul edilse de, düşük parlama noktaları, yanıcı ve patlayıcı olan gazlara ayrışmalarını kolaylaştırır. Bu nedenle, daha güvenli karbonat bazlı kompozit çözücüler oluşturmak ve yenilikçi

çözücüler keşfetmek, güvenli Li-ion pillerin tasarlanması için önemli olacağı belirtilmektedir (Haregewoin ve diğ., 2016).

Elektrolitlerin bir diğer önemli bileşeni de Li iyonlarını sağlayan lityum tuzudur. Tablo 2.9'da gösterildiği gibi, Li-ion pillerde kullanılan yaygın lityum tuzları Lityum Hekzaflorofosfat (LiPF), lityum tetrafloroborat ($LiBF_4$), lityum hekzafloroarsenat ($LiAsF_6$) ve lityum perklorat ($LiClO_4$) ve özellikleri sıralanmıştır.

Bu tuzlar arasında $LiPF_6$, iyi iyonik iletkenliği ve alüminyum akım toplayıcıları pasifleştirebilmesi nedeniyle ticari olarak kullanılmaktadır, ancak eser miktarda suya karşı hassastır ve yüksek sıcaklıkta toksik ve aşındırıcı gazlara kolayca ayrışabilir (Kalhoff ve diğ., 2015).

$LiAsF_6$ iyi elektrokimyasal özellikleri ve termal kararlılığı nedeniyle ideal bir aday gibi görünmektedir, ancak toksisitesi pratik uygulamasını sınırlamaktadır (Moumouzias ve diğ., 2003).

Tablo 2.9. Yaygın kullanılan lityum tuzlarının özellikleri (Kalhoff ve diğ., 2015)

	Lityum Tuzu			
○: **Yüksek** Δ: **Orta** ×: **Düşük**	$LiPF_6$	$LiBF_4$	$LiAsF_6$	$LiClO_4$
İyonik iletkenlik	○	Δ	○	○
Elektrokimyasal stabilite	○	Δ	○	○
Termal stabilite	×	Δ	○	×
Nem karşısında stabilite	×	Δ	Δ	Δ
Al akım toplayıcı pasifizasyonu	○	○	○	Δ
Zehirsizlik	×	×	×	×
Güvenlik	×	Δ	×	×

Florür içermeyen alternatif tuz $LiClO_4$, $LiPF_6$ ile karşılaştırılabilir özellikler sergiler ve neme karşı hassas değildir ve toksik bozunma ürünleri yoktur; ancak ClO_4'ün yüksek oksitlenebilirliği ve organik bileşiklerle etkileşimi nedeniyle ciddi bir patlama riski vardır. Bu nedenle, araştırmacılar belirtilen lityum tuzlarını geliştirirken bu özelliklere daha fazla dikkat etmektedirler. Araştırmacıların üzerinde durduğu lityum tuzları: lityum bis(triflorometansülfonil) imid (LiTFSI) (Ferrari ve diğ., 2009; Han ve diğ., 2011; Zuo ve diğ., 2013), lityum bis(oksalat)borat (LiBOB) (Larush-Asraf ve diğ., 2007), lityum

difloro(oksalat) borat (LiODFB) (Wu ve diğ., 2015) ve lityum bis(florosülfonil) amid'dir (Okuoka ve diğ., 2014).

Karbonat çözücüleri genellikle yanıcıdır. Li-ion piller kötüye kullanım koşulları altındaysa, tutuşarak çok fazla ısı üretirler. Li-ion pillerin güvenliğini artırmak amacıyla, yanıcı olmayan bir elektrolit oluşturmak için yenilikçi çözücüler aramaya yönelik birçok çaba sarf edilmiştir. Oda sıcaklığında iyonik sıvılar (RTIL'ler), yüksek iyonik iletkenlikleri, uçucu olmayan özellikleri, uygun elektrokimyasal pencereleri, termal kararlılıkları ve düşük yanıcılıkları nedeniyle geleneksel organik çözücülere iyi bir alternatif olarak görünmektedir (Elia ve diğ., 2016).

Anyon ve katyon yapıları iyonik sıvıların elektrokimyasal özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Son zamanlarda, TFSI (bis(trifluoromethanesulfonyl)imide) olağanüstü elektrokimyasal özellikleri ve termal kararlılığı nedeniyle anyon olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

Aşağıda verilen iyonik sıvılar ile lityum tuzlarının karışımı elektrolit sıvısı olarak denenmiştir; N-butil-N-metilpirolidinyum bis(trifloro-metansülfonil) imid (Pyr14TFSI), N-butil-N-metilpirolidinyum bis(florosülfonil)imid (Pyr14FSI), N-metoksi-etil-N-metil-pirolidinyum bis(triflorometansülfonil) imid (Pyr12O1TFSI), N-N-dietil-N-metil-N-(2-metoksietil)amonyum bis(trifloro- metansülfonil) imid (DEMETFSI) iyonik sıvıları ile lityum bis(triflorometansülfonil)imid (LiTFSI) tuzu (Bhatt ve diğ., 2010; Mun ve diğ., 2011).

Üzerinde çalışılmış olan RTIL'ler arasında Pyr14FSI-LiTFSI bazlı elektrolit dikkate değer elektrokimyasal kararlılık, uygun iyonik iletkenlik ve nispeten düşük viskozite göstermektedir (Lewandowski ve Świderska-Mocek, 2009).

LiFePO4 Li-ion pilde bu elektrolit kullanıldığında, kapasite tutma 2000 döngü boyunca %100'e yakın olduğu ve kapasitesi ise 500 mA/g'a kadar çıktığı görülmüştür. Ayrıca, saf [BuEtPyrrol+][NTf 2-] iyonik sıvısı, sadece ağırlıkça %10'luk bir kütle kaybıyla 367,8 ℃'ye kadar son derece yüksek termal kararlılık sergilemiştir (Fernicola ve diğ., 2007). Bununla birlikte, RTIL'ler için yüksek saflık gereksinimleri, yüksek maliyet ve yüksek viskozitenin neden olduğu oda sıcaklığında düşük iletkenlik, Li-ion pillerdeki pratik

uygulamaları sınırlamaktadır. Bu sınırlamalara rağmen RTIL'lerin elektrolit olarak kullanılması, Li-ion pillerin güvenliğini artırmanın en faydalı yollarından biridir.

2.7. Söndürme Maddelerinin Etkinliğinin İncelendiği Çalışmalar

(Said ve diğ., 2021), 18650 silindirik şekilli ve LCO katot kimyasalına sahip %100 SOC durumundaki bataryalar ile yaptıkları deneylerde iki farklı debide hava akışına; 640 lt/dak, 320 lt/dak ve 186 lt/dak debide nitrojen ile yapılan deneylerde Novec 1230 ($CF_3CF_2C(O)CF(CF_3)_2$) kullanımının termal kaçak mekanizması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Novec 1230 gazının 640 lt/dak hava debisine % 8,5 yoğunlukta katılmasının (sıradan yangın için fazla bir değer) termal kaçak mekanizmasını engelleyemediği ve yangının bastırılmasında yetersiz kaldığı görülmüştür. Hava akım debisinin 320 lt/dak e düşürüldüğü ve Novec 1230 derişiminin %15,2'ye yükseltildiğinde termal kaçak mekanizmasının oluşumu deneylerin % 67 sinde görülmüştür. Novec 1230 gazının sürekli olarak pil grubu içinde dolaştırılması soğutma etkisinin termal kaçak oluşumuna sebep olabilen ısıdan fazla olduğundan termal kaçak mekanizmasını önleyebileceği belirtilmiştir.

(Yu ve diğ., 2019), Elektrikli otobüslerde kullanılan prizmatik şekilli $LiFePO_4$ (LFP) katod kimyasalına sahip pillerin çevre dostu olarak bilinen perfluorohexanone gazı ile söndürme etkisi çalışılmıştır. Gazın söndürme etkisinin olduğu ve termal kaçak oluşumunu soğutma etkisi ile engellediği ortaya konulmuştur ancak aynı etki bir başka katod kimyasalı olan NiCoMn (NCM) türü bataryalar için uygun olmadığı belirtilmiştir.

(Zhang ve diğ., 2020), $LiFePO_4$ katod kimyasalına sahip 243 Ah büyük ölçekli bataryalarda söndürme maddelerinin sinerjik etkisi araştırılmıştır. Gaz olarak $C_6F_{12}O$, CO_2 ve HFC-227ea ve su sisi ile bileşiminin etkisi denenmiş ve söndürme süresi, en yüksek sıcaklık, kütle kaybı ve HRR üzerine etkisi değerlendirdiğinde sinerjik etkinin tek söndürme maddesine kıyasla etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu sinerjik etki içinde su sisinin $C_6F_{12}O$ ile bişleşimi en iyi söndürme ve soğutma etkisi ortaya koyarken CO_2 ile bileşimi daha uzun bir söndürme zamanı gereksinimi ortaya koymuştur. Bununla birlikte HFC-227ea söndürme etkisinin olmadığı ancak yangının gücünü azalttığı görülmüştür. CO_2 nin ekonomik olması da bir başka düşünülmesi gereken unsur olarak ortaya konmuştur.

Liu ve diğ. (2020), söndürme maddelerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında $C_6F_{12}O$ ve su sisinin etkisini incelemişlerdir. $LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ (NMC) katod kimyasalına sahip % 100 SOC durumunda ve 38 Ah batarya kullanılarak 400 W elektrik ısıtıcı ile tetikleyerek termal kaçak deneyi gerçekleştirilmiştir. Su sisinin farklı basınçlar altında uygulamasında (1, 2, 3 MPa) basınç arttıkça en üst sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Su sisi içine $KHCO_3$ ve $K_2C_2O_4*H_2O$ katıldığında soğutma ve söndürme kabiliyetini iyileştirdiği görülmüştür. $C_{18}H_{29}NaO_3S$ ve $F(CF_2)_6CH_2CH_2O(CH_2CH_2O)$ katılması soğutma ve söndürme kabiliyetini azalttığı saptanmıştır.

Meng ve diğ. (2020), farklı SOC seviyelerindeki LFP kimyasına sahip pillerin yanma davranışı ve toksitlik durumu ile birlikte kuru kimyasal söndürme maddesinin bu tür yangınlara etkisini izlemek için bir dizi deney gerçekleştirmiştir.

Elde ettikleri sonuçlarda; pilin % 100 SOC durumunda yüzey sıcaklığının 126,1 ℃'ye ulaşması ile birlikte emniyet valfinin açıldığı ve toksik CO, CO_2 ve HF gazları salınmıştır. Sıcaklığın 166,8 ℃'ye ulaşmasıyla birlikte termal kaçak oluşumu ve pil yüksek miktarda yanıcı gaz nedeniyle jet alevi oluşturmasıyla sıcaklık 943,1 ℃'ye ulaşmıştır.

Bu süreç esnasında ulaşılabilen HRR ise 12,3 kW olmuştur. Yüksek SOC ile daha fazla toksik gaz oluştuğu gözlemlenmiştir. Uygun koşullar oluştuğunda kuru kimyevi söndürücü oluşan batarya yangınını söndürebilmekte ancak söndürme maddesinin limitli soğutma etkisi nedeniyle söndürme maddesiyle temasta olan kısımlarda bu etki gözükmektedir. Bir başka etki de kullanılan söndürücü maddenin ugulanma (püskürtme) mesafesi, bu mesafenin 80 cm'i geçmesi durumunda bataryadan çıkan alevleri söndürmek üzerine bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Kuru kimyasal söndürücü toz katod maddesi üzerinde geniş açı ile müdahalesinde daha iyi bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Söndürme maddesinin uzun süreli uygulanması soğutma etkisinin devam etmesini sağlamaktadır ancak bu soğutma katsayısı ile ilişkili değildir. Söndürme maddesinin uygulanması kritik bir değere geldiğinde söndürücü maddenin kısıtlayıcı etkisi gelişmemiş ve batarya içindeki ekzotermik reaksiyon oluşumunu engellememiştir.

Hynynen ve diğ. (2023), 2 tanesi içten yanmalı motora sahip (bir adet 40 lt benzin yakıt barındıran ve 44 lt dizel yakıt barındıran), 1 tane bataryası alınmış olan olmak üzere 4

adet EV taşıt (50 kWh, % 90 SOC NMC ve prizmatik, 40 kWh, % 80 SOC NMC, pouch, 24 kWh, % 80 SOC NMC, prismatik) olmak üzere 6 adet taşıt ile yaptıkları yanma testlerinde yanma gazlarının taşıt tipine göre değişkenliği ile birlikte yerleştirilen sprinkler tipi sulu söndürme sistemi ile de söndürme ajanı olarak suyun yanma gazları üzerinde etkinliğini iki taşıt üzerinde gözlemlemişlerdir.

HRR, THR ve peak HRR gözlemlenmiştir. HRR ve THR aracın tipine (büyüklüğüne) ve yanma senaryosunun uygulanmasına göre değişkenlik göstermiştir. HRR nin en yüksek seviyesine ulaşması içten yanmalı motora sahip taşıtlarda yakıt depolarındaki yüksek kimyasal enerji nedeniyle daha kısa sürede gerçekleşmiştir. İçten yanmalı motorlu taşıtların yanma gazlarının EV ile yanma gazlarına göre özellikle NOx, HF ve HCL açısından daha az olduğu ancak EV ve içten yanmalı motor aynı yardımcı kurşun aküyü kullanmasına rağmen içten yanmalı arabaların yanmasında kurşun değerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte EV ve içten yanmalı motor arasında fark olarak HF ve Ni, Co, Li, Mn gibi spesifik bir takım metaller de yanma sırasında tespit edilmiştir. İçten yanmalı motorda 11-15 g. HF tespit edilmişken EV de bu 120-859 g. arasında tespit edilmiştir. Sprinkler sulu söndürme sistemi uygulandığında HF gazı salınım miktarında azalma tespit edilmiştir. Farklı batarya hücre tiplerinin farklı miktarlarda HF gazı salınımına neden olduğu tespit edilmiştir. Yapılan araştırmanın taşıt tipi, hücre kimyası, yangın senaryosu gibi etmenlerden kaynaklanan gaz bileşiminin ve yoğunluğuna etki ettiği belirtilmiştir.

Russoa ve diğ. (2018), yaptıkları deneysel çalışmada pil ve batarya bazında çeşitli söndürme maddelerinin soğutma etkinliğini denemişlerdir. Deneyler torba tipi % 50 SOC seviyesine getirilmiş tekil pil ve 48 adet pilin bir araya getirilmesiyle oluşmuş modüller üzerinde yapılmıştır. Dışarıdan LPG ısıtıcı kaynak vasıtasıyla termal kaçak mekanizmasının oluşması sağlanmıştır. Deneylerde tekil pil hücreleri için söndürme maddesi olarak CO_2, köpük, saf su, kuru kimyevi toz, su sisi kullanılmış olup pil modülleri için ise sadece su kullanılmıştır. Pillerin tekil olarak yanma deneyleri sırasında bataryadan yüksek miktarda gaz ve alev sızıntısı oluşmuş, söndürme sağlanmasıyla gaz çıkışı da durmuştur. Modül olarak yapılan deneylerde ise termal mekanizmasının tekil pilden tüm modüle yanmaya başlayan pilin komşu yüzeyinin temasından kaynaklandığı, sıcak yanma gazlarının yayılmasından ve bu gazların içeride yanmasından kaynaklandığı

gözlemlenmiştir. Termal kaçak mekanizması sırasında sıcaklığın 700 ℃'ye ve alev boyunun 2 m'ye kadar ulaştığı saptanmıştır. Tekil pil üzerinde yapılan deneylerde birim zaman içinde pilin ulaştığı sıcaklık değerinden en hızlı ısı alımını su ve köpük maddelerinin uygulanmasıyla elde edilmiştir. Söndürme 20 s altında gerçekleşmiştir. Su sisi ucuz olması ve çok az miktarda kullanılıyor olmasına rağmen daha az etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte su sisi uygulanmasının her noktaya homojen dağılım göstermemesi soğutma etkisinin üniform olmamasına sebep olması sebebiyle olumsuz etkisi olduğu belirtilmiştir. CO_2 ve kuru kimyevi toz göreceli olarak en az etkiye sahip söndürme maddesi olarak belirtilmiştir.

Sun ve diğ. (2022), Li-ion bataryaların yakma ve söndürme deneylerini yaparak bataryaların yanma davranışını ve birbirinden farklı 3 maddenin söndürme davranışlarını karşılaştırmıştır. Deneylerinde 117 Ah $Li(Ni0.8Co0.1Mn0.1)O_2$ (NCM) tipi bataryalar ile yanma deneyleri yapılmış söndürme maddesi olarak ise HFC-227ea, $C_6F_{12}O$ ve su sisi kullanılmıştır. Kapalı alanda yapılan deneylerde soğutma mekanizmasının en önemli söndürme parametresi olduğu belirtilmiştir. HFC-227ea, $C_6F_{12}O$ ve su sisinin ısı soğurma kapasitesinin sırasıyla 24,8 kJ, 111 kJ and 459,8 kJ olarak belirtilmiş, bu sebeple de HFC-227ea nın oluşturulan yangını zorlukla söndürebildiği belirtilmiştir. $C_6F_{12}O$ ise termal kaçak mekanizmasının oluşumu engelleyemediği ortaya konulmuştur. Bataryadaki ısıyı düşürebilmekte ısı transferini azaltmakta ve termal kaçak oluşum evresini geciktirdiği ortaya konulmuştur. Su sisi ise en iyi soğutma yeteneği ile termal kaçak oluşumunu engellediği görülmüştür. HFC-227ea ve $C_6F_{12}O$ Termal kaçak oluşumunu engelleyememekte, HFC-227ea söndürme üzerinde etkisinin az da olsa etkisinin olduğu ve $C_6F_{12}O$ oluşum etkisini geciktirdiği tespit edilmiştir.

Cui ve diğ. (2022) Açık alanda yaptıkları deneysel çalışamalarında, elektrikli taşıtlara müdahale yöntemleri araştırılmıştır. Bunun için NCM katot kimyasalına sahip 18650 tipi silindirik pillerden oluşturulmuş 1320 adet pil batarya bloğunu temsil edecek şekilde dizilmiştir. Bunların dizilimi dikey olacak şekilde herbiri 220 adet pilden oluşan 6 adet blok şeklinde bir araya getirilmiştir. Oluşturulman batarya 2004 Buick Excelle, 2004 Volkswagen Bora taşıtların iç kısmına bir elektrikli taşıt simüle edilecek şekilde aracın arka koltuğunun altına konulmuş ve üzerine bataryayı temsil edecek şekilde bir sac plaka yerleştirilmiştir. Taşıt bir yangın havuzu (söndürme suyunu tutabilecek) içine

yerleştirilmiş ve elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla bataryanın termal kaçak mekanizmasına sokulması sağlanmıştır. Bu deneyler serisine göre karşılaşılan ilk gözlem tek bataryanın yanma davranışı ile batarya bloğunun birbirinden farklı olduğu, bununla beraber ısıtma yoluyla elde edilen termal kaçak mekanzima ile de aşırı şarj sonucu elde edilen termal kaçak mekanizmasının da farklı yönleri olduğu ortaya konulmuştur. Bununla birlikte fazla şarj sonucu oluşan termal kaçak mekanizmasının ölçülen en fazla sıcaklığı ısı vasıtasıyla meydana gelen termal kaçak mekanizmasında gözlemlenen sıcaklığa göre daha düşük olduğudur.

Aracın camlarının kapalı tutulduğu deneyler esnasında yangının yavaş oluştuğu ancak tüm taşıt yolcu kompartımanına yayıldığı, yangının ilerleyen zamanında motor kompartımanını ve bagaj kısmına yayılmadığı gözlemlenmiştir. Söndürme maddesi olarak suyun uygulanmasıyla birlikte sıcaklık batarya gruplarında 50 ℃ altına düşmüş ve yangın havuzu kaldırıldığında termal kaçak mekanzimasının tekrar oluşmadığı gözlemlenmiştir. Geleneksel söndürme metodu ile karşılaştırıldığında havuz içinde yapılan müdahalenin daha az su sarfiyatı ile sonuçlandığı (0,628 m^3 /kWh) belirtilmiştir. Köpük maddesinin kullanıldığı deneylerde söndürme sağlanmış, 7,5 m^3 köpük kullanıldığı halde köpüğün düşük soğutma kabiliyeti nedeniyle batarya gruplarında sıcaklık 50 ℃ altına düşmemiştir.

2.8. Batarya Malzemelerinin Etkinliğinin İncelendiği Çalışmalar

Wang ve diğ. (2022), anot malzemesi olarak grafit kullanılan, beş farklı katot kimyasalına sahip (1) $LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ (NCM111), (2) $LiNi_{0,5}$-$Co_{0,2}Mn_{0,3}O_2$ (NCM523), (3) $LiNi_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}O_2$ (NCM622), (4) $LiNi_{0,8}$- $Co_{0,1}Mn_{0,1}$ (NCM811), ve (5) $LiFePO_4$ (LFP) pillerle araştırma gerçekleştirilmiştir. Bunlar % 100 SOC durumunda, termal kaçak mekanizmasına girmeleri sağlanarak patlama limiti, patlama basıncı, yaklaşık 25 ℃ ve 101 kPa durumu sağlanarak ölçülmüştür.

Bataryadan çıkan beş ayrı yanma gazının laminar yanma hızı Bunsen yakıcı ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre batarya sıcaklığı, çevre sıcaklığı, test sırasında oluşan basınç artışı yönlerinden değerlendirildiğinde termal kaçak tehlike sırasıyla $Li(Ni_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1})O_2$>$Li(Ni_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2})O_2$>$Li(Ni_{0,5}Co_{0,2}Mn_{0,3})O_2$> $Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O_2$ >$LiFePO_4$, ile $Li(Ni_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0.1})O_2$ olarak değerlendirmiştir.

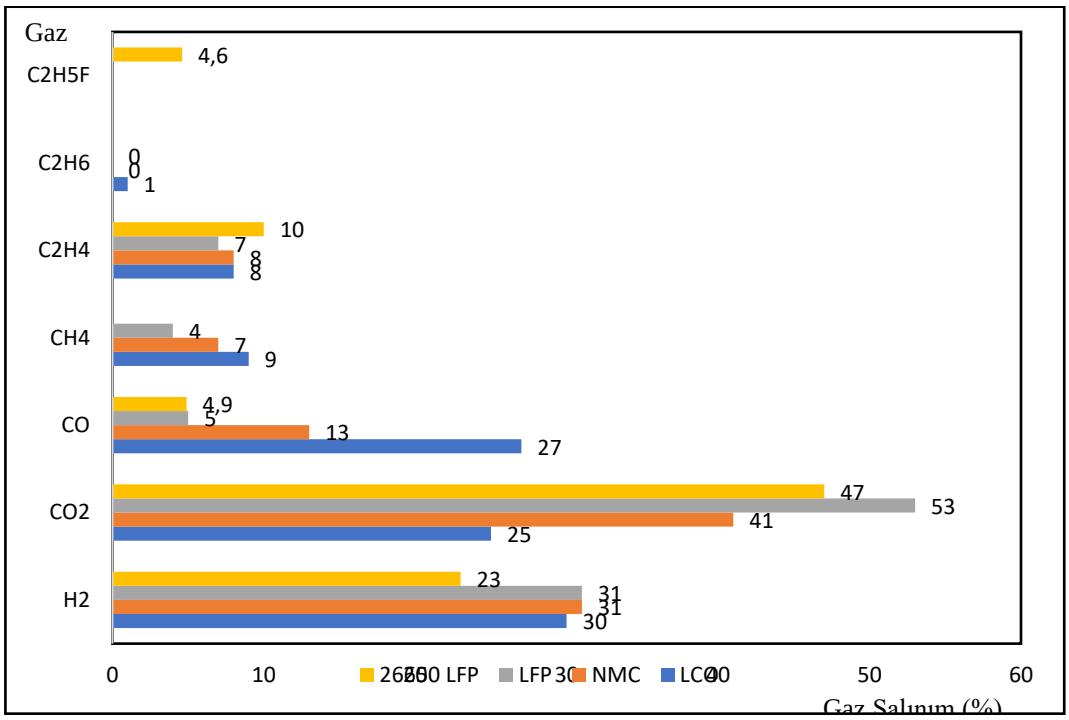
Termal kaçak esnasında CH_4, H_2, C_2H_4, CO, CO_2, and C_2H_6 gibi gazların yayıldığı ve $LiFePO_4$ tipi pilin en fazla miktarda H_2 and C_2H_4 (% 51 e kadar) yaydığı gözlemlenmiştir. $Li(Ni_xCo_yMn_{1-x-y})O_2$ piller ise % 60 oranında CO ve CO_2 gazı yaydığı gözlemlenmiştir. Termal kaçak mekanizması esnasında gaz patlaması ve zarar olgusu üzerinde yapılan çalışmaların $Li(Ni_xCo_yMn_{1-x-y})O_2$ tipi pillerin $LiFePO_4$ tipi pillere göre daha tehlikeli olduğu belirtilmesine rağmen $LiFePO_4$ tipi pillerde daha yüksek patlama indeksi, daha yüksek patlama üst basıncı ve daha düşük patlama alt limiti (LEL) olduğu belirtilmiştir. Pillerden çıkan gazın laminer alev yanma hızı $LiFePO_4$ tipi pilde NCM tipi pile ve saf CH_4'e kıyasla daha fazla gerçekleşmiştir. Pilin yanma ve patlamaya karşı güvenliğinin C_2H_4 and H_2 salınımı düşürülmesiyle mümkün olabileceği belirtilmiştir. Pillerden çıkan gazın yanması durumunda uygulanan söndürme maddelerinin etkinliği karşılaştırıldığında en etkin söndürme gazının sırasıyla C_3HF_7 > CO_2 > N_2 olduğu görülmüştür.

2.9. Pilin Yanması Esnasında Çıkan Gazların İncelendiği Çalışmalar

Li-ion pilin contası güvenlikle ilgili önemli bir faktördür. Hasarlanan bir pil contası uçucu organikler (VOC) ve yanıcı gazların sızıntısına neden olması kullanıcılar için önemli güvenlik riski oluşturur. Pilin kırımına neden olan birkaç durum vardır, bunlardan bazıları; pil üretimi, pil sistemi montajı veya bakım sırasında tespit edilemeyen iç hasar gibi durumlardır (Wenger ve diğ., 2014). Ayrıca, aşırı şarj, aşırı ısınma, dahili kısa devre vb., şiddetli kimyasal reaksiyonlara neden olur ve böylece gazları serbest bırakır (Ren ve diğ., 2017; Finegan ve diğ., 2018). Emniyet valfi basınca dayanamaz, pil kırılır ve tehlikeli zehirli gaz karışımlarını (CH_4, C_2H_4, C_2H_6, H_2, CO, CO_2, HF, PF_5, vb.) dışarı salar (Wen ve diğ., 2012; Sun ve diğ., 2016).

Hücre tipi 18650 olan ve üç tip katot (LFP, NMC, LCO ve NMC katot karışımı) kimyasalı olan piller üzerinde argon gazı atmosferinde yapılan deneylerde, güvenlik contasının 160 ℃'de açıldığı tespit edilmiştir. Salınan gazın miktarının büyük ölçüde hücre kimyasına bağlı olduğu belirtilmiştir (Golubkov ve Fuchs, 2014). Salınan gaz miktarları, 2.29'da gösterilmiştir. Hücre tipi 26650 olan ve katot tipi LFP olan pillerin aşırı şarj edilmesiyle yayılan gazlar üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre CO_2 ve H_2 gaz üretiminin büyük kısmını oluşturmaktadır (Fernandes ve diğ., 2018). Bu durum Şekil 2.29'da gösterilmiştir.

Neredeyse tüm kimyasallarda yaygın olan gaz üretiminin CO_2 olduğu ve önemli miktarda CO üretimi gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Yayılan gazların türleri dikkate alınarak Li-ion pillerin etkin gaz ölçümü ve erken uyarı sistemlerinde gözlemlenmesi sağlanması önerilmiştir (Wang ve diğ. 2018; Golubkov ve Fuchs, 2014; Sun ve diğ., 2016).



Şekil 2.29. 26650 LFP, LFP, NMC, LCO pillerin gaz salınımı (% mol)

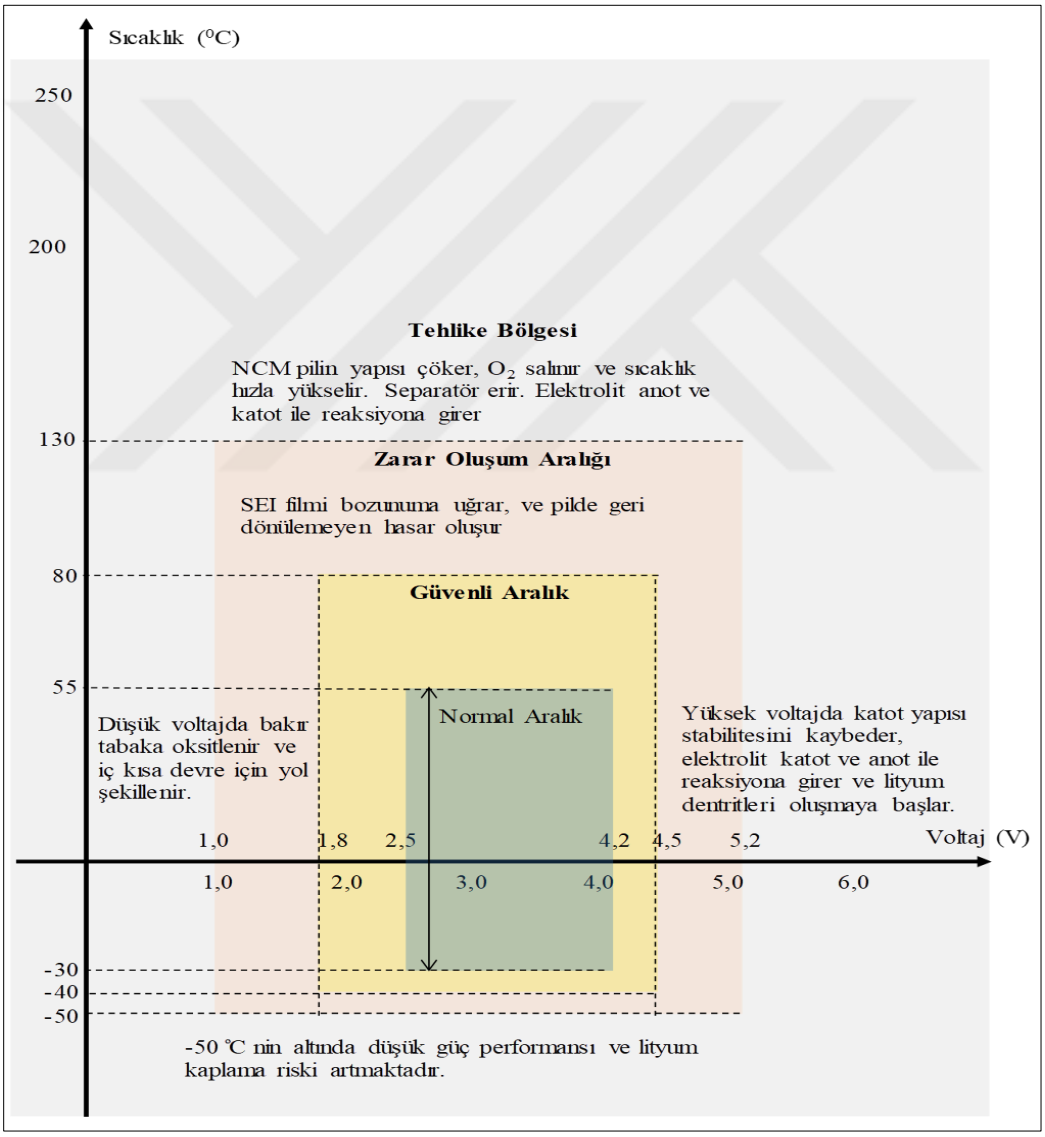
Erken aşama elektrolit sızıntısı olduğunda uçucu organik bileşiklerini (VOC) tespit etmek için gaz sensörü kullanılması denenmiştir. Sıcaklık ve voltaj gibi geleneksel algılama yöntemleriyle karşılaştırıldığında bir hücre arızasının tespitinin, gaz sensörü ile daha hassas algılanabileceği belirtilmiştir.

Bu hassasiyet için yapılan deneylerde pil hücresi fazla şarj ile zorlandığında, gaz algılandığında sıcaklık sensörünün henüz 60 ℃'nin altında olduğu tespit edilmiştir (Wenger ve diğ., 2014). Kısa devre oluşturulan deneylerde de benzer şekilde CO_2 ve hidrokarbon gazlarının ölçülmesi erken uyarı verdiği tespit edilmiştir. Ancak fazla hassas ölçüm yapılmasının da hatalı ikazlar verebileceği belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2018).

2.10. Pillerin Termal Durumlarının İzlenmesi Hakkında Yapılan Çalışmalar

Yüksek miktarda elektrik enerjisi ve yanıcı elektrolitler içeren batarya; yanlış kullanım, üretim hataları ve güvenlik için tasarlanmış olsa bile uzun süre güvenilirlik gibi bazı

durumlarda kullanıcılar için hala bir tehdittir. Li-ion pillerin iç durumunu izlemek için operando tekniklerinin uygulanması gerekli olduğu belirtilmiştir (Mai ve diğ., 2017). Li-ion pillerin "konforlu bölgede" çalışmasını sağlamanın temelleri, bataryanın voltajını ve sıcaklığının sürekli izlemektir. Sıcaklığın yaklaşık 90 ℃'ye ulaştığı durumlarda, SEI tabakasının ayrışmaya başlaması nedeniyle hücrenin kendi kendine ısınması başlar. Erken uyarı için iç sıcaklığın izlenmesi, Li-ion batarya güvenliğini ve performansını artırmak için batarya yönetim sistemleri için uygulanabilir bir strateji olarak düşünülmektedir. Şekil 2.30'da gerilim ile sıcaklık sınır değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Gerilim ile sıcaklık sınır değerleri

Li-ion bataryanın merkezi sıcaklığını doğru bir şekilde elde etmek için bazı araştırmacılar bataryaya sensörler yerleştirmektedir. Yerleştirilen invaziv sensörler aşağıdaki

gereksinimleri karşılaması gerektiği belirtilmiştir; (1) Li^+ geçişinden etkilenmemelidir; (2) sensör korozyona karşı dayanıklı olmalıdır; (3) sensör hücre montaj sürecine uygun olmalıdır (Mutyala ve diğ., 2014).

Ticari termokupllar, bataryaların yapısına zarar verebilecek büyük çapları (1 mm'den fazla) nedeniyle bu tür bir izleme yapmak için uygun olmadığı belirtilmiştir (Forgez ve diğ., 2010; Zhu ve diğ., 2017).

Esnek ince-film termokuplların üretilmesi ve bunların pil hücresi üzerinde akım toplayıcıları üzerine aktarılması üzerine çalışılmıştır. Bu özel sensör, hücrede herhangi bir değişiklik veya tahribat olmaksızın bataryanın içine yerleştirilmesi sağlanmalıdır. Bunun yanı sıra, sensör geometrisi mevcut bir torba tipi pil hücresinin yapısına uyacak şekilde uyarlanmalıdır (Mutyala ve diğ., 2014).

Bükülebilir ince-film sensörlerin performansını arttırılması için fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği kullanılarak erozyona dayanıklı bükülebilir bir mikro sensör geliştirilmiş ve bu sensör bataryanın sıcaklığını ve voltajını yerinde izleyebilmektedir (Lee ve diğ., 2015; Lee ve diğ., 2017).

Yapılan çalışmalarda Fiber Bragg ızgara (FBG) sensörleri sıcaklığı ölçmek için entegre edilmiştir. Bragg ızgara, dar bir dalga boyu bandını yansıtır (Ghannoum ve diğ., 2017).

Bataryanın üst, orta ve alt kısmının sıcaklığını izlemek için fiberlere 3 FBG yerleştirildiğinde bir optik fiber ile modüldeki her hücrenin sıcaklığını izlemek mümkün olacağı belirtilmiştir. FBG sensörleri sıcaklığın yanı sıra gerilmeye, basınca, bükülmeye, hatta şarj durumuna (SOC), sağlık durumuna (SOH) ve benzerlerine de duyarlıdır (Ghannoum ve diğ., 2017; Sommer ve diğ., 2015).

Küçük boyut, esneklik, parazit önleme ve çok işlevli olma avantajları FBG sensörlerini oldukça cazip kılmaktadır (Novais ve diğ., 2016). Ancak, dalga boyu kaymalarını ölçmek için FBG sensörlerinin pahalı optik sorgulayıcısı pratik uygulamalarını kısıtlamaktadır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), bazı elektro kimyasal parametrelerin tahribatsız tahmini için çok yönlü bir deneysel yöntem olduğu için çok dikkat çekmiştir (Suresh ve diğ., 2002; Zhu ve diğ., 2015).

SEI katman empedansının (ZSEI) yalnızca Li-ion pillerin normal kullanımdayken sıcaklığa duyarlı olduğunu bulunmuştur. ZSEI frekansa bağımlıdır (10 Hz ila 1 kHz arasında geniş bir frekans aralığı) ve dörtlü bileşeni kapasitiftir (negatif faz kaymaları) (Suresh ve diğ., 2002). Hücre sıcaklığını tahmin etmek için sadece faz kaymasını (φ) ölçmenin mümkün olduğu çalışmalarda ortaya konulmuştur (Srinivasan ve diğ., 2018).

SEI katman direnci (RSEI) ve elektrolit direncinin (RS) türetilmesiyle karşılaştırıldığında (Wu ve diğ., 2005), φ çoklu frekans empedansı gerektirmeden sıcaklığı tahmin etmek için daha kolaydır ve elektriksel eşdeğer devre modelinin ölçülen verileriyle iyi eşleşir φ'nin sıcaklığı tahmin etmek için RSEI ve RS'nin etkili bir ikamesi olduğu düşünülmektedir (Srinivasan ve diğ., 2011).

SOC ve SOH etkisi dışarıda tutulduğunda bir frekans aralığı seçmenin önemli olduğunu göstermiştir. Tipik frekans aralığının 10-100 Hz olduğunu bulmuşlardır EIS'ye dayalı sıcaklık ölçümü, batarya yönetim sisteminin (BMS) bataryanın sıcaklığını izlemesi için umut verici bir çevrimiçi tahmin yöntemidir, ancak testlerin çoğu, pratik uygulamalarını kısıtlayan tam çalışma durumlarında batarya gerektirir. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için dinamik koşullar dikkate alınmalıdır (Zhu ve diğ, 2015).

Bazen voltajı izlemek sıcaklığı izlemekten daha etkilidir. Yapılan deneysel çalışmalarda, sıcaklık artış kalorimetrisi ile büyük formatlı bataryaların termal kaçak özellikleri araştırılmıştır. Batarya harici ısıtmaya maruz kaldığında, voltaj düşüşü ile sıcaklık artışı arasındaki aralığın 15 saniye olduğu bulunmuştur (Feng ve diğ., 2014).

Bunun yanı sıra, termal kaçak başlamadan önce iç direncin ($R_{iç}$) 20 mΩ dan 60 mΩ a yavaşça yükseldiği bulunmuştur. Termal kaçak gerçekleştiğinde, $R_{iç}$ dramatik bir şekilde 370 mΩ'a yükselmektedir. Bu termal kaçak sürecini tahmin etmek ve izlemek için başka bir yöntem sağlamaktadır (Feng ve diğ., 2014)

2.11. Pillerin Yanmasının Süreçleri

Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek voltaj ve uzun çevrim ömrü nedeniyle Li-ion piller, 1991 yılında Sony Ltd. tarafından icat edilmelerinden bu yana tüketici elektroniği ve ulaşım gibi alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır (Scrosati, 2011). Li-ion pillerin güvenliği, ciddi sonuçları nedeniyle uzun süredir önemli konulardan biri olarak kabul

edilmektedir. Küçük cep telefonları için bile, bir patlama kazası meydana geldiğinde, kamuoyunun dikkatini güvenlik sorunlarına çekmektedir. Bu pillerin kullanıldığı farklı alanlarda karşılaşılan kazaların milyonlarca dolar zarara neden olması muhtemeldir (Li ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2018).

Tüketici elektroniğinin basit pil sistemleri ile karşılaştırıldığında, elektrikli taşıtlar seri ve paralel bağlı çok sayıda hücre içeren yüksek enerjili ve güçlü batarya sistemleri tarafından tahrik edilmektedir (Park ve Jung, 2013). Örneğin, Tesla Model S (99 kWh batarya paketi) seri ve paralel olarak bir araya getirilmiş 8256 silindirik hücreden güç almaktadır. Bu durum bataryaların güvenlik konusunu daha önemli ve aynı zamanda daha karmaşık hale getirmektedir.

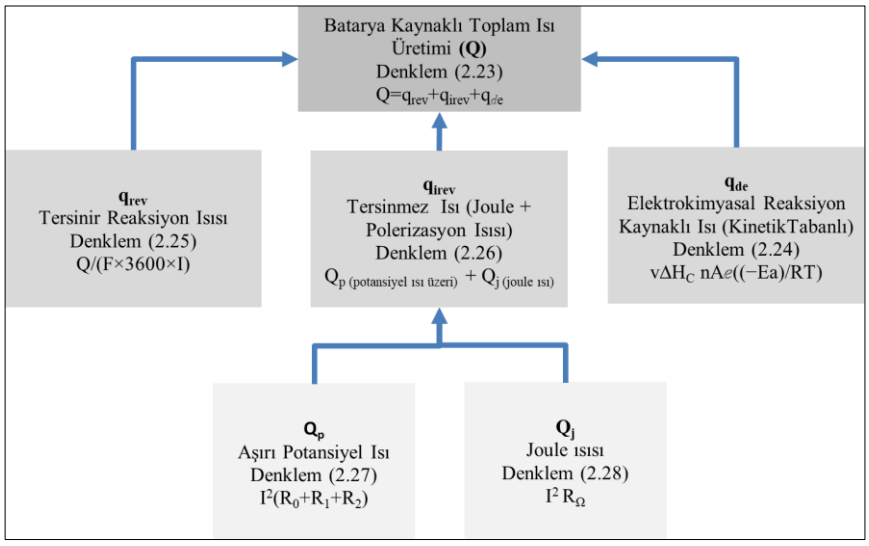
EV'nin özel çalışma koşulları nedeniyle, batarya sistemi Li-ion piller için büyük zorluklar olan farklı titreşim türleri, aşırı sıcaklık, suya batırma, hızlı şarj etme ve benzeri fiziksel etkilere maruz kalmaktadır (Li ve Wang, 2018; Wen ve diğ. 2012). EV'ler için olumsuz koşulları tetikleyici koşullar arasında batarya bloğuna zarar verebilecek boyutta trafik kazaları, sert cisimlerin girmesi, aşırı şarj, aşırı deşarj, batarya bloğuna su sızması, aşırı ısınma ve elektrik sistemi arızası vb. yer almaktadır. EV'ler için daha güvenli bir Li-ion tabanlı enerji sistemi tasarlamak için Li-ion pillerin güvenlik sorununu derinlemesine ve kapsamlı bir şekilde anlamak önemlidir (Golubkov ve Fuchs., 2014, Li ve Wang 2018).

Lityum-iyon bataryalarda meydana gelebilecek en ciddi olay termal kaçaktır ve basınçlı gaz çıkışı yangını, büyük miktarda gaz ve ısı salınımı (ekzotermik reaksiyon) ile sonuçlanır. Lityum-iyon pilin içinde, kısa sürede büyük miktarda kontrolsüz ısı üretimi gerçekleşir.

Katot ve anot aktif malzemelerinin, elektrolit malzemesinin arızalanması, Li-ion pilin alev almasına ve patlamasına neden olabilir (Doughty ve Crafts, 2006). Batarya termal kaçağı genellikle büyük miktarda duman, gaz yayılan kıvılcımlar ve jet alevi ile sonuçlanır.

Termal kaçak başladığında, emniyet valfinden duman çıkar ve deformasyonlar nedeniyle gövde yüzeyindeki açıklıklar nedeniyle bataryanın gövde yüzeyinden sızabilir. Bu gaz çoğunlukla yanıcı ve zehirli gazlardan oluşur. Bu yanıcı gazlar nedeniyle yangın riski

vardır, açık ateş, herhangi bir kıvılcım ve elektrik arkları gibi bir ateşleme kaynağı tarafından tutuşturulabilir veya uygun olmayan bir ısı dengelemesi nedeniyle kendiliğinden tutuşma meydana gelebilir (Sun ve diğ., 2016). Açığa çıkan gaz, insan sağlığını önemli ölçüde etkileyen çok önemli iki zehirli gazdan oluşmaktadır; bunlar hidrojen florür (HF) ve fosfor oksiflorürdür (POF_3). Endüstrideki ciddi olayların sonuç geçmişi nedeniyle, HF'nin toksisitesi iyi bilinmektedir. Ancak diğer yandan POF_3'ün toksisitesi ve sağlık üzerindeki etkileri hala araştırılmaktadır (Larsson ve diğ., 2014.a). Termal kaçak, batarya temellerinin kimyasal reaksiyonları nedeniyle bataryanın iç sıcaklığı kontrolsüz bir şekilde yükseldiğinde ortaya çıkan bir durumdur. Bu reaksiyonlar; katı elektron yalıtım katmanının (SEI) deformasyonundan, elektrolit-elektrot arasındaki indirgeme-oksidasyon reaksiyonlarından veya elektrot-bağlayıcı arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Song ve diğ., 2022). Termal kaçağın daha iyi anlaşılması için elektrotlar, elektrolitler ve SEI'deki her bir elementin deformasyon senaryoları bilinmelidir (Duan ve diğ., 2020). Termal kaçak ile iki şey şiddetli bir şekilde artar: ilki 1000 ℃ veya daha yükseğe ulaşacak sıcaklıklar ve ikincisi açığa çıkan yanıcı ve zehirli gazlardır (Golubkov ve diğ., 2015). Termal kaçak mantığının ortak fikri; batarya içinde artan sıcaklık nedeniyle separatörün (poliolefin) erimesi ve batarya içinde bir kısa devreye neden olmasıdır (Song ve diğ., 2022). Kontrolsüz iç ısı artışı, termal kaçağın temeli olan zincirleme reaksiyonlardan kaynaklanabilir (Song ve diğ., 2022). Termal kaçak sırasında üretilen ısı esas olarak kimyasal reaksiyonlardan ve kütle transferinden kaynaklanır. Batarya içinde üretilen toplam ısı Şekil 2.31'de gösterilmiştir.



Şekil 2.31. Toplam ısı denklemi

"Bernardi denklemi "ne göre toplam ısı denklem 2.23'de formüle edilebilir;

$$Q = q_{rev} + q_{irev} + q_{de} \quad (2.23)$$

q_{de}, termal kaçak oluşumu sırasında malzeme deformasyonundan gelen ısıdır,

ve q_{de} denklem 2.24'deki "Hatchard formülü" ile hesaplanabilir;

$$q_{de} = v\Delta H_C nAe\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \quad (2.24)$$

V: batarya hacmi (m^3),

△H: elektrokimyasal reaksiyon ısısı (KJ/mol),

C: reaksiyon içindeki maddelerin konsantrasyonu (mol/L),

n: sırası,

A: Arrhenius denkleminden ön-eksponansiyel,

E_a: reaksiyon aktivasyonu için enerji (KJ/mol),

R: ideal gaz sabiti değeri, bu da 8.314 (J/(mol K),

T: reaksiyon sırasında sıcaklık (K),

Reaksiyon ısısı q_{rev} denklem 2.25'de hesaplanabilir;

$$q_{rev} = \frac{Q}{F \times 3600 \times I} \quad (2.25)$$

Q: batarya içinde üretilen toplam ısı (J)

F: Faraday sabit değeri 96,484.5 (C/mol),

I: akım (A),

Tersinmez ısı q_{irev} için hesaplama formülü denklem 2.26'da formüle edilmiştir;

$$q_{irev} = Q_p \text{ (potansiyel ısı üzeri)} + Q_j \text{ (joule ısı)} \quad (2.26)$$

Aşırı potansiyel ısı için hesaplama formülü denklem 2.27'de formüle edilmiştir;

$$Q_p = I^2 R_p = I^2 (R_0 + R_1 + R_2) \quad (2.27)$$

I: akım (A),

R_p: polerizasyon iç direnç (Ω),

R_0: ohmik polarizasyon iç direnç (Ω),

R_1: konsantrasyon polarizasyon iç direnç (Ω),

R_2: iç direncin elektrokimyasal polarizasyonu (Ω),

Joule ısısı için hesaplama formülü denklem 2.28'de formüle edilmiştir;

$$Q_J = I^2 R_\Omega \quad (2.28)$$

I : akım (A),

R_Ω : bataryanın iç direnci, (Ω),

Reaksiyonlar sırasında açığa çıkan oksijen elektrolit ve seperatörlerin yangına karışmasına neden olur. Elektrolit ve separatörün toplam ağırlığı düşüktür. Ancak yangın sırasında ısı salınım oranının yaklaşık %80'i bunların yanmasından kaynaklanır (Ghiji ve diğ., 2020).

2.12. Termal Kaçak (Thermal Runaway) Mekanizmasının Sebepleri

Bir Li-ion bataryanın güvenlik özellikleri şunlara bağlıdır;

(a) Hücrenin fiziksel şekli (geometri, malzemeler), (b) zorlamadan önce bataryanın fiziksel durumu (şarj durumu, yaşlanma etkileri), (c) Bataryanın nasıl zorlandığı (düşük veya yüksek sıcaklık, aşırı şarj veya aşırı deşarj, ısıtma), (d) Termal kaçak oluşumuna karşı önleyici tedbirler (yerleşik güvenlik cihazları, soğutma, hapsetme) (Golubkov ve diğ., 2015).

Termal kaçak iki nedenden kaynaklanır: yaygın bir arıza veya günlük kullanımda insan kaynaklı bir yanlış kullanım durumu. İlk olasılık daha azdır ve göz ardı edilebilir. İkinci olasılık üç (kötüye kullanım) durum olarak sınıflandırılabilir edilebilir bunlar; mekanik etki, termal etki, elektriksel etki, olarak sınıflandırılır (Zhang ve diğ., 2021).

Batarya dış gerilim tarafından zorlanırsa, yüzey deforme olur ve içeri nüfuz eder, bu mekanik istismara neden olabilir. Elektrokimyasal reaksiyonların özellikleri nedeniyle bataryalar ısı üretir. Ek olarak, harici bir ısı kaynağı ısı birikimini artırabilir ve termal istismara neden olabilir (Song ve diğ., 2022). Elektrotlar için malzeme seçimi, hem batarya kapasitesini hem de termal kararlılığı tanımlamak için önemlidir. Örneğin, katot malzemesinde Ni malzeme kullanımı (NCA) ve Mn malzeme bazlı Li oksitler (M=Mn, Co, Ni) batarya kapasitesini artırmakta ancak termal kararlılığı azaltmaktadır. Aynı durum anot için de geçerlidir; silikon veya kalay bazlı karbon kompozitler çevrim kararlılığını artırırken termal kararlılığı azaltır (Duan ve diğ., 2020).

Ekzotermik reaksiyonlar esas olarak bataryaların içinde ısı birikimini tetikler. Bu tetikleyiciler şunlardır:

(1) Katotta aşırı delitleşme geri dönüşü olmayan form değişikliğine neden olur ve bu da oksijenin serbest kalmasına ve organik çözücülerin oksitlenmesine neden olur.
(2) Lityum dendritlerin sürekli büyümesi anoda ulaşırken, elektrolitlerle reaksiyona girerler, sonunda bu etkileşim ayırıcıdan geçerek bataryanın dahili kısa devresine neden olur (URL-10).
(3) Sıcaklığın 130 °C 'nin üzerine çıkması separatörün erimesine ve dahili bir kısa devreye neden olur.
(4) 200 °C 'nin üzerindeki yüksek sıcaklık elektroliti ayrıştıracaktır. Karbonat organik çözücülerin düşük parlama noktası ve kaynama noktaları nedeniyle büyük miktarda ısı üretilecektir.

Pil aşırı şarj edilirse, kısa devreye neden olabilir ve bu da elektriksel istismara neden olur.

Bu kötü kullanım koşulları zincirleme reaksiyonları başlatır ve iç ısı aniden artabilir. Bu da termal kaçak, yangın, patlama ve zehirli gaz salınımına yol açabilir. Koch'un Li-ion bataryalar üzerinde yaptığı deneyler bataryanın kütle kaybını hesaplamış ve termal kaçak

sırasında açığa çıkan gaz miktarını hesaplamak için parametreler belirlemeye çalışmıştır. Bu denklem 2.29'da formüle edilmiştir.

$$v_{gas} = \frac{V_{void\ CN_2Air}}{c_{N_2 vent}}\ c_{gas}vent \qquad (2.29)$$

V_{gas}: salınan gaz miktarı (m^3),

Vv_{oid}: otoklav hacmi (m^3),

CN_{2Air}: nitrojen konsantrasyonu (atmosfer) (mol/L)

CN_{2Vent} : nitrojen konsantrasyonu (Terml Kaçak sonrası) (mol/L)

C_{gas}Vent: boşaltılan gazın toplam konsantrasyonu (mol/L)

Bu nedenlerden dolayı, bataryaların ısıl kaçağa karşı izlenmesi çok önemlidir (Song ve diğ., 2022). Sıcaklığa karşı termal kaçak reaksiyonunun aşamaları Tablo 2.10'da verilmiştir.

Başlıca kimyasal reaksiyonlar termal kaçak mekanizmasını açıklamak için önemlidir ve ilgili zincir reaksiyonları Tablo 2.11'de gösterildiği gibidir (Peng vd., 2019).

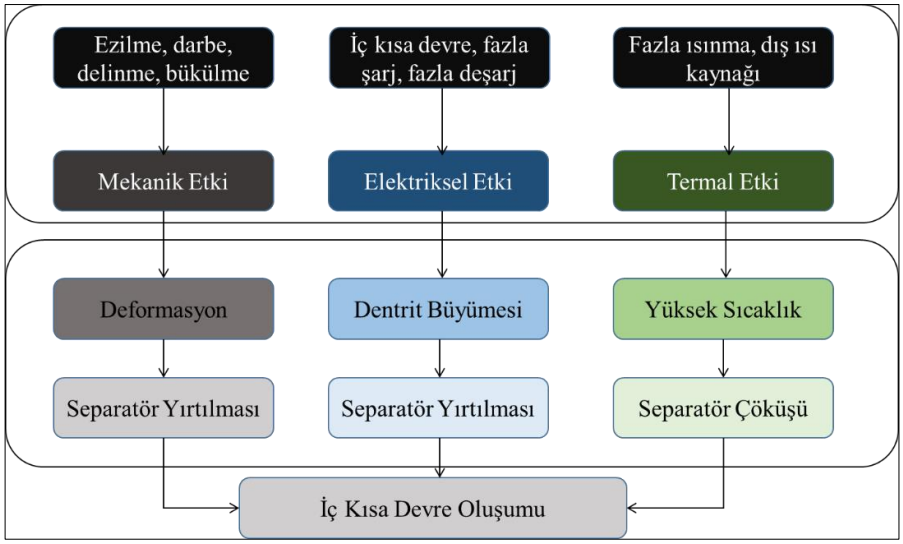
Tablo 2.10. Termal kaçak mekanizmasının oluşum basamakları

<90°C	Bataryanın bir olumsuz duruma uğrar,
90°C **–120**°C	Lityum tuzu $LiPF_6$ ve SEI filminin çözünür, Çözünüm nedeniyle ısının artması, sıcaklığın 120 °C e ulaşır,
120°C **–150**°C	Son derece reaktif LiC_6 egzotermik reaksiyona başlar, Elektrolitin dağılması PF_5 oluşumuna neden olur, Organik çözücülerin çözülmesini etkinleştirir,
150°C **–200**°C	Polyolefin separatorün erimesi gerçekleşir, Büyük bir alanda gerçekleşen kısa devre, yüksek miktarda ısı salınımına (HR) sebep olur,
200°C **–300**°C	Katot malzemesi dağılır ve oksijen salınımı gerçekleşir, Elektrolit ile yüksek miktarda oksidasyon reaksiyonu oluşumu, Fazla miktarda ısı, hidokarbon gaz salınımı, Yanabilir gaz karışımının 300°C de tutuşması,

Tablo 2.11. Termal kaçak sırasındaki gerçekleşen başlıca reaksiyonlar

Aşama	Ana Reaksiyonlar	Denklemler
I	SEI bozunumu	$(CH_2OCO_2Li)_2 \rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4 + CO_2 + 0.5O_2$
	Anot reaksiyonu	$2Li + C_3H_4O_3$ (EC) $\rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4$
		$2Li + C_4H_6O_3$ (PC) $\rightarrow Li_2CO_3 + C_3H_6$
		$2Li + C_4H_6O_3$ (DMC) $\rightarrow Li_2CO_3 + C_3H_6$
II	Seperatörün erimesi	-
	$LiFePO_4$ katot bozunumu	$2Li_0FePO_4 \rightarrow Fe_2P_2O_7 + Li_20$
	Elektrolit bozunumu	$LiPF_6 \rightarrow LiF + PF_5$
III	İç kısa devre	-
IV	Elektrolitin yanması	$2.5O_2+C_3H_4O_3$(EC) $\rightarrow 3CO_2 + 2H_2O$
		$4O_2+C_4H_6O_3$(PC) $\rightarrow 4CO_2 + 3H_2O$
		$3O_2+C_3H_6O_3$(DMC) $\rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$

Bazı kötüye kullanım koşulları veya termal kaçak mekanizmasını tetikleyebilecek ve Li-ion pillerde yangın, patlama ile sonuçlanabilecek bazı arızalar temel olarak üç kategoride listelenebilir, kısa devre ve şarj arızası elektrik arızası altında listelenebilir. Termal kaçak sebepleri Şekil 2.32'de verilmiştir.

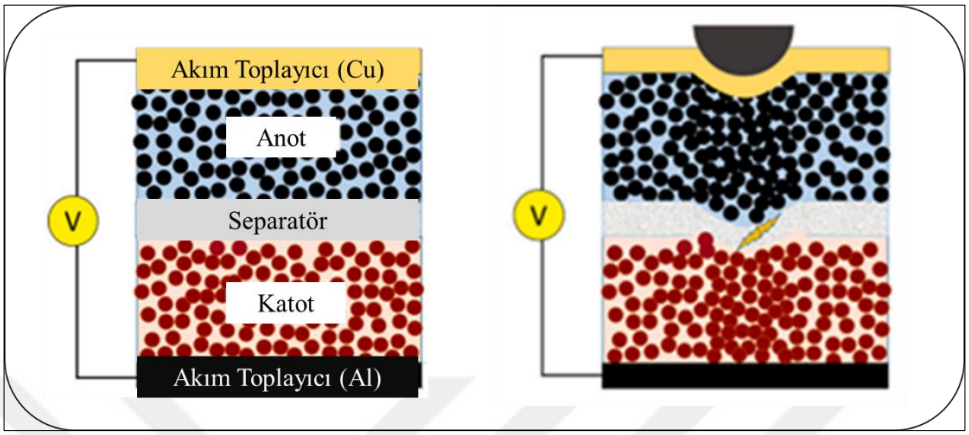


Şekil 2.32. Termal kaçak oluşum sebepleri

2.12.1. Mekanik Etki

Hücrenin çarpması, sıkışması, kesilmesi ve bükülmesi gibi yapısal bir deformasyondan kaynaklanabilir. Bu koşullar bataryada kısa devrelere neden olur (Zhang ve diğ., 2021).

Bu deformasyonlar, hücre bileşenlerinin gözenekliliğinin mikro yapısını değiştirir. İletkenlik ve aktarım özellikleri bu senaryodan etkilenir ve kısa devreye yol açar. Bu durum Şekil 2.33'de gösterilmektedir (Li ve diğ., 2022).



Şekil 2.33. Hücrede mekanik istismar ve kısa devre gerçekleşmesi

Hücreler mekanik olarak zorlandığında, daha yüksek şarj durumuna (SOC) sahip hücreler iç sıcaklıklarını hızla artıracaktır. Kısa devre gerçekleştikten sonra 5 saniye içinde zirveye ulaşacaklardır.

Bu, bataryanın ısı üretiminin doğrudan şarj durumuna bağlı olduğu anlamına gelir. Şarj miktarı artarsa, ısı da artacaktır (Xu ve diğ., 2021). Bir diğer kritik bilgi de mekanik stresin oluşma hızının termal kaçak için gerçekleşme süresini kısaltacağı ancak duman salınım süresini azaltacağıdır (Bai ve diğ., 2021).

Bataryalara harici bir darbenin neden olabileceği herhangi bir mekanik hasar nedeniyle gerçekleşir. Buna verilebilecek örnekler; bir trafik kazası, bataryaya doğrudan veya dolaylı herhangi bir darbe veya bataryanın düşmesi sonucu ezilmesi gibi herhangi bir hasar, batarya içinde anot ve katot arasında elektriksel kısa devreye neden olabilir ve elektrolitin bölgesel ısı üretmesine neden olabilir (Ghiji ve diğ. 2020).

Mekanik deformasyon ayrıca pil hücresinin içinde bir kısa devre başlatabilir ve potansiyel olarak yangınla sonuçlanabilir, Ciddi deformasyon, belirli çarpışma veya yere çarpma koşullarının bir sonucu olabilir. Pil paketinde ciddi deformasyonlardan kaçınılmalıdır. Bu hasarlar yüksek gerilim sisteminde hasara sebep olabilir ve kısa devrelere neden olabilmekte, ayrıca yanıcı ve iletken sıvıların sızmasına yol açabilmektedir.

Bir araba kazasında en kötü senaryo, gazların veya sızan sıvıların elektrik arkları veya sıcak yüzeyler gibi ateşleme kaynaklarıyla birleşmesi olacaktır. Bu, potansiyel olarak sıkışmış yolcuların taşıttan güvenli bir şekilde kaçması için geciktirilmesi gereken hızlı bir senaryoya gereksinim duyabilmektedir (Trattnig ve Leitgeb, 2014).

Çarpışma koşullarından kaynaklanan dahili bir kısa devrenin sonucunun şiddeti çok sayıda faktöre bağlıdır. Mekanik temas, ısı üretimi ve termal kaçakla sonuçlanabilecek veya sonuçlanmayabilecek elektrik deşarjı arasındaki etkileşim öne çıkar (URL-18).

Batarya, taşıtlarda genellikle taşıtların güçlendirilmiş ve sert bölgelerine yerleştirilmektedir. Bataryanın yandan çarpışmalarda, küçük üst üste çarpışmalarda ve yoldan kaynaklanan darbelerden kaynaklanan penetrasyona karşı hala savunmasız olduğunu belirtmektedir (Zhu ve diğ., 2018).

Batarya paketleriyle birlikte çarpışma testine tabi tutulmuş EV'ler hakkında çok fazla test verisi mevcut değildir. Bunun nedeni, bu kombinasyonun test edilmesinin test tesisleri için birçok tehlikeyi beraberinde getirmesidir.

Mevcut verilerin çoğunun sayısal simülasyonlardan elde edilmiştir (Zhu ve diğ., 2018). EV lerin bataryalarının zemin etkisi nedeniyle hasar sürecini modelleyen genel bir sayısal model geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, diğer şeylerin yanı sıra, pil hücrelerinin çakıl gibi uçan taşların etkisiyle hasar görme olasılığının olmadığını göstermiştir (Xia ve diğ., 2014).

Ancak, geometrik özelliklere sahip yol döküntüleri belirli koşullar altında bataryayı delebilir. Yol kaynaklı mekanik hasarın tamamen önlemenin neredeyse imkânsız olduğu belirtilmektedir. Koruma kapağı delindiğinde diğer katmanlar kısa bir süre sonra hasarlanacaktır. Bu da her bir Li-ion hücresinin yırtılan koruma kapağı ya da yol enkazıyla temas etmesine neden olabilir.

2.12.2. Elektriksel Etki

Kötüye kullanım durumu temel olarak; bataryanın tüm seviyesinin ötesinde şarj edilmesi (aşırı şarj), derin deşarj ve harici kısa devreler durumunda ortaya çıkar. Bunlar batarya bileşenlerini tahrip eder, ekzotermik reaksiyonları tetikler ve termal kaçak başlatır (Zhang

ve diğ., 2021). Aşırı şarj, metal parçalanması ve faz değişimi olaylarını geçerek katot malzemesinin bozulmasına neden olabilir.

Kimyasal reaksiyon (ekzotermik), lityum aşırı şarj edilmiş anodu kapladığında başlar ve pilin ısınmasını hızlandırır. Batarya paketinin hasar görmesi ve bataryanın tam şarjın ötesine zorlanmasının neden olduğu membranın erimesi, termal kaçağa neden olan en kritik koşullardır.

Termal kaçak ile sürekli şarj ve deşarj döngüleri arasındaki ilişkiyi anlamak için bazı deneyler yapılmıştır. Birim zamandaki şarj miktarı (şarj oranı olarak adlandırılır) arttığında ve aşırı şarj koşuluna ulaştığında, termal kaçak oluşma süresi azalır. Li-ion bataryalar dinamik ortamları nedeniyle termal kaçağa daha yatkındır.

Oluşum, batarya kesme voltajından sonra şarj etmeye devam etmeye zorlandığında gerçekleşir (URL-16).

Akülerin kesme voltajının ötesinde şarj edilmesi, elektrotlardan daha fazla lityum iyonunun çıkmasına (delithiation) neden olacaktır.

Kısaca, bataryanın aşırı şarj edilmesi katot malzemesinin deforme olmasına ve ekzotermik reaksiyonların şiddetlenmesine neden olur. Bu da büyük miktarda ısı yaratır ve iç sıcaklığı artırır. Aşırı şarjın elektrikli taşıt arızalarındaki en önemli faktörlerden biri olduğu iyi bilinmektedir. LFP bataryaları, katot malzemesinin dayanıklı yapısı nedeniyle tam delitasyonu sonrasında en iyi aşırı şarj performansına sahiptir. Iriyama'nın deneyleri, bu tip pillerin 5,0 V'a (Li/Li+'a kıyasla) kadar şarj edilseler ve şarj seviyesi %180 SOC'nin üzerinde olsa bile yapılarını sabit tutabileceklerini göstermektedir (Iriyama ve diğ. 2004). Aşırı şarj, geçen lityum iyonlarının elektrolit içinde çözünmesi nedeniyle anodun elektrokimyasal performansında düşüşe neden olacaktır.

Li-ion bataryanın performansı aşırı deşarj durumuna bağlı olarak azalır. Aynı zamanda kısa devre nedenidir. Bunlardan sonra SEI filmi işlevini yitirir ve anot tahrip olur. Bu tahribatı CO_2, CO, PF_5, HF gibi gaz salınımları ve hücre şişmesi takip eder.

Tanımlanan şarj özelliklerinin dışında aşırı şarj veya derin deşarj lityum üzerinde kaplamaya veya anot yüzeyinde bir dendrit oluşmasına neden olabilir. Zamanla, ayırıcı

nüfuz edebilir ve elektrotlara temas edebilir ve elektrotlar arasında bir kısa devreye ve termal bir kaçağa neden olabilir (Ghiji ve diğ. 2020).

Hücre içinde meydana gelen kısa devre en tehlikeli termal kaçak sebebi olarak kabul edilmektedir (Zhao ve diğ., 2015). Gelişen durum çok ani ve önceden uyarı olmaksızın meydana gelebilir. Oluşum sebebi ise üretim hataları, dendrit büyümesi veya mekanik deformasyondan kaynaklanan fiziksel hasarın bir sonucu olabilmektedir (Larsson, 2017.a). Hücre içinde kısa devre meydana geldiğinde, ortaya çıkan hasar genellikle ağırdır. Hücre, enerjisini kısa devre yoluyla boşaltır. Elektrik akımı iletken malzemeden geçtiğinde ısı üretir. Hızlı ısınma daha fazla kendi kendine ısınmayı ve termal kaçağı tetikleyebilir (Zhao ve diğ., 2015).

Bu tür arızaların endüstri standartlarına uygun üretilen bataryalarda meydana geldiği ve nedenlerinin; çapaklar, elektrot paketinin yanlış hizalanması veya delinmiş separatörler gibi üretim hatalarıdır. Birincil neden, katot içinde veya üzerinde partiküllerin varlığıyla ilgilidir (Tidblad, 2018).

Elektrikli taşıtların bataryalarında kullanılanlar büyük formatlı Li-ion hücrelerinin iç kısa devre sırasındaki davranışları incelendiğinde, mekanizma, kısa devrenin bulunduğu elektrot katmanı içinde bir akım döngüsü oluşumu olarak açıklanmıştır. Döngü oluştuğunda, enerji bu elektrot katmanından boşaltılır, ancak bu aynı zamanda kısa devre nedeniyle büyük miktarda akım üreten diğer tüm katmanları da zorlar. Bu da pil hücresinin tamamını ısıtır.

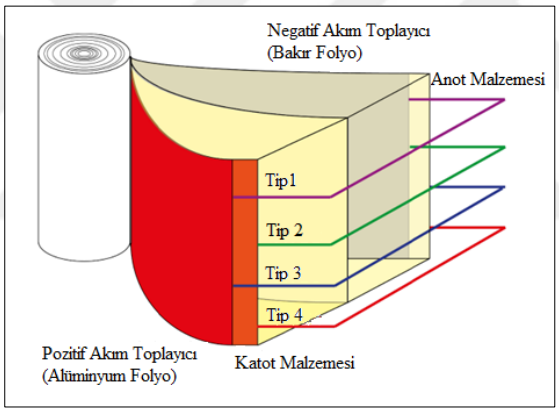
Dört olası dahili hücre kısa devre tipi senaryosu mevcuttur. Bunlar;

(1) Tip 1: negatif akım toplayıcı ile pozitif akım toplayıcının,
(2) Tip 2: negatif akım toplayıcı ile katot,
(3) Tip 3: pozitif akım toplayıcı ile anot,
(4) Tip 4: katot ile anot arasında temas olmasıdır.

Üçüncü tip olan Tip 3 en tehlikeli olanıdır (Santhanagopalan ve diğ. 2009). Bu 4 tip Şekil 2.34'de gösterilmiştir. Anot malzemesi, katoda kıyasla düşük özdirence sahiptir ve bu da yüksek akım akışına izin verir. Bu da anotta çok fazla ısı üretileceği anlamına gelmektedir. Aynı zamanda, kendiliğinden ısınma reaksiyonları için başlangıç sıcaklığı

anotta en düşüktür. Bu faktörler bir araya geldiğinde, termal kaçağa yol açabilecek kendi kendine ısınma mekanizmalarını tetikleme olasılığı yüksektir.

Diğer 3 kısa devre tipi daha az tehdit oluşturmaktadır (Santhanagopalan ve diğ. 2009). Tip 1, harici hücre sıcaklığını 100 ℃'ye kadar artırarak büyük miktarda ısı üretilmesine neden olur. Bununla birlikte, mevcut kolektör malzemeleri iyi ısı iletkenleridir, bu da üretilen ısının daha fazla reaksiyonu önlemek için yeterince hızlı dağıtılabileceği anlamına gelir. Tip 2, tüm tipler arasında en düşük yerel ısınma miktarına sahiptir. Bu, herhangi bir kendi kendine ısınma mekanizmasını tetiklemek için yeterli değildir. Son olarak, Tip 4, bir pilin ömür döngüsü boyunca meydana gelmesi en muhtemel dahili kısa devre türüdür. Bunun sonucu ortam sıcaklığının üzerinde küçük bir sıcaklık artışıyla sınırlı kalacaktır. Tip 1, 2 veya 4 bile uzun bir süre boyunca devam ederse bir termal kaçağı tetikleyebilmektedir (Santhanagopalan ve diğ. 2009).



Şekil 2.34. Kısa devre oluşma ihtimalleri (Santhanagopalan ve diğ. 2009)

Li-ion piller belirli bir süre boyunca belirli bir miktarda enerji almak ve depolamak üzere tasarlanmıştır. Çok hızlı şarj etme veya aşırı şarj etme sonucunda bu sınırlar aşıldığında, hücre performansı düşebilir, hatta hücrede arızaya yol açabilir.

Aşırı şarj, şarj cihazı bozulduğunda veya yanlış şarj cihazı kullanıldığında hücre voltajı şarj cihazı tarafından yanlış algılandığında gerçekleşebilir (Tobishima ve Yamaki, 1999).

Aşırı şarj sırasında anot malzemesi aşırı derecede lityumlaşabilir. Bunun sonucunda, lityum interkalasyonu durur ve anot üzerinde lityum metal birikintileri oluşur. Bu birikintiler büyüyerek metalik uzantıları oluşturur. Bunlar dendrit olarak adlandırılır. Bu dentritler büyüdükçe, bir noktada separatöre ulaşabilirler ve dahili bir kısa devreye neden

olurlar (Hendricks ve diğ., 2015). Dört LFP katot ve C anot malzemesi olan batarya hücresinin aşırı şarj nedeniyle kendi kendine ısınmasının başlangıcı değerlendirilmiştir. Tam şarjlı ve hafif aşırı şarjlı olduklarında, sırasıyla % 100 SOC ve % 105 SOC durumunda kendi kendine ısınma mekanizmaları tetiklenmiştir Karbon anotlu NMC ve NCA dahil olmak üzere diğer hücre tipleri de test edilmiştir. Bunlar, sırasıyla %135 SOC ve %130 SOC'de kendiliğinden ısınma meydana geldiği için aşırı şarja karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir (Brand ve diğ., 2016).

Elektrik akımı iletken malzemeden geçtiğinde, Joule ısısı olarak adlandırılan ısı üretir. Bu, daha hızlı şarj oranlarıyla ilişkilendirilebilecek yüksek akımın pil hücresi içinde üretilen ısıyı artırdığı anlamına gelir. Yeterince yüksek bir akım seviyesinde batarya hücresinin kolayca arızalanma tehlikesi vardır. Çok yüksek şarj voltajı da katot yapısının dengesizleşmesine yol açabilir ve bu da katodun ayrışmaya başladığı sıcaklığı düşürmektedir (Tobishima ve Yamaki, 1999).

Aşırı şarj koşullarının, bir başka deyişle yüksek şarj oranlarında şarjın etkisi deneysel olarak incelendiğinde, yüksek 2C şarj oranlarında güvenlik menfezinin ve anot kapağı muhafazasının aynı anda açıldığını ve hücrenin patladığını tespit edilmiştir (Tobishima ve Yamaki, 1999).

Aşırı şarj testlerinde, 2 C ile aşırı şarj edilen 4 adet LFP hücresinden biri yangınla sonuçlanmıştır. (Larsson ve diğ., 2014.a; Larsson ve diğ., 2016.a). Genel olarak, 0,5 C ve üzerinde şarj ederken kötüye kullanımın meydana gelebileceği deneysel olarak tespit edilmiştir (Wang ve diğ., 2012). Dahili kısa devreler oluşturabilen lityum dendritlerin hızlı bir şekilde başlamasını ve büyümesini önlemek için düşük sıcaklıklarda, örneğin 0 ℃'nin altında şarj etmekten kaçınılmalıdır. Şarj işlemi esnasında lityum iyonlarının katottan anoda doğru hareket etmektedir. Düşük sıcaklıklarda şarj, Li-ion hücresindeki bu kinetik süreci etkiler. Sonuç olarak, lityum-iyonları anot içine karışmak yerine metalik lityum oluşturabilir. Bunlar hızla dendritleri başlatır. Bu da dahili kısa devrelere neden olabilir (Love ve diğ., 2015).

Li-ion pil deşarj edildiğinde, lityum iyonları negatif akım toplayıcıdan ve anottan akar pozitif akım kollektörüne ve katoda geçer. Eğer deşarj seviyesi çok büyük olursa Bununla birlikte, bakırdan oluşan negatif akım toplayıcı çözünebilir. Sonuç olarak, Elektrolit

içinde küçük iletken bakır partikülleri açığa çıkar ve bu da dahili bir kısa devre riskini artırır (Hendricks ve diğ., 2015).

Pil hücreleri minimum voltajlarının altında deşarj edildiğinde aşırı deşarj zorlanması meydana gelir.

Dört pil hücresinin seri halinde olduğu ve bunlardan birinin tamamen boşaldığı (0 V) olası bir durumda, boş hücrenin daha da fazla boşalmasına yol açabilir. Bu durumda hücrenin polaritesi tersine döner. LFP, NMC ve NCA hücreleri üzerinde yapılan aşırı deşarj istismarı çalışmalarında bu senaryo uygulanmıştır. Pillerin % 100 SOC'den 1C oranında boşaltılmış ancak önemli sıcaklık artışları (maksimum 47,5 ℃) tespit edilmemiştir. Hücre muhafazasında hasar gözlemlenmemiştir (Brand ve diğ., 2016).

25 Ah kapasiteli, NMC torba tipli hücreler üzerinde aşırı deşarj testleri gerçekleştirilmiştir Aşırı deşarj sırasında farklı arıza aşamalarını tanımlamışlardır. -% 10 SOC'da (tam kapasite, yani hücrenin ters polaritesi) SEI tabakası ayrışmaya başlamakta ve bunu bakır kolektörün % 12 SOC'de akımının çözünmesi izlemektedir (Guo ve diğ., 2016).

% 12 SOC'ın altındaki şarj seviyelerinde, şarj seviyesinin azalması ile dahili kısa devre yoğunluğu artmaktadır. Bu tehlike, pil hücreleri seri bağlandığında daha büyümektedir (Guo ve diğ., 2016). Aşırı deşarj, bir batarya deşarj edilirken, bataryayı oluşturan her bir hücrenin şarj seviyelerinin dengede olmadığında meydana gelir. Normalde bunu önlemek için güvenlik sistemleri mevcuttur. Ancak, bu güvenlik sistemlerinin başarısız olması ve bataryanın yanlış kullanılması durumunda bunun meydana gelmesi hala mümkündür (Hendricks ve diğ., 2015).

Bataryanın uzun süre depolandığı durumlarda, kendi kendine deşarj olması söz konusu olabilir. Batarya şarj edildiğinde ise tekil hücrelerde çok düşük SOC'e ulaşan olması durumunda soruna neden olabilir. Ancak, kendi kendine deşarj tek başına ters polarite anlamında aşırı deşarja neden olamaz.

Harici bir kısa devre, pilin dengesini bozabilecek başka bir elektrik istismarı biçimidir. Bu olay, bataryanın örneğin bakım sırasında ciddi mekanik deformasyon ve darbeye, suya daldırılmaya, korozyona ve elektrik şokuna maruz kalması durumunda meydana gelebilir.

Prizmatik LCO hücrelerinin harici bir kısa devreye maruz kaldığında verdiği incelendiğinde çok yüksek bir akım tepe noktası ve 132°C'lik bir iç hücre sıcaklığı gözlemlenmiştir (Leising ve diğ., 2001). Harici kısa devre testleri üç farklı hücre tipi üzerinde gerçekleştirilmiştir Bu, 10000 A ile sınırlandırılmış bir kontaktör ile gerçekleştirilmiştir. İlk hücre tipi, sert plastik ambalaj malzemeli bir hücrenin kısa devresi, kaydedilen 3200 A'lik bir başlangıç akımına karşılık gelmiştir. Hücre içindeki basınç daha sonra önemli ölçüde artmış ve hücre parçalara ayrılmıştır. İkinci hücre tipi olan metal folyo muhafazalı bir torba tipi hücrede, 1800 A'lik bir ilk akımın ardından önemli ölçüde genişlemiş ve ardından hücre yırtılmıştır. Üçüncü hücre tipi olan metal muhafazalı pil kısa devreden etkilenmemiştir. İlk 200 A akım ölçüldükten sonra hiçbir olay gözlenmemiştir (Davidsson ve diğ., 2010).

Li-ion hücreleri üzerinde harici kısa devre kötüye kullanım testleri gerçekleştirmiştir. İlk testte kısa devre başlatıldıktan 20 ila 30 saniye sonra hücre genişlemiştir. Ardından, hücreler 2 dakika boyunca havalandırılırken ölçülen akım düşmüştür. 100 ℃'ye varan harici hücre sıcaklıkları kaydedilmiş ve ardından % 43 SOC'e deşarj edilmiştir. Terminal Bu test sırasında dikkate alınan pil hücrelerinden birinin sekmeleri yanmış ve böylece harici kısa devreyi kesmiştir. (Larsson ve diğ., 2014.b; Larsson ve diğ., 2016.a).

Bağımsız ve seri bağlı 10Ah torba tipi hücrelerin harici kısa devre direnci, terminallere farklı dış dirençler uygulanarak denemeleri yapılmıştır. Gözlemlenerek davranışlar üç aşamada sınıflandırılmıştır. İlk olarak yüksek akımlar kaydedilmiş, bunu bir akım düşüşü takip etmiştir. Hücre sıcaklığında artış, elektrolitin buharlaşması, ve hücreden çıkışı gerçekleşmiştir. Son olarak, aktif malzeme boşaldıkça akım düşmüştür. Termal kaçak, veya önemli miktarda duman salınımı gözlenmemiştir (Kriston ve diğ., 2017).

2.12.3. Termal Etki

Bataryalar üzerindeki termal etkiler iki koşulda analiz edilebilir; düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık koşulları;

Bataryaların donma sıcaklığına yakın düşük sıcaklık performansı; Li-ion bataryalarda kapasite kaybı, güç zayıflığı, şarj zorluğu vb. Düşük sıcaklık aynı zamanda elektrolitin iletkenliğinin azalmasının, elektronların transfer kinetiğinin özelliklerinin azalmasının,

SEI filminin direncinin artmasının, daha fazla direncin ve grafitte lityum difüzivitesinin azalmasının bir nedeni olabilir. Azalan lityum iyonları difüzivitesi interpolasyon oranının düşmesine ve grafit yüzeyinde şarj işlemi sırasında lityum kaplanmasına neden olacaktır. Taşınan lityum iyonları nedeniyle, "ölü lityum" haline gelecek ve diğer elektrot reaksiyonları için mümkün olmayacaktır, bu senaryoda kapasite kaybının birincil nedeni gerçekleşir.

Batarya 60 ℃ iç sıcaklığı aştığında, ayırıcı film çökmeye başlayacak ve lityumlu anot (LiC_6) elektrolit ile reaksiyona girecektir. Yüksek sıcaklık, metal iyonlarının elektrolite dönüşümünün çökmesine neden olacaktır. Bataryanın kapasite azalması artan sıcaklıklarda daha güçlü olacaktır.

Isı birikimi tüketilen ısıdan daha dikkat çekici ise hücre sıcaklığı hızla artacak ve ek reaksiyonları tetikleyecektir. Aşırı ısınan bataryalar sıcaklık artışına neden olur ve buna bağlı olarak kimyasal reaksiyonlar meydana gelir: Separatörün hasar görmesi çökmeye neden olur ve elektrolit içindeki anot ve katot arasındaki kimyasal reaksiyonlar aktif malzemelerde ve bağlayıcıda aşınmaya neden olabilir.

Kritik sıcaklık 90 ℃'dir, ısı artışı bu kritik noktaya ulaştığında, SEI filmi işlevini kaybedecek ve çökecektir ve reaksiyonlar iç basıncın artmasına ve muazzam miktarda ısı, toksik gaz ve çözücü salınmasına neden olacaktır. Bu gerçekleştiğinde, batarya tüm kapasitesini kaybedecektir. Tüm bu reaksiyonlar akülerde termal kaçak olaylarına neden olur.

Termal kaçak batarya kapasitesine, havalandırmaya ve tasarım kriterlerine bağlıdır. Li-ion bataryalar üzerinde yapılan deneylere göre, aşırı şarj sırasında voltaj kritik kırılma noktasına ulaşırken, 5 dakika içinde durdurulabilir ve ısı giderilebilirse, termal kaçak önlenebilir. Aynı deneyler, daha hızlı şarj oranlarının, belirli bir birim zamanda daha fazla yükleme yapılması nedeniyle batarya içinde kısa sürede ısı birikmesine neden olduğunu göstermiştir (Chen ve diğ., 2020).

Bu suistimaller, ısı üreten ekzotermik reaksiyonlara neden olur ve bu ısı pilin bileşimini değiştirir; katı elektrolit kesişiminin bozulması bu ayrışmaların bir örneğidir (Zhang ve diğ., 2020).

Hücrelerin iç sıcaklığı 90 ℃ ile 120 ℃ aralığına ulaştığında, ayrışma başlar ve katı elektrolit arayüz tabakası ekzotermik bir reaksiyon başlatır. Hidrokarbon elektrolit 200 ℃ sıcaklığın üzerinde ayrışabilir ve aşırı ısı açığa çıkmasına neden olur. (Ghiji ve diğ. 2020).

Li-ion hücre güvenliğinin sınırlayıcı faktörlerinden biri termal kararlılıktır. Pil, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında iç bozunma mekanizmalarına ve ekzotermik reaksiyonlara yol açabilir. Pilin dış sıcaklığı iç sıcaklığından daha yüksek olduğunda, pilin ısınması söz konusu olur. Pil belirli sıcaklık seviyelerine kadar ısındığında ise, ayrışma mekanizmaları tetiklenerek pilin daha fazla ısı üretmesine neden olur.

300 ℃'ye ısıtılan bir fırına prizmatik tipte LCO hücreleri ile yapılan çalışmada tüm hücrelerin 190 ℃'nin üzerindeki sıcaklıklarda termal kaçağa uğradığı ve duman ve gaz çıkardığı tespit edilmiştir. Deneydeki pillerin yarısında fırında biriken gazlar tutuşmuş ve patlamıştır. Bu, termal kaçak başladıktan yaklaşık 15 saniye sonra meydana gelmiştir. Termal kaçaktan kısa bir süre önce, hücre yanan elektroliti boşaltmıştır (Larsson ve diğ., 2014.b).

Pil hücrelerini bir fırına yerleştirmek yerine harici ateşe maruz bırakıldığında da benzer bir şekilde, bir termal kaçak olayını tetikleyebilir (Larsson ve diğ., 2016.b; Larsson ve diğ., 2014.b; Larsson ve diğ., 2017.a; Larsson ve diğ., 2016.a).

Batarya paketinin tamamı da harici bir yangına maruz kalabilir. Bu, örneğin HV aracın batarya paketinin altında biriken ve tutuşan yakıt sızıntısının bir sonucu olabilir. Zamanla ısı batarya paketine nüfuz edebilir, hücre arızasını başlatabilir ve paket içinde daha da yayılabilir. Bu riski azaltmak için elektrikli taşıtların UNECE Reg. No. 100 gibi yangına dayanıklılık testinden geçmesi gerektiği belirtilmektedir (URL-19). Batarya paketi bu ilgili testte, 30 s içinde en az 800 – 1100 ℃'ye ulaşan harici alevlere maruz kaldığı süre 2 dakikadır. Bu test benzin tankları üzerinde yapılan teste benzemektedir. Test süresi boyunca bataryanın ortam sıcaklıklarına ulaşacağı veya en az 3 saat boyunca sıcaklığının düşeceği takip eden gözlem süresi boyunca herhangi bir patlama belirtisi olmadığında, bu testin geçildiği kabul edilebilir.

Başarılan testler, çok yüksek bir yangın direncinin elde edilebileceğini göstermiştir. Li-ion pil paketi bir EV taşıtta harici ısı karşısında, 25-40 dakika boyunca yangına katkıda bulunmadığı görülmüştür. Bataryanın taşıt dışında ayrı olarak düşünüldüğünde bu süre 2-11 dakikaya kadar düşebilmektedir (Wang ve diğ., 2018; Gong ve diğ., 2019; Zhang ve diğ., 2016; Lee ve diğ., 2012; Zhai ve diğ., 2014; Shi, ve diğ., 2015). Yüksek sıcaklıklara maruz kalma, gevşek batarya hücresi konektörleri gibi üretim hatalarının bir sonucu da olabilir.

2008 yılında yangın sonucu tahrip olan bir PHEV incelenmiştir. Yangın sebebinin muhtemelen gevşek konektörler olduğu bulunmuştur. Titreşimli bir taşıtla birlikte bu durum ısı birikimine yol açmıştır. Bunun sonucunda batarya hücreleri kısa devre yaparak aracın yanmasına neden olmuştur (URL-20).

Li-ion pillerin ortam sıcaklığını yükseltmenin olumsuz sonuçları olabileceğini göz önünde bulundurmak önemlidir. Bu durum doğrudan olumsuz reaksiyonları tetiklemese de güvenlik aralığını azaltır. Güvenlik sınırına yaklaşıldığında, daha fazla kendiliğinden ısınma reaksiyonlarını tetiklemeyecek olan dahili kısa devre reaksiyonları bir pil hücresini sınırın üzerine itebilir (Santhanagopalan ve diğ. 2009).

2.13. Li-ion Pillerin Farklı Sıcaklık ve Voltaj Değerlerinde Davranışları

2.13.1. Farklı Voltaj Değerlerinde Li-ion Bataryaların Davranışları

Aşırı şarj genellikle batarya kesme voltajına ulaştıktan sonra zorla şarj edildiğinde meydana gelir (Wen ve diğ., 2012). Genel olarak, batarya aşırı şarj edildiğinde, katottan ve anot üzerindeki plakadan aşırı miktarda lityum ayrılmaktadır (Ren ve diğ., 2017, Ouyang ve diğ 2015).

Aşırı şarjın katot malzemelerinin çökmesine neden olacağı ve ekzotermik yan reaksiyonları şiddetlendireceği, bunun da çok fazla ısı üreteceği ve dolayısıyla batarya iç sıcaklığını hızla artıracağı çalışmalarda ortaya konmuştur (Jianwu ve diğ. 2012; Zeng ve diğ. 2006). Eldeki verilere göre, aşırı şarj elektrikli taşıt arızalarının başlıca nedenlerinden biridir. Aşırı şarjı derinlemesine anlamak, güvenli EV bataryaları tasarlamak için kritik öneme sahiptir.

Katot tarafında, olivin tipi $LiFePO_4$ (LFP) katot, tam delithiation sonrası yapısı nedeniyle en iyi aşırı şarj performansına sahiptir. Iriyama'nın deneyleri, LFP'nin 5,0 V'a (Li/Li+'a karşı) kadar şarj edilse bile yapısını sabit tutabileceğini göstermektedir (Iriyama ve diğ. 2004). Buna karşın, katmanlı oksit katodun aşırı delitasyonu genellikle malzeme yapısının çökmesine, aktif malzemelerin ayrışmasına ve ciddi yan reaksiyonlara yol açar (Ohsaki ve diğ., 2005; Wang ve diğ., 2011) ve hatta moleküler oksijen salınımına yol açarak elektrolitin oksidasyonuna neden olabilir (Zeng ve diğ., 2006).

Ohmic ısı iç dirençle artmasına rağmen, hücre içindeki hızlı sıcaklık artışı esas olarak katot ve elektrolit arasındaki ciddi yan reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Li_xCoO_2 tip pillerin oksidatif CoO_2'e derinlemesine yüklenebilmekte, ancak x=0,16'nın kritik bir nokta olduğu belirtilmiştir (Zeng ve diğ. 2006; Yuan ve diğ. 2015). Eğer x değeri 0.16'dan küçükse, $LixCoO_2$ elektrolitlerle şiddetli bir şekilde reaksiyona girerek çok fazla gaz ve ısı açığa çıkaracaktır. Katot olarak $LiNi_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}O$ içeren hücre için kritik nokta %180 SOC'dir (Yuan ve diğ. 2015; Zheng ve diğ. 2012).

Hücre %180 SOC üzerinde şarj edildiğinde, katot elektrolitle şiddetli bir şekilde reaksiyona girer ve iç sıcaklık hızla yükselir (Yuan ve diğ. 2015). Aşırı şarj da geçiş metalinin elektrolit içinde çözünmesine neden olacak ve bu da grafit anodun elektrokimyasal performansını derinden kötüleşmektedir (Zheng ve diğ., 2012). $LiMn_2O_4$ grafit bataryada, katottan gelen çözünmüş Mn^{2+} karbon anot yüzeyinde birikecek ve anotta önemli bir empedans artışına ve kapasite azalmasına neden omaktadır (Wu ve diğ., 2011; Abraham ve diğ., 2008). Anod yüzeyinin kabul edebileceğinden çok fazla metalik lityum anot yüzeyinde birikmektedir (Ouyang ve diğ. 2015; Sharma ve Peterson, 2012). Biriken lityum elektrolit ile reaksiyona girerek empedans artışına ve aynı zamanda çok fazla ısı üretimine yol açmaktadır (Ouyang ve diğ. 2015). En kötü durumda, biriken lityum, seperatörü delerek termal kaçağı tetikleyebilecek kısa devreye yol açabilecek dendritler oluşturmaktadır (Li ve diğ. 2014.a). Kesme voltajını optimize etmek, düşük hücre empedansını korumanın ve enerji çıkışından ödün vermeden çevrim ömrünü uzatmanın etkili bir yoludur. Katodun yapı stabilitesinin ve elektrolitin yüksek voltajdaki elektrokimyasal stabilitesinin iyileştirilmesi, pillerin aşırı şarja dayanması için etkilidir (Abraham ve diğ., 2006; Zinth ve diğ., 2014).

Aşırı deşarj, hücrenin bataryanın kimyasına bağlı olan en düşük sınırın altındaki gerilime deşarj olması anlamına gelir. Aşırı deşarj, Li-ion pillerin performansını kötüleştirecek ve hatta dahili kısa devre gibi ciddi güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. Anodun aşırı deşarjı SEI'nin ayrışmasına neden olmakta, CO_2, CH_4 ve CO gibi gazlar üreterek hücrenin şişmesine neden olmaktadır (Li ve diğ., 2008). Pil yeniden şarj edildiğinde, aktif lityum iyonlarını ve elektrolitleri tüketen yeni SEI'ler oluşmaktadır. Yeni SEI anodun elektrokimyasal özelliklerini değiştirerek kapasitenin düşmesine yol açmaktadır (Zhang ve diğ., 2015).

Derin aşırı şarj durumunda, anot potansiyeli bakırın yaklaşık 3,5 V (Li^+/Li'ye karşı) oksidasyon potansiyeline ulaştığında, bakır akım toplayıcı oksitlenecek ve Cu^{2+} iyonları elektrolit içinde çözünecek ve ayırıcı boyunca göç etmektedir (Zhao ve diğ., 2000; Guo ve diğ., 2015). Daha sonra Cu^{2+} iyonları sonraki şarj işlemi sırasında indirgenerek katot üzerinde Cu dendritlerinin birikmesine yol açmaktadır (Zhao ve diğ., 2000). Cu dendritlerinin büyümesiyle, ayırıcıya nüfuz etmekte bu da kendi kendine kısalmaya neden olmakta ve hatta bir termal kaçağı tetiklemektedir (Zhang ve diğ., 2015). Bunun yanı sıra, katot malzemesinin morfolojisi de aşırı deşarj işlemi sırasında değişmektedir (Guo ve diğ., 2016; Shu ve diğ., 2012).

Aşırı deşarj işlemi sırasında $LiCoO_2$'nin yapısal değişimini incelenmiş; Voltaj 1,0 V'un altına düştüğünde (Li/Li^+'a karşı) $Li_{1+x}Co^{II\ III}\ O_{2-y}$ metastabil fazının geri dönüşümsüz oluşumu tespit edilmiştir, $Li_{1+x}Co^{II\ III}\ O_{2-y}$ nihai ürünler olarak Li_2O ve Co'ya ayrışmaktadır (Shu ve diğ., 2010). LFP için, herhangi bir hasar olmaksızın 1,0 V'a (Li/Li^+'a karşı) aşırı deşarj edilebilmektedir.

Daha sonra 0 V'a (Li/Li^+'a karşı) aşırı deşarj edildiğinde, olivin yapısı çökerek amorf bileşikler oluşturmaktadır (Shu ve diğ., 2012). Başka bir deyişle, 3,78 Li iyonunun eklenmesiyle LFP tamamen yok olmaktadır.

Spinel $LiMn_2O_4$ (LMO) için, aşırı deşarj ile tetragonal $Li_2Mn_2O_4$ 1,0 V'ta (Li/Li+'a karşı) üretilir ve süreç tersine çevrilebilir. Voltaj 0,33 V'a (Li/Li^+'a karşı) düşerse, LMO geri dönüşümsüz katı hal amorflaşmasına yok olmaktadır (Shu ve diğ., 2012; Peramunage ve Abraham, 1998).

Katmanlı Ni-zengin $LiNi_xMn_yCo_zO_2$ (x+y+z=1) artan yüksek enerji yoğunluğu talebini karşılamak için sıcak katot malzemeleri haline gelmektedir ve aşırı deşarj performansları LFP ve LMO'dan daha zayıf kalmaktadır.

2.13.2. Li-ion Bataryaların Farklı Sıcaklıklarda Davranışları

Düşük sıcaklık performansı donma sıcaklığında, Li-ion piller kapasite azalması, güç zayıflaması ve şarj zorluğu gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Düşük elektrolit iletkenliği, zayıf yük transferi kinetiği (Herreyre ve diğ., 2001; Zhu ve diğ., 2016), artan SEI direnci (Zhu ve diğ., 2017; Smart ve diğ., 2003) ve grafitteki düşük katı hal lityum difüzivitesine (Senyshyn ve diğ. 2015) atfedilen (Zhu ve diğ., 2015; Jiang ve diğ., 2016) Li iyonlarının yukarıda bahsedilen düşük difüzivitesi, interkalasyon hızında bir düşüşe neden olmakta ve şarj işlemi sırasında grafit yüzeyinde lityum kaplamasına yol açmaktadır (Zhu ve diğ., 2017; Zhu ve diğ., 2016). Biriken lityumun çoğu "ölü lityuma" dönüşmekte ve artık daha sonraki elektrot reaksiyonuna katılmamamaktadır, bu da kapasite azalmasının ana nedenidir (Zhu ve diğ., 2017). Daha da kötüsü, büyüyen dendritler ayırıcı membranı delebilmekte ve dahili bir kısa devreye neden olabilmektedir, bu da korkutucu güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir (Orsini ve diğ. 1998).

Aşırı ısınma ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Sıcaklık arttıkça, normal olarak, pil şu reaksiyonlara maruz kalmaktadır: SEI ayrışması, anot-/katot-aktif malzemeler ile elektrolit arasındaki reaksiyonlar, elektrolit ayrışması ve anot-aktif malzemeler ile bağlayıcı arasındaki reaksiyon (Kim ve diğ., 2007; Maleki ve diğ., 1999), nihayetinde pilin termal kaçak mekanizması ile sonuçlanmaktadır.

Bu reaksiyonlar tam olarak belirli bir sırada gerçekleşmeyebilmektedir; bazıları aynı anda meydana gelebilmektedir. Sıcaklık 60 °C 'nin üzerine çıktığında SEI ayrışmaya başlar ve açığa çıkan lityumlu anot malzemeleri (örnek olarak LiC_6) elektrolit ile hızla reaksiyona girmektedir. Yüksek sıcaklık, geçiş metali iyonlarının elektrolit içinde çözünmesini artıracaktır. Kapasite bozulması yüksek sıcaklıkta hızlı olmaktadır.

Sıcaklık 90 °C'ye çıktığında, SEI tamamen ayrışacak ve yan reaksiyonlar yoğunlaşarak çok fazla gaz ve ısı üretecektir. Bu anda pil kapasitesinin çoğunu kaybedebilmektedir. Sıcaklık polimer separatörün erime noktasına yükseldikçe, pil tüm fonksiyonlarını

kaybetmektedir. Yüksek basınç hücreyi bile patlatabilmekte ve zehirli gaz ve elektrolit çözücüleri dışarı sızabilmektedir. Aşırı ısınma süreci sırasında, üretilen ısı dağıtılabilecek olandan fazlaysa, ekzotermik süreçler devam ederek hücrenin sıcaklığını hızla arttırmaktadır.

Artan sıcaklık, istenen galvanik reaksiyonlar yerine kimyasal reaksiyonları daha da hızlandıracak, daha da büyük miktarda ısı üretecek ve sonunda termal kaçaklara neden olabilecektir. Pilin verimli termal kontrolü, kullanım ömrü boyunca güvenli ve güvenilir çalışma için hayati önem taşımaktadır.

Son yıllarda, batarya termal yönetim sistemlerinde sıvı, hava, faz değişim malzemeleri, hidrojel ve benzeri gibi birçok soğutucu kullanılmaktadır (Zhao ve diğ., 2015; Liu ve diğ., 2017). Batarya termal yönetiminin iyileştirilmesi büyük ölçüde ısının optimize edilmesine kapasitesi ve soğutucuların ısı transfer oranına bağlıdır. Aşırı sıcaklığa maruz kalınması durumunu önlemek için termal yönetim yapısını optimize etmek de etkili bir çözümdür.

2.14. Elektrolitlerin Yanma Davranışları

Bataryadaki kimyasal reaksiyonların neredeyse tamamı elektrolitle ilgilidir. Karbonat çözücüleri genellikle yanıcıdır ve lityum tuzları kararsızdır. Li-ion pillerin kötüye kullanım koşulları altında olduklarında, çok fazla ısı üretir ve termal kaçaklara neden olarak kolayca tutuşabilirler (Xu ve diğ., 2004). Geleneksel grafit/$LiCoO_2$ pillerinde, sıcaklık 69 ℃'ye ulaştığında, anot yüzeyindeki SEI filmi parçalanacaktır. Bu şekilde ilk reaksiyon ısı ortaya çıkar ve ardından açıkta kalan lityumlu grafit organik çözücü (EC) ile reaksiyona girer (Wang ve diğ., 2012). Bu reaksiyon Denklem 2.30'da gösterilmiştir

$$2Li + C_3H_4O_3 \rightarrow Li_2CO_3 + C_2H_4 \quad (2.30)$$

$Li_{0,5}CoO_2$ katot 70 ℃'de EC ile reaksiyona girerek Denklem 2.31'de görüleceği gibi su üretecektir (MacNeil ve Dahn, 2001).

$$Li_{0,5}CoO_2 + 0,1C_3H_4O_3 \rightarrow 0,5LiCoO_2 + 0,5CoO + 0,3CO_2 + 0,2H_2O \quad (2.31)$$

Yapılan çalışmalarda elektrolitin ($LiPF_6$/EC:DMC) ilk ayrışma sıcaklığının yaklaşık 80 ℃ olduğu ortaya konulmuştur (Sloop ve diğ., 2003). Ayrışma gerçekleştiğinde,

elektrolitteki karmaşık reaksiyonlar aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir (Wu ve diğ., 2012; Kawamura ve diğ., 2002; Sloop ve diğ., 2001).

$LiPF_6$ bazlı elektrolitlerde $LiPF_6$'nın ayrışması aşağıda denklem 2.32 ve 2.33'de verilmiştir;

$$LiPF_6 \leftrightarrow LiF + PF_5 \quad (2.32)$$

$$PF_5 + H_2O \leftrightarrow POF_3 + 2HF \quad (2.33)$$

Güçlü Lewis asidi olan PF_5 ile organik çözücü arasındaki bir dizi reaksiyon Denklem 2.34, 2.35, 2.36, 2.37, 2.38, 2.39 da gösterildiği şekilde gerçekleşir. PF_5 çözücü molekülündeki oksijenin elektron yalnız çiftine saldırabilir ve daha sonra ayrışmasını sağlayabilir.

$$C_2H_5OCOOC_2H_5 + PF_5 \rightarrow C_2H_5F + POF_3 + CO_2 + HF + CH_2 = CH_2 \quad (2.34)$$

$$C_2H_5OCOOC_2H_5 + PF_5 \rightarrow 2C_2H_5F + POF_3 + CO_2 \quad (2.35)$$

$$C_2H_5OCOOPF_4 \rightarrow POF_3 + CO_2 + C_2H_5F \quad (2.36)$$

$$C_2H_5OCOOPF_4 \rightarrow POF_3 + CO_2 + C_2H_4 + HF \quad (2.37)$$

$$C_2H_5OCOOPF_4 + HF \rightarrow PF_4OH + CO_2 + C_2H_5F \quad (2.38)$$

$$C_2H_5OH + CH_2 = CH_2 \rightarrow C_2H_5OC_2H_5 \quad (2.39)$$

Çeşitli organik çözücülerin oksidasyon reaksiyonlarının denklemleri, Denklem 2.40, 2.41, 2.42, 2.43, 2.44, 2.45, 2.47'de gösterilmiştir.

$$2{,}5O_2 + C_3H_4O_3(EC) \rightarrow 3CO_2 + 2H_2O \quad (2.40)$$

$$6O_2 + C_5H_{10}O_3(DEC) \rightarrow 5CO_2 + 5H_2O \quad (2.41)$$

$$3O_2 + C_3H_6O_3(DMC) \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O \quad (2.42)$$

$$4O_2 + C_4H_6O_3(PC) \rightarrow 4CO_2 + 3H_2O \quad (2.43)$$

$$\frac{5}{2}O_2 + C_3H_4O_3(EC) \rightarrow 3CO_2 + 2H_2O \quad (2.44)$$

$$6O_2 + C_5H_{10}O_3(DEC) \rightarrow 5CO_2 + 5H_2O \quad (2.45)$$

$$3O_2 + C_3H_6O_3(DMC) \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O \quad (2.46)$$

$$4O_2 + C_4H_6O_3(PC) \rightarrow 4CO_2 + 3H_2O \quad (2.47)$$

Katotlar tarafından üretilen oksijen, CO_2 veya CO açığa çıkarmak için karbonat çözücülerle reaksiyona girmektedir. Lityum metal ile 1 M $LiPF_6$/EC+DEC, 1 M $LiPF_6$/EC+DMC ve 1 M $LiPF_6$/PC+DMC'nin ekzotermik reaksiyonu, katı elektrolit ara yüzeyinin (SEI) parçalanması nedeniyle lityum metalin erime noktasında başlamıştır. Sıcaklık yaklaşık 180 ℃ iken, 1 M LiPF6/PC+DEC'nin kendi kendine ısınması lityum metalin erime noktasından önce gerçekleşmektedir. Kendiliğinden ekzotermik reaksiyonun başladığı sıcaklık 140 ℃ olmuştur. Bu nedenle, bu elektrolitteki lityum metalinin termal olarak kararsız olduğu bulunmuştur. Lityum metalini barındıran elektrolitlere su eklendiğinde, ekzotermik reaksiyon $LiPF_6$ ile eklenen su arasındaki reaksiyonun bir ürünü olan HF gazına yanıt olarak SEI'nin çökmesi nedeniyle 130 ℃ 'den daha düşük bir sıcaklıkta başlamaktadır. DEC türü içeren elektrolitlerin tepe sıcaklığının DMC elektrolit türünü içerenlere göre daha düşük olduğu saptanmıştır. Kalorifik değerler yönünden bakıldığında 1 M $LiPF_6$ / EC + DMC elektrolitin ısısının 370 J/g ile su ilavesiz en düşük değere sahip olduğu bulunmuştur.

DEC içeren $LiPF_6$ elektrolitlerinin ekzotermik tepe sıcaklığının 255 ℃ 'de olduğu bulunmuştur ve DEC içeren elektrolitlerin tepe sıcaklığı DMC içeren $LiPF_6$ elektrolitlerinden 15-20 ℃ daha düşüktür (Kawamura ve diğ., 2002).

Yukarıda verilmiş reaksiyonlar sonucu yanıcı gazlar üretilmekte ve büyük miktarda ısı oluşmaktadır. Üretilen gazlar pilin şişmesine ve gaz sızıntısına neden olabilmektedir. Elektrolitler dışarı sızdığında ve havayla temas ettiğinde, piller tutuşarak patlamaktadır.

Elektrikli taşıtlarda kullanılan LIB'ler için güvenlik gereksinimlerinin artmasıyla birlikte, iyi termal kararlılığa ve elektrokimyasal özelliklere sahip elektrolitlerin geliştirilmesi için çalışılmaktadır.

2.15. Batarya Yönetim Sistemi ile Termal Kaçağın Kontrol Edilmesi

Bataryayı istikrarlı koşullar altında tutmak için öncelikle batarya özellikleri, tasarımı ve malzeme seçimi, ikincil olarak da batarya yönetim sistemi (BMS) önemlidir (Zhang ve diğ., 2019).

2.15.1. Bataryanın Uygun Tasarımı

Hücre boyutu ve malzemesi, bataryanın termal kararlılığını etkileyen ve adyabatik ortamı önleyen kritik unsurlardır.

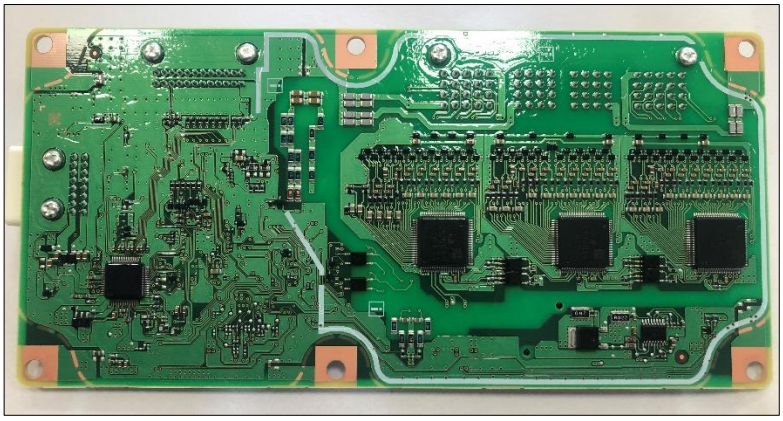
Bataryanın zarar görmesini önlemek için batarya tamamen boşaldığında (cut-off) iç sıcaklık, sınırlı voltajdaki elektrotların boyutuyla doğrudan ilişkilidir. Kalınlık kritiktir ve batarya sıcaklığını doğrudan etkiler. Kalınlık arttıkça sıcaklık da artar.

Bu nedenle üretim aşamasında güvenlik standartlarına uygun olarak üretilmeleri gerekmektedir (Zhang ve diğ., 2021). Katot malzemesinin daha yüksek bir özgül enerji yoğunluğuyla değiştirilmesi, daha kalın kutuplar tasarlamayı ve kullanmayı, daha büyük hücreler üretmeyi, ince ayırıcılar kullanmayı ve akım toplayıcılar kullanmayı gerektirir. Güvenlik önceliği, elektrokimyasal kombinasyonlarını ayarlarken Li-ion pillerin daha yüksek bir enerji yoğunluğu oluşturmak için tasarım enlemini sınırlar. Yangın olayları, kötüye kullanım durumu meydana geldiğinde ve elektrokimyasal sistemin sınırını aştığında gerçekleşir (Lu ve diğ., 2012).

2.15.2. Batarya Yönetim Sistemi (BMS)

Herhangi bir batarya sisteminde en önemli unsurlardan biri, enerji depolama sistemindeki tekli veya çoklu batarya modüllerinin performansını izleme, kontrol etme ve optimize etme gibi eylemler olup anormal durumlarda bunun sebebi olan batarya modüllerini sistemden izolasyonunu edebilme özelliğidir.

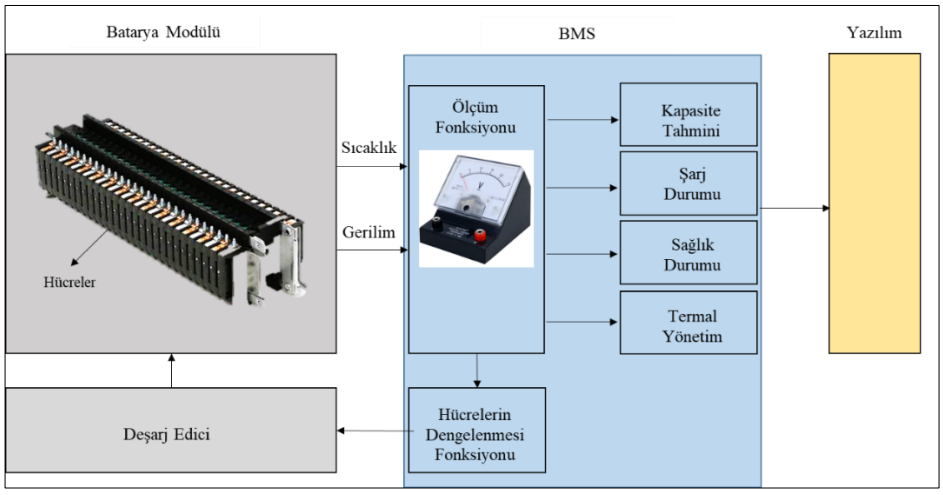
Bu yönetim bütününe "batarya yönetim sistemi (BMS)" olarak bilinir. BMS, harici olayların yanı sıra dahili olayları da yönetmeyi amaçlar. Bir sistem içindeki uygulamaları ile uygun batarya performansını iyileştirmek için kullanılır. Bu nedenle, güvenli bir BMS, bir batarya sisteminin çalıştırılması için ön koşuldur **(**Gabbar ve diğ., 2021). Şekil 2.35'de deneyler esnasında kullanılan EV bataryanın BMS devresi verilmiştir.



Şekil 2.35. Deneylerde kulanılan Li-ion bataryanın BMS devresi

Li-ion bataryalar güvenli bir çalışma alanında kalmalı ve batarya sıcaklığı ve voltajı tanımlanmış bir aralıkta çalıştırılmalı ve sınırlandırılmalıdır. Akünün bu sınırların dışında çalıştırılması batarya performansını düşürecek ve güvenlik sorununa neden olacaktır. Güvenli çalışma aralığı; bazı bataryalarda (LTO) -20 ila 55 ℃ 'de deşarj ve 0-45 ℃'de şarj içindir; -30 ℃ 'ye kadar uzatılabilir (Jin ve diğ., 2022).

Batarya Yönetim Sistemi tarafından işletilen parametreler Şekil 2.36'da gösterilmektedir (Buccolini ve diğ., 2016).



Şekil 2.36. Batarya yönetim sisteminin fonksiyonları

Batarya yönetim sisteminin temel görevleri aşağıda verilmiştir.

2.15.2.1. İzleme

BMS temel olarak bataryanın tamamının voltajını, akım, hücrelerin voltajını, sıcaklığı, bataryanın izolasyonunu izler. Batarya şarj sistemi veya voltaj regülatöründe oluşabilecek bir arıza batarya sisteminde aşırı gerilime neden olabilir. Aşırı voltaj veya aşırı akım batarya sisteminde kalıcı hasara neden olabilirken, aşırı şarj hücreden gaz çıkışına sebep olur. Bu gazlar yanıcı olduğundan ciddi bir güvenlik sorunu yaratır. Benzer şekilde, düşük voltaj veya akım batarya performansını önemli ölçüde etkiler. Merkezi batarya sisteminin izolasyonu, özellikle de yüksek voltaja karşı, BMS için önemli bir görevdir. Sıcaklık kontrolü BMS için bir diğer önemli görevdir. Yüksek sıcaklıklar batarya sistemini olumsuz etkilemekte ve sorun yaratır (Gabbar ve diğ., 2021).

2.15.2.2. Koruma

Bir BMS, batarya sisteminde oluşabilecek tehlikelere karşı koruma sağlamalıdır. BMS'in koruma sağladığı konular şunlardır; çalışma modunu tespit ederek hata kriterlerini ayarlar, paket/hücre aşırı gerilimini ve aşırı akımını tahmin eder, batarya izolasyon hatasını ve yüksek/düşük sıcaklıkların tespitini yapar (Gabbar ve diğ., 2021).

2.15.2.3. Şarj ve Deşarj İşlemlerinin Yönetimi

Şarj durumunun (SOC) batarya ömrü üzerinde önemli bir etkisi vardır. Her bataryanın belirli sayıda şarj-deşarj döngüsü olarak adlandırılan bir pil ömrü vardır. Şarj ve deşarj sayısının artması ile pil ömrü azalmaktadır. BMS şarj ve deşarj döngüleri için verimli bir yol temin edebilmelidir. Ek olarak, bir BMS en uygun SOC değerini belirleyerek batarya ömrünü en üst düzeye çıkarmalıdır. Bu alanda görevini yerine getirmek için BMS; şarj cihazı akımını kontrol eder, dinamik güç limitlemesi ve aktif ve pasif dengeleme yapar (Gabbar ve diğ., 2021).

2.15.2.4. Teşhis

BMS deşarj derinliğini (DOD), şarj durumunu (SOC), batarya kapasitesini, hücre sıcaklığını, uygunluk durumunu (SOF), mevcut enerjiyi, şarj süresini, kalan faydalı ömrü (RUL), kalan çalışma süresini, verimli pil performansı sağlamak için hücrenin iç empedansını ve akım kapasitesini tahmin eder ve öngörür. BMS ayrıca yangın, termal

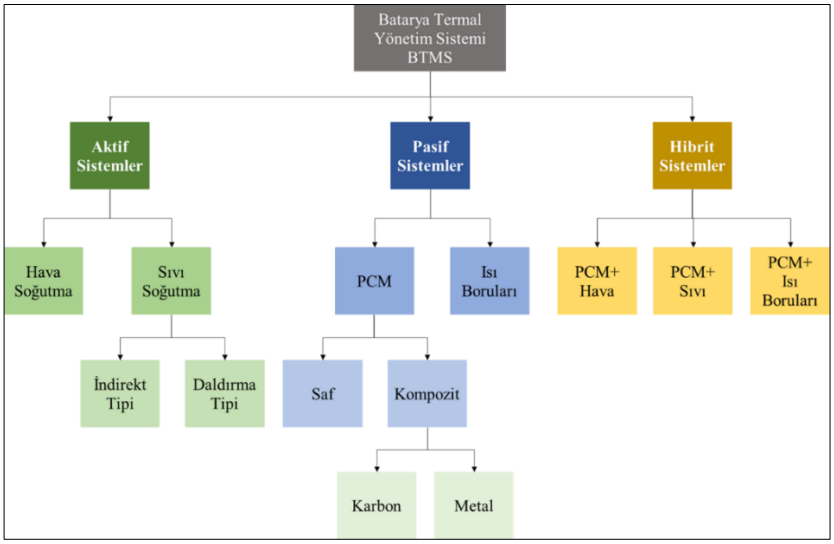
kaçak, patlama gibi arızaları tespit etmekten ve bunların sonuçlarını en aza indirmekten sorumludur. Bu nedenle, arıza teşhisi BMS için önemli bir işlevdir.

2.15.2.5. Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTMS)

Şarj ve deşarj işlemleri sırasında, Li-ion batarya hücreleri, esas olarak ekzotermik kimyasal reaksiyonlar ve aktivasyon enerjisi, iyon transferine direnç ve kimyasal taşınmadan kaynaklanan kayıplar nedeniyle ısı üretir. Isı üretiminin çoğu, SOC yüzde % 20 ila % 80 arasındayken şarj ve deşarj işlemlerinde gerçekleşir (URL-21). BTMS, sıcaklığı 15 ℃ - 35 ℃ arasında tutmayı amaçlamaktadır; bu, elektrikli taşıtların kullanım ömrünü uzatmak ve çalışma güvenliğini sağlamak için Li-ion bataryalar için idealdir (Chen ve diğ., 2015). Asıl sorun, üretilen ısıyı bataryadan uzaklaştırmak ve ısıyı sabit bir durumda tutmaktır; bu, elektrikli taşıtlarda artan gravimetrik enerji hacmi nedeniyle büyük bir zorluktur (Chen ve diğ., 2015). Standart sürüş döngüleri sıcaklığı 55 ℃'nin altında ve sıcaklık değişimini 5 ℃'nin altında sınırlarken hava soğutma sistemi iyi sonuçlar vermektedir. Öte yandan, agresif sürüş sırasında maksimum sıcaklık aralığı optimum aralıktan daha fazladır (Chen ve diğ., 2015). Çalışma sıcaklığı aralığının dışında çalışmak bataryaların performansını, kullanım ömrünü ve güvenliğini etkileyecektir. Aşırı sıcaklık gibi ağır koşullar termal kaçağı tetikleyecek ve güvenliği kötüye kullanacak ve kısa devre aşırı ısınmaya neden olacaktır (Zhao ve diğ., 2020); bu nedenlerden dolayı BTMS, Li-ion piller için gereklidir.

Batarya içindeki sıcaklığın 1 ℃ artması durumunda bataryanın tüm ömrünün iki ay kısaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle, sürekli sıcaklık izleme ve belirli bir aralıkta tutma, tüm elektrikli taşıt bataryaları için çok önemlidir (Song ve diğ., 2022). Soğutma ve ısıtma sistemleri, verimlilik ve güvenlik için bataryayı en iyi sıcaklık aralığında tutar. Pratikte biri hava, diğeri sıvı olmak üzere iki sıcaklık kontrol sistemi mevcuttur. Tasarımlar aktif veya pasif olabilir; en etkili sistemler aktif-sıvı soğutma türleridir (Solmaz ve Kocakulak, 2020).

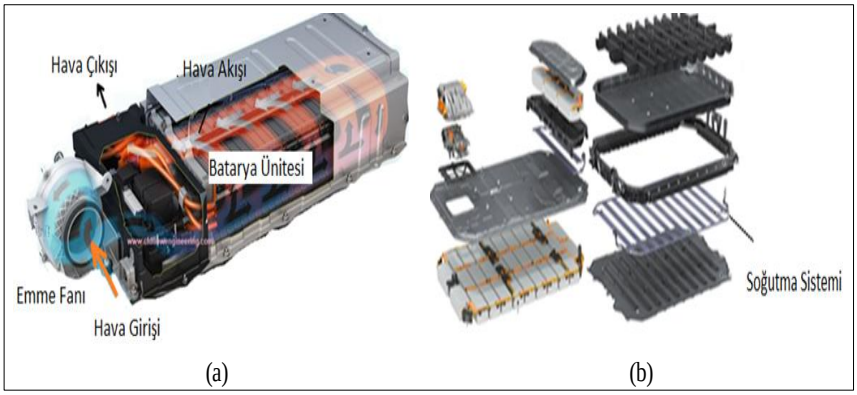
Şekil 2.37'de gösterildiği üzere Li-ion bataryalar için temel olarak üç tip termal yönetim sistemi kullanılmaktadır. Bunlar aktif, pasif ve hibrit sistemlerdir (Buccolini ve diğ., 2016).



Şekil 2.37. Li-ion batarya sistemlerinin termal yönetim sistemleri (Buccolini ve diğ., 2016).

(a) Aktif BTMS: Bu soğutma sistemleri için, fanları ve pompaları için harici enerji gereklidir. Soğutucu malzemeler hava Şekil 2.38 (a) veya sıvı Şekil 2.38 (b) olabilir (Buccolini ve diğ., 2016).

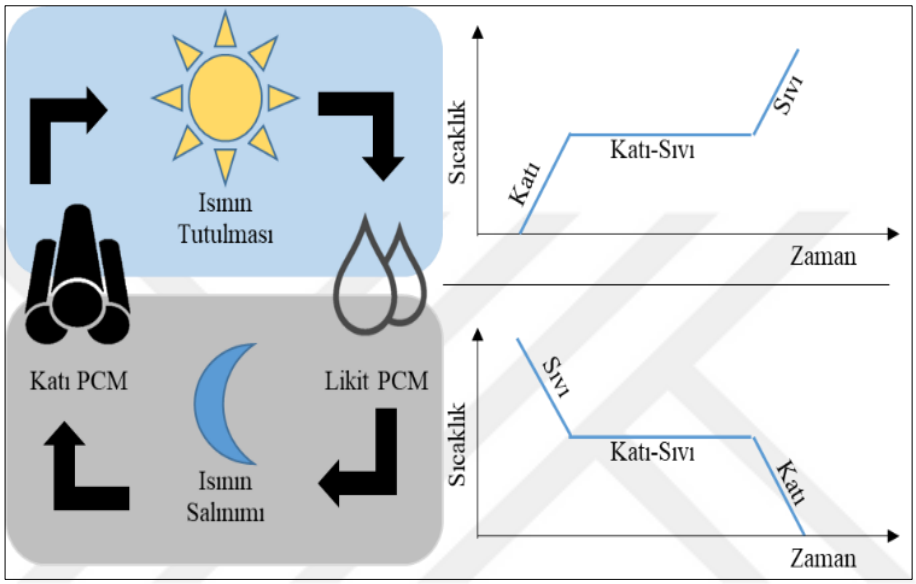
Sıvı soğutucular hücrelerle doğrudan temas halinde olabilir (URL-22) (sıvıya daldırılmış) veya boruların içinde dolaşarak dolaylı soğutma görevi görebilir (Zhao ve diğ., 2020).



Şekil 2.38. Li-ion batarya sistemlerinin termal yönetim sistemleri (a) hava soğutmalı sistem, (b) sıvı soğutmalı sistem

(b) Pasif BTMS: Isıyı batarya yüzeyinden mümkün olduğunca dışarıya aktarmak için yüzeye tutturulan yapı; faz değişim malzemesi (PCM) veya ısı borusu uygulamalarıdır (Zhao ve diğ., 2020).

Faz değişim malzemesinin (PCM) amacı, faz değişim sürecinde ısıyı emerek veya serbest bırakarak sabit sıcaklığı kontrol etmektir. Malzeme, sıcaklığı ve sıcaklık farkını uygun şekilde sınırlar. Malzemenin durum değiştirme özelliği sayesinde ısı, batarya paketlerinden uzaklaştırılabilir (Fang ve diğ., 2022). Şekil 2.39'da PCM sistem faz değiştirme ve ısı tutulumu gösterilmiştir. PCM malzemesi gözenekli bir taşıyıcıdan oluşmaktadır (Moghaddam ve Mazyar, 2018).



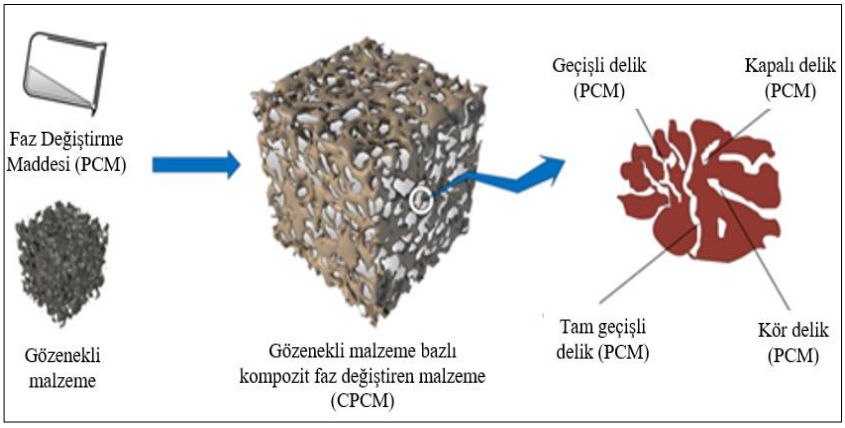
Şekil 2.39. PCM malzemenin ısıyı çevrim grafiği

Hal değişimi, "faz değişimi", şu şekillerde gözlemlenebilir: katı halden katı hale, katı halden sıvı hale, katı halden gaz haline ve sıvı halden gaz haline (Fang ve diğ., 2022). Malzemelerin kimyasal bileşimi nedeniyle, PCM malzemeleri organik veya inorganik PCM'ler olabilir (Fang ve diğ., 2022).

Gerekli bazı organik malzemeler; parafin, petrol mumları (PW), polietilen glikol (PEG), kaprik asit (CA), laurik asit (LA), palmitik asit (PA) ve stearik asittir (SA).

Yukarıdaki malzemeler arasında PW, bazı avantajları nedeniyle Li-ion'da ağırlıklı olarak kullanılmaktadır, bu avantajları;

(1)faz değişim sıcaklığı daha uygun, (2) büyük ısı dönüşümü, (3) nispeten yüksek ısı iletme kabiliyeti, (4) düşük hacim değişim oranı, (5) durum ayrımı yok, (6) düşük düşük soğutma, (7) yüksek kimyasal kararlılık, (8) toksik olmayan, (9) aşındırıcı olmayan, (10) düşük maliyet olarak sıralanabilir (Fang ve diğ., 2022).



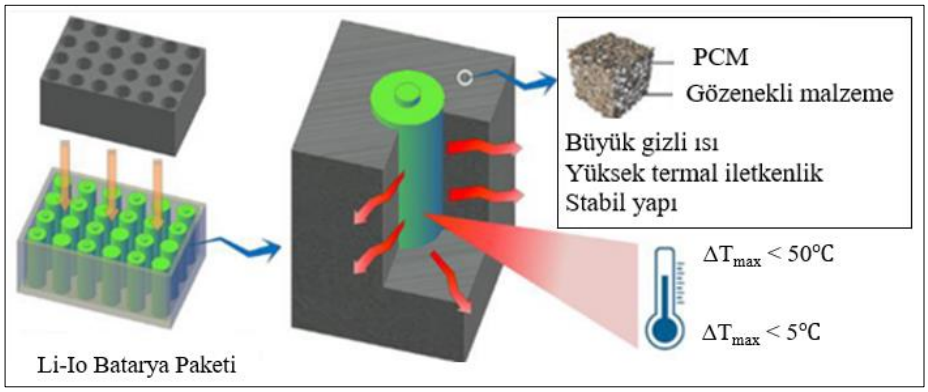
Şekil 2.40. Gözenekli malzemenin ana tutucu malzemeyi oluşturması (Fang ve diğ., 2022).

Gözenekli malzeme ana tutucu malzemedir. Malzemenin yapısı ekli veya kapalı açıklıklardan oluşur. Bal peteği ve köpük şeklindeki malzemeler tutucu malzemelerdir Bir örneği Şekil 2.40'da gösterilmiştir.

Gözenekli malzemenin fiziksel özellikleri; yüksek dayanıklılık, geniş yüzey, uygun gözenek boyutu ve yüksek termal iletkenliktir (Fang ve diğ., 2022).

Li-ion bataryalarda termal iletkenliği artırmak için kullanılan çeşitli PCM birleşimleri vardır. Araştırmacılar, en verimli sistemi oluşturmak için PCM'nin erime noktası (32 ila 40 ℃) ile Li-ion bataryanın kritik çalışma aralığını (-20 ila 60 ℃) dengelemeye odaklanmaktadır, Şekil 2.41'de gösterilmiştir (Sanker ve Baby, 2022).

Hibrit BTMS: Birçok uygulamada, farklı soğutma aralıklarına ulaşmak için aktif ve pasif soğutma sistemleri birleştirilir. Trend, uygulamalarda hibrit sistemlerin giderek daha fazla tercih edildiğini göstermektedir (Zhao ve diğ., 2020).



Şekil 2.41. Pilin yüzeyinden ısının alınması (Fang ve diğ., 2022)

Hibrit sistemler, termal yönetim sistemlerinde hava, sıvı, faz değişim malzemesi, ısı borusu kombinasyonlarıdır (Zhang ve diğ., 2020). Hava soğutma sistemlerinin enerji gereksinimi aynı sıcaklık ortalamasında diğer soğutma uygulamalarına göre 2-3 kat daha fazladır. Dolaylı sıvı soğutma sistemlerinde ise sıcaklık artış oranı en düşüktür. Bir diğer soğutma yöntemi ise kanatlı soğutma sistemidir.

Bu sistem hücreye (aynı hacimde) % 40 daha fazla yük getirmektedir. Dolaylı sıvı soğutma uygulaması, biraz daha düşük soğutma performansına rağmen doğrudan sıvı soğutmaya göre daha uygulanabilirdir (Chen ve diğ., 2015).

(2) Şarj Durumu (SOC) izleme: Elektrik istismarı temel olarak derin deşarj veya aşırı şarjdan kaynaklanır. Batarya SOC sistemi temel olarak bataryanın şarj seviyesini belirler, aşırı şarjı veya derin deşarjı önler ve böylece termal kaçak oluşumunu önlemektedir (Zhang ve diğ., 2021).

Yapılan çalışmalara göre, SOC'nin Li-ion bataryalar için çok önemli olduğu, daha yüksek SOC'nin daha tehlikeli olduğu; % 100 SOC'nin en önemli kütle kaybını ve ısı salınım oranının (HRR) zirvesini gösterdiği anlaşılmaktadır (Chen ve diğ., 2019).

(3) Kısa Devre ve Sağlık Durumunun Tespiti (SOH）İzleme: Sistem esas olarak dahili kısa devreyi tespit etmekte ve proaktif olarak uyarmaktadır. Bu erken uyarı sistemini oluşturmak için sıcaklık ve akım değerleri esastır (Zhang ve diğ., 2021).

2.16. Termal Kaçak Gerçekleşme Mekanizması

Termal Kaçak mekanizmasının davranışlarını anlamak için Li-ion piller üzerinde yapılan deneysel çalışmalar termal kaçak mekanizması için temel olarak üç neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Bunlardan biri sürekli ısınmadır ve Zhao ve diğ. (2020) tarafından çalışılmıştır. Lityum-iyon batarya ilk olarak iki aşamadan geçmiştir; ilk olarak elektrolit sızıntısı gerçekleşmiş ve daha sonra emniyet valfi basınç altında açılmıştır. İlk adımda; elektrolitler lityum-iyon pilin içinde buharlaşmış ve içerideki basıncın artmasına neden olmuştur.

Artan basınç, elektrolitlerin tahliye ventilinden sızmasına neden olmuştur. İç basınç emniyet valfinin maksimum basınç limitine yükseldiğinde valf açılmış ve valften büyük

miktarda zehirli gaz salınmıştır. Süreç bu aşamadan sonra devam ettirildiğinde, reaksiyonlar daha aşamalı hale gelmekte ve daha fazla zehirli gazın salınmasına neden olmuştur. Tek bir lityum-iyon batarya için % 30 şarj durumunda, lityum-iyon batarya Termal Kaçak'ı tamamladığında hemen beyaz bir gaz yayılmıştır. Bu aşamadan sonra, salınan duman ve zehirli gaz miktarı azalmış ve sonunda bitmiştir. Lityum-iyon pil şarj aşamalarına göre Termal Kaçak durumu eşleştiğinde; %30 şarj durumunda ve %70 şarj durumunda; %70 şarj durumunda Termal Kaçak sırasında daha fazla miktarda duman yayılmıştır. Emniyet valfi, bataryanın ana yüzeyine çekilen sıvı alüminyumu da serbest bırakılmıştır.

Emniyet valfinin yakınında, boşaltılan gaz tutuşarak çıplak bir alev oluşturmuştur. Yanıcı gazlar 500 ℃ ile 700 ℃ sıcaklık arasında tutuşmuştur. 28 saniye sonra yanmaya başlamış ve alev kaybolmuştur.

Batarya daha fazla enerji depoladığında, Termal Kaçak aşamasında daha fazla enerjinin açığa çıkmasına neden olabilmektedir. 660 ℃ sıcaklığın üzerinde alüminyum folyolar erimiş ve yüksek basınç altında lityum-iyon bataryadan dışarı püskürmektedir.

Yangın bir jet alevi olarak başladığında sabit bir aleve dönüşmüştür. Bataryanın enerjisi tamamen tükenirken alev de ortadan kalkmıştır. Termal Kaçak, lityum-iyon batarya %70 şarj durumuna sahip olduğunda daha fazla enerji açığa çıkarmaktadır. Bataryadaki ana kütle kaybı, fırlatılan erimiş alüminyum nedeniyle gerçekleşmektedir (Zhao ve diğ., 2020).

2.17. Elektrikli Taşıtlar için Li-ion Bataryalarının Sertifikasyon Standartları

Son yıllarda meydana gelen elektrikli taşıt kazaları, Li-ion batarya güvenliği konusunda kamuoyunda büyük endişelere yol açmıştır. Elektrikli taşıtların güvenliğini artırmak amacıyla, bataryalar taşıtlara monte edilmeden önce Li-ion bataryalar için birçok zorunlu test standardı formüle edilmiştir.

SAE J2464-2009, SAE J2929-2011, QT/T 743-2006, GB/T 31485, SAND 3123-2005, UN 38.3-2011 ve IEC 62660-2:2010 gibi uluslararası standartlar ile formüle edilen bazı tipik zorunlu testler Tablo 2.12'de gösterilmiştir (Feng ve diğ., 2018).

Tablo 2.12. Çeşitli standartlar uyarınca yapılan testler

● : Standart gereği yapılan test ○ : Standart testi istememekte		**Standartlar**						
Termal Kaçak Sebebi	Karşılaşılabilecek Durumlar	SAE J2464-2009	SAE J2929-2011	QC/T 743-2006	GB/T 31485	SAND 2005-3123	UN38.3-2011	IEC62660-2:2010
Mekanik Zarar	Vibrasyon	○	●	●	●	○	●	●
	Şok	●	●	○	○	●	○	○
	Düşme	●	●	●	●	●	○	○
	Penetrasyon	●	○	●	●	●	○	○
	Rotasyon	●	○	○	○	●	○	○
	Batma	●	●	○	●	●	○	○
	Çarpma	●	●	●	●	●	●	●
Termal Zarar	Yüksek sıcaklık tehlikesi/Taşıt yangını	●	●	○	○	●	○	●
	Termal stabilite	●	○	○	○	●	○	○
	Termal yönetim olmaksızın termal stabilite çevrimi	●	○	○	○	○	○	○
	Termal şok çevrimi	●	●	○	●	●	●	●
Elektriksel Zarar	Dış kaynaklı kısa devre	●	●	●	●	●	●	●
	Kısmi kısa devre	○	○	○	○	●	○	○
	Fazla şarj	●	●	●	●	●	●	●
	Fazla deşarj	●	●	●	●	●	○	●
	Zorlanmış deşarj	○	○	○	○	○	●	○

Testler, Li-ion bataryaların gerçek kazalarda nasıl tepki vereceğini simüle etmeye çalışmaktadır. Tablo 2.12'de göre, tüm test standartlarının küçük bir farkla mekanik zarar, termal zarar ve elektriksel zarar odaklandığını görebiliriz. Mekanik kötü kullanım için başlıca öğeler titreşim, düşme, penetrasyon, daldırma ve ezilme testleridir.

Termal zarar için ana konu termal kararlılıktır. Elektriksel zarar açısından odaklanılanlar ise harici kısa devre, aşırı şarj ve aşırı deşarj testleridir. Günümüzde, rotasyon, termal şok döngüleri ve kısmi kısa devre gibi bazı yeni test konuları zorunlu test standartlarına

eklenmek üzere önerilmiştir. Bununla birlikte, elektrikli taşıt arızalarının nedenleri çok çeşitlidir.

Batarya güvenliği konusu, daha fazla çaba gösterilmesi gereken karmaşık bir konudur. Avrupa Otomotiv Araştırma ve Geliştirme Konseyi (EUCAR), tehlikeyi Tablo 2.13'de gösterildiği gibi 8 seviyeye ayırmaktadır (Doughty ve Crafts, 2006).

Tablo 2.13. EUCAR uyarınca tehlike sınıfları

Tehlike Seviyesi	Tanımlama	Sınıflandırma kriteri ve etkisi
0	Etki yok	Etki yok, işlevlerde kayıp yok.
1	Pasif, koruma devrede	Kusur yok; sızıntı yok, salınım yok, yangın veya alev yok; kopma yok, patlama yok; ekzotermik reaksiyon veya termal kaçak yok; hücre tersine çevrilebilir şekilde hasar görmüş; koruma cihazının onarımı gerekli.
2	Etki, hasar	Sızıntı yok; salınım, yangın veya alev yok; kopma yok; patlama yok; ekzotermik reaksiyon veya termal kaçak yok; hücre geri döndürülemez şekilde hasar görmüş; onarım gerekli
3	Sızıntı, Δ_{mass}<%50	Salınım, yangın veya alev yok; kopma yok; patlama yok; ağırlık kaybı < elektrolit ağırlığının %50'si (elektrolit= "çözücü + tuz")
4	Tahliye, $\Delta_{mass}\geq$%50	Yangın veya alev yok; kopma yok; patlama yok; ağırlık kaybı ≥ elektrolit ağırlığının %50'si (elektrolit= "çözücü + tuz")
5	Yangın veya alev	Kopma yok; patlama yok (kütleden, uçan parçalar yok)
6	Bozunum	Patlama yok, ancak aktif kütleden uçan parçalar mevcut
7	Patlama	Patlama (hücrenin parçalanması)

Otomobil güvenliği gerekliliklerini karşılamak için, Li-ion batarya arızaları en az 4. seviyeye kadar karşılanmalıdır (Myung ve diğ., 2017). Tehlike seviyesini hafifletmek için aktif malzemelerin değiştirilmesi ve ayırıcıların güçlendirilmesi gibi birçok çalışma yapılmıştır. Li-ion bataryalarda ilgili karmaşık arıza mekanizmaları hakkında bilgi eksikliği nedeniyle, malzemeler, elektrotlar ve hücre seviyeleri arasında açık ve nicel bir ilişki kurulması önemlidir.

2.18. Yapay Zeka (AI) ile Modelleme Kurulması

1950'lerde ortaya çıkan yapay zekanın literatürde evrensel bir tanımı yoktur. Günümüzde yapay zeka, insanların zeki davranış olarak gördüğü bazı faaliyetlerin makineler tarafından yapılmasını inceleyen bir bilgisayar bilimi dalıdır. Literatürdeki tanımlara bakıldığında, John McCarthy'e göre yapay zekanın amacı "insan gibi davranan makineler geliştirmektir" şeklinde tanımlanmıştır. Nabiyev ise yapay zekayı, "bir bilgisayarın veya

bilgisayar kontrollü bir makinenin, genellikle insana özgü olduğu düşünülen akıl yürütme, anlam çıkarma, genelleme ve geçmiş deneyimlerden öğrenme gibi yüksek zihinsel süreçlere ilişkin görevleri yerine getirme yeteneği" olarak tanımlamaktadır. Bu tanıma göre yapay zekanın kullanım alanı, düşünsel yetenek gerektiren işleri belirli verilerle gerçekleştirmektir. Örneğin, 1966 yılında Joseph Weizenbaum tarafından MIT Yapay Zeka Laboratuvarı'nda oluşturulan Eliza Programı, kullanıcıların verdiği cevaplara göre yeni sorular sormakta veya cevaplar vermektedir. Program, kullanıcının girdiği cümlelerdeki anahtar kelimeleri belirleyerek, önceden tanımlanmış cümlelerden birini konuşmanın devamına ekler ve kullanıcı ile etkileşime girer. Kullanıcıdan gelen verileri analiz ederek, insan davranışına benzer sonuçlar üretir. Russel ve Norvig'e göre ise yapay zeka, akıllı varlıkları anlamak ve bunları taklit ederek karar verme sürecini basit, hızlı ve verimli hale getirmek için tasarlanmış bir mantık sistemidir (Bingöl ve diğ. 2020).

Bununla birlikte özetle yapay zeka (AI), insan zekası gerektiren görevleri yerine getirebilen sistemler oluşturmayı amaçlayan geniş bir bilgisayar bilimi alanıdır. Bu görevler arasında akıl yürütme, öğrenme, problem çözme, algılama ve dil anlama yer alır (Kufel ve diğ. 2023).

Yapay Zeka (AI), 20. yüzyılın ortalarında Alan Turing'in makinelerin düşünebileceği fikrini öne sürdüğü 1950'lere kadar uzanır (Taye, 2023). O tarihten günümüze hızla gelişmiştir. Erken AI araştırmaları sembolik yöntemler ve problem tekniklerine odaklanmış, satranç oynama ve matematiksel teoremleri kanıtlama gibi görevleri yerine getirebilen programların geliştirilmesine yol açmıştır (Sharifani ve Amini, 2023; Nilsson, 1998).

1956 yılında Dartmouth Konferansı'nda John McCarthy tarafından "Yapay Zeka" terimi ortaya atılmıştır (Hirani ve diğ. 2024). 1960'lar ve 1970'ler boyunca, sınırlı hesaplama gücü ve aşırı iyimser beklentiler gibi zorluklara rağmen, doğal dil işleme ve robotikte önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Gerlich, 2023). 1980'ler, insan uzmanların karar verme yeteneklerini taklit etmek için tasarlanmış uzman sistemlerin yükselişine tanık olmuştur (Khan ve diğ., 2021)

1990'lar ve 2000'lerin başları, bilgisayarların verilerden öğrenmesini sağlayan algoritmalar geliştirmeye odaklanan makine öğrenimine doğru bir kaymayı işaret etmiştir (Talaei Khoei ve Kaabouch, 2023). Bu dönem aynı zamanda, insan beyninin yapısı ve işlevinden ilham alan sinir ağlarının yeniden canlanmasına da tanık olmuştur (Păvăloaia V-D, ve Necula S-C., 2023). Günümüzde, AI derin öğrenme, pekiştirmeli öğrenme ve doğal dil işleme alanlarında hızla evrim geçirmeye devam etmektedir (Valente ve diğ., 2023).

2.18.1. Makine Öğrenimi (ML) Nedir?

Makine öğrenimi, bilgisayar sistemlerinin kullanıcıdan açık bir komut almadan belirli görevleri yerine getirmek için istatistiksel modelleri kullanma bilimidir. 1980'lerde tanımlanan bu kavram, veri kalıplarına ve istatistiksel çıkarımlara dayanan bir yapay zeka sistemini ifade eder. Örneğin, bir e-posta sürekli olarak istenmeyen posta olarak işaretlenirse, makine belirli bir veri kümesine ulaştığında aynı adresten gelen e-postaları otomatik olarak istenmeyen posta kutusuna taşır. Makine öğrenimi, yapay zeka araştırmalarının bir alt dalı olarak kabul edilir. Makine öğrenim algoritmaları, belirli bir görevi gerçekleştirmek için açıkça programlanmamış olsalar da, öngörülere dayanarak istatistiksel bir mantık oluştururlar. Bu mantığı kurmak için "Eğitim Verisi" olarak bilinen kullanıcı tarafından oluşturulmuş örnek veri kümesine dayanan matematiksel bir model oluşturmak gerekir. Büyük veri kümelerinden yararlı bilgileri çıkarmak için gerekli verilerin elde edilmesi işlemine "Veri Madenciliği" denir. Veri madenciliği, makine öğrenimi içinde bir çalışma alanıdır ve denetimsiz öğrenme yoluyla keşifsel veri analizine odaklanır. Makine öğreniminin en bilinen ve yaygın uygulamalarından biri resim tanımadır. Resim tanımada, makinenin resmi öğrenmesi için binlerce benzer resmin tanıtılması gerekir. Bu şekilde makine, benzer resimleri, motifleri ve pikselleri öğrenerek resimlerin ne olduğunu tanımlayabilir hale gelir. Bu öğrenme sonucunda farklı resimleri ayırt edebilir veya benzer resimlerin ortak özelliklerini tespit edebilir. Sunulan veriler ve parametrelerle benzerlik kurarak kendi kendini eğitir. Makine öğrenimi, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve derin öğrenme gibi üç alt başlık altında incelenebilir (Bingöl ve diğ. 2020).

Makine Öğrenimi (ML), algoritmalar ve istatistiksel modeller kullanarak bilgisayarların bir görevi deneyim yoluyla daha iyi yapmalarını sağlayan AI'nin bir alt kümesidir. ML

sistemleri, bir görevi yerine getirmek için açıkça programlanmak yerine verilerden öğrenir (Rajula ve diğ., 2020).

2.18.1.1. Denetimli Öğrenme (Supervised Learning)

Makine öğreniminde en çok kullanılan ve en popüler yöntemdir. Her eğitim etiketi bir çıktı etiketi üretir. Etiketli verilerle sistem eğitilir. Eğitimle sistemin sorunları öğrenmesi sağlanır. Verilen eğitimler manuel etiketlerle beslenmesi sağlanır (Wang ve diğ., 2024). Denetimli öğrenme kimi kaynaklarda, "gözetimli öğrenme" olarak da adlandırılmaktadır (Ramezan ve diğ., 2021). Tahminler yapılırken, regresyon ya da sınıflandırma yöntemi kullanılmaktadır. Denetimli öğrenme, bir modelin etiketli bir veri kümesi üzerinde eğitilmesini içerir, yani her eğitim örneği bir çıktı etiketi ile eşleştirilir. Bu teknik, sınıflandırma ve regresyon görevleri için yaygın olarak kullanılır. Örneğin, siber güvenlik alanında, denetimli öğrenme modelleri ağ trafiğindeki anormallikleri ve izinsiz girişleri tespit etmek için kullanılır (Rafique ve diğ., 2024) veya gelen mailin spam olduğunu saptamak için bu yöntem kullanılmak istendiğinde, spam olarak sınıflandırılan e-postalar sınıflandırılarak spam olarak değerlendirilecek önemli örnekler makine öğrenimi algoritması beslenmesi gerekmektedir (Abhila ve diğ., 2021). Bu yöntem, giriş verileri ile bu verilere karşılık gelen doğru çıkışlar arasındaki ilişkiyi öğrenmeyi amaçlar. Denetimli öğrenme algoritmaları, sınıflandırma ve regresyon gibi çeşitli görevlerde kullanılır ve sağlık, finans, tarım gibi birçok alanda önemli uygulamalara sahiptir. Denetimli öğrenme, iki ana bileşenden oluşur: eğitim ve test aşamaları. Eğitim aşamasında, model etiketli veri seti üzerinde eğitilir ve bu süreçte model, giriş verileri ile doğru çıkışlar arasındaki ilişkiyi öğrenir. Test aşamasında ise model, daha önce görmediği veriler üzerinde değerlendirilir ve performansı ölçülür. Denetimli öğrenme, sağlık sektöründe hastalık teşhisi ve tedavi planlaması gibi kritik görevlerde kullanılır. Örneğin, tıbbi görüntüleme verileri üzerinde eğitilen modeller, kanser gibi hastalıkların erken teşhisinde yüksek doğruluk oranları sunar (Roy ve diğ., 2022). Ayrıca, tarım sektöründe mahsul verimliliğini artırmak için bitki hastalıklarının tespiti ve sınıflandırılması gibi uygulamalarda da yaygın olarak kullanılır (Ramezan ve diğ., 2021). Denetimli öğrenme alanında yapılan araştırmalar, daha verimli ve doğru modeller geliştirmeye odaklanmaktadır. Özellikle, büyük veri setleri ve yüksek hesaplama gücü

gerektiren derin öğrenme yöntemleri, denetimli öğrenmenin gelecekteki yönelimleri arasında yer almaktadır (Gori ve diğ., 2023).

2.18.1.2. Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning)

Denetimsiz öğrenme, makine öğrenmesi alanında etiketlenmemiş veriler üzerinde çalışarak veri yapısını ve desenlerini keşfetmeyi amaçlayan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle büyük veri kümelerinde gizli kalıpları ve ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılır. Kümeleme, boyut indirgeme ve ilişkilendirme gibi çeşitli görevlerde uygulanır. Örneğin, K-ortalama (K-means) ve Hiyerarşik Kümeleme gibi algoritmalar, verileri benzerliklerine göre gruplandırmak için yaygın olarak kullanılır (Eltouny ve diğ., 2023).

Sistemden istenilen sonuçlar bu nedenle bilinmez. Eğitim ve gözetim dışı sonuçlar üretmektedir. Bu modelle doğru cevap ile eğitilmemiştir. Kendi başına kalıpları bulması gerekmektedir. Denetimsiz öğrenme modelde sistem eldeki verilerden gruplama yaparak benzerliği ya da farklılıkları sonuçlar. Müşteri verilerinden benzer farklı olanlar kolaylıkla listelenip buna göre işlemler yapılabilir (Dhiman ve diğ., 2020). Her model kendi kullanım alanına göre ihtiyacı karşılamaktadır.

Denetimsiz öğrenme, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, yapısal sağlık izleme (SHM) alanında, denetimsiz öğrenme yöntemleri, yapıların titreşim verilerini analiz ederek hasar tespiti için kullanılmıştır. Bu yöntemler, yapıların bütünlüğünü izlemek ve erken uyarı sistemleri geliştirmek için etkili bir şekilde kullanılmıştır (Eltouny ve diğ., 2023).

Ayrıca, biyoinformatik alanında, tek hücreli RNA dizileme verilerinin kümeleme ve anotasyonu için denetimsiz öğrenme teknikleri kullanılmıştır. Denetimsiz öğrenmenin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, etiketlenmemiş veriler üzerinde çalışırken, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek zordur. Ayrıca, denetimsiz öğrenme algoritmalarının performansı, veri setinin yapısına ve özelliklerine bağlıdır (Chen ve diğ., 2020). Bu nedenle, denetimsiz öğrenme yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.

Denetimsiz öğrenmenin performansını artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar önerilmiştir. Örneğin, derin öğrenme tabanlı denetimsiz özellik seçimi yöntemleri,

gereksiz ve korele özellikleri ayıklayarak modelin performansını artırmayı hedefler (Zhou ve diğ., 2024). Ayrıca, zaman serisi verilerinin kümeleme ve analizinde denetimsiz topluluk öğrenme yöntemleri kullanılmıştır (Yang, 2016).

Denetimsiz öğrenme, makine öğrenmesi alanında önemli bir yere sahiptir ve çeşitli sektörlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Gelecekte, daha gelişmiş algoritmalar ve teknolojilerle birlikte denetimsiz öğrenmenin etkisi daha da artacaktır. Bu tekniklerin güçlü ve zayıf yönlerini anlamak, araştırmacıların ve uygulayıcıların karmaşık problemleri çözmede tam potansiyelinden yararlanmalarını sağlar (Zhou ve diğ., 2024).

2.18.1.3. Yarı Denetimli Öğrenme (Semi-supervised Learning)

Yarı denetimli öğrenme Denetimli öğrenme ve Denetimsiz öğrenme sistemlerin karmasıdır. Bazı veriler etiketlenmesine rağmen bazı veriler etiketlenmemiştir. Buradaki amaç etiketlenmeyen küçük bir verinin etiketlenmiş veriyle beraber kullanılmasıyla öğrenmede önemli miktarda iyileşme sağlanabildiği gözlenmiştir (Sabiri ve diğ., 2024).

Yarı denetimli öğrenme, küçük bir etiketli veri kümesi ile büyük bir etiketsiz veri kümesini bir arada kullanarak model eğitimi yapar. Bu yöntem, etiketsiz verilerin modelin öğrenme sürecine katkıda bulunup bulunamayacağını ve eğer bulunabiliyorsa, bu katkının nasıl optimize edileceğini araştırır (Wang ve diğ., 2024). Yarı denetimli öğrenme, etiketli verilerin yetersiz olduğu durumlarda bile yüksek doğruluk oranları elde edebilir.

Yarı denetimli öğrenme, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, tıbbi görüntü analizinde, retinal görüntülerde kan damarlarının segmentasyonu için yarı denetimli öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, sınırlı etiketli veri ile yüksek kaliteli segmentasyon sonuçları elde etmeyi başarmıştır (Chen ve diğ., 2020). Ayrıca, yarı denetimli öğrenme, nesne tespiti ve metin sınıflandırma gibi görevlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve diğ., 2024). Yarı denetimli öğrenmenin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, etiketsiz verilerin doğru bir şekilde etiketlenmesi ve modelin bu verilerden öğrenme sürecinin optimize edilmesi zordur. Ayrıca, etiketsiz verilerin yanlış etiketlenmesi, modelin performansını olumsuz etkileyebilir (Chen ve diğ., 2020). Yarı denetimli öğrenmenin performansını artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar

önerilmiştir. Örneğin, çoklu artırma tabanlı karşıt öğrenme yöntemleri, etiketsiz verilerden daha fazla bilgi çıkararak modelin doğruluğunu artırmayı hedeflemektedir (Wang ve diğ., 2024). U-Net derin öğrenme ağı gibi yöntemler, tıbbi görüntü segmentasyonunda yarı denetimli öğrenme teknikleri ile birleştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Chen ve diğ., 2020). Gelecekte, daha gelişmiş algoritmalar ve teknolojilerle birlikte yarı denetimli öğrenmenin etkisi daha da artacaktır. Bu tekniklerin güçlü ve zayıf yönlerini anlamak, araştırmacıların ve uygulayıcıların karmaşık problemleri çözmede tam potansiyelinden yararlanmalarını sağlar (van Engelen ve diğ., 2020).

2.18.2. Makine Öğrenme Modelleri

Makine öğrenimi (ML), her biri farklı veri türlerine ve problemlere uygun çeşitli modelleri ve teknikleri kapsar. Coarse Tree, Binary Logistic Regression, Efficient Linear Support Vector Machine (SVM), Gaussian Naive Bayes ve K-Nearest Neighbor modelleri, sağlamlıkları ve verimlilikleri nedeniyle sağlık, finans ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Talaei Khoei ve Kaabouch, 2023).

2.18.2.1. Karar Ağacı (Coarse Tree) Modeli

Coarse Tree modeli, daha az bölünme kullanarak karar verme sürecini basitleştiren bir tür karar ağacıdır, bu da onu daha az karmaşık ve eğitimi daha hızlı hale getirir. Bu model, yorumlanabilirlik ve hızın kritik olduğu senaryolarda özellikle yararlıdır. Örneğin, karar ağacı modelleri, üretilen beton oranlarına dayalı olarak yüksek dayanımlı beton karışım tasarım yöntemlerini sınıflandırmak için etkili bir şekilde kullanılmıştır Coarse Tree modeli, karar ağaçlarının bir türüdür ve daha az sayıda düğüm kullanarak karar verme sürecini basitleştirir. Bu model, özellikle büyük veri kümeleri ile çalışırken hesaplama verimliliğini artırmak için kullanılır. Coarse Tree modeli, veri setindeki örnekleri sınıflandırmak için bir dizi basit karar kuralı kullanır ve bu kurallar, veri setindeki özelliklerin belirli eşik değerlerine dayalı olarak oluşturulur (Alghamdi, 2022).

Coarse Tree modeli, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, yüksek dayanımlı beton karışım tasarım yöntemlerini sınıflandırmak için kullanılmıştır. Tarım alanında, bitki hastalıklarının teşhisi ve yönetimi için kullanılmıştır (Men ve diğ., 2022).

Coarse Tree modelinin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, modelin basitliği, karmaşık veri setlerinde performansını sınırlayabilir. Ayrıca, modelin doğruluğu, veri setinin büyüklüğüne ve kalitesine bağlıdır. Coarse Tree modeli, aşırı uyum (overfitting) riskini azaltmak için genellikle çapraz doğrulama gibi tekniklerle birlikte kullanılır (Alghamdi, 2022).

Coarse Tree modelinin performansını artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar önerilmiştir. Örneğin, modelin doğruluğunu artırmak için daha karmaşık karar ağaçları ve ensemble (topluluk) yöntemleri ile birleştirilebilir. Ayrıca, modelin hesaplama verimliliğini artırmak için paralel işlem teknikleri kullanılabilir (Men ve diğ., 2022).

2.18.2.2. İkili Lojistik Regresyon (Binary Logistic Regression) Modeli

Binary Logistic Regression, sonuç değişkeninin iki olası sonuca sahip olduğu ikili sınıflandırma problemleri için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu model, belirli bir giriş noktasının belirli bir sınıfa ait olma olasılığını tahmin etmektedir. Model, özellikle tıbbi araştırmalar, sosyal bilimler ve mühendislik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıbbi araştırmalarda, çeşitli belirleyicilere dayalı olarak bir hastalığın varlığını veya yokluğunu tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Model, bağımsız değişkenlerin logit dönüşümü ile bağımlı değişkenin olasılığını tahmin eder. Bu yöntem, bağımsız değişkenlerin log-lineer formda olduğu durumlarda gerçek koşullu olasılıkları geri kazanmaktadır (Schaeben, 2014).

Model, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, tıbbi teşhislerde, hastalıkların varlığını veya yokluğunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Bir çalışmada, kronik böbrek hastalığı (CKD) gibi hastalıkların tahmininde yüksek doğruluk oranları elde etmiştir (Yang ve diğ., 2023). Ayrıca, sosyal bilimlerde, bireylerin belirli davranışları sergileme olasılığını tahmin etmek için kullanılmıştır Modelin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, bağımsız değişkenlerin koşullu bağımsızlık varsayımı, gerçek dünya verilerinde her zaman geçerli olmayabilir. Bu, modelin performansını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, modelin doğruluğu, veri setinin büyüklüğüne ve kalitesine bağlıdır (Barros ve diğ., 2022).

Binary Logistic Regression'in performansını artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar önerilmiştir. Örneğin, Üç Yönlü Artımlı Naive Bayes sınıflandırıcısı, dinamik

verileri işlemek ve sınıflandırma performansını artırmak için artımlı öğrenmeyi üç yönlü karar teorisi ile birleştirir (Yang ve diğ., 2023). Ayrıca, bulanık ayrıklaştırma kullanarak sürekli özellikleri kategorik olanlara dönüştürmek, modelin dayanıklılığını artırabilir (Barros ve diğ., 2022).

2.18.2.3. Verimli Doğrusal Destek Vektör Makinesi (Efficient Linear Support Vector Machine, SVM) Modeli

Efficient Linear SVM, sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlayan sınıflandırma doğruluğunu koruyan standart SVM'nin bir varyantı olan bir makine öğrenme algoritmasıdır. Bu model, yüksek boyutlu alanlarda özellikle etkilidir ve yazılım güvenilirliği tahmininde uygulanmış, diğer algoritmalara kıyasla üstün performans göstermiştir. Efficient Linear Support Vector Machine (SVM), Bu model, özellikle büyük veri kümeleri ve yüksek boyutlu veri setleri ile çalışırken hesaplama verimliliğini optimize etmeye odaklanır. Efficient Linear SVM, klasik SVM'nin bir varyantıdır ve hesaplama maliyetlerini azaltmak için çeşitli optimizasyon teknikleri kullanır. Bu model, doğrusal ayırıcı hiper düzlemi bulmak için doğrusal cebir ve optimizasyon yöntemlerini kullanır. Özellikle, sınıflandırma hatası ve ayırıcı hiper düzlemin sıfır olmayan elemanlarının sayısı gibi birden fazla hedef arasında uygun dengeyi bulmayı amaçlayan çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak ele alınır (Pirouz ve Pirouz., 2023).

Efficient Linear SVM, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, büyük veri senaryolarında, alt örnekleme yöntemleri kullanılarak eğitim aşamasında gereken örnek sayısını azaltmak için kullanılmıştır. Bu yöntem, sınıflandırma hatasında önemli bir kayıp olmadan SVM problemini daha hızlı çözmeyi sağlar (Bárcenas ve diğ., 2022). Ayrıca, tarım alanında, insansız hava taşıtlarının (İHA) enerji verimli yönetimi için kullanılmış ve İHA'ların büyük tarım alanlarında doğru bir şekilde konumlandırılmasını sağlamıştır (Al-Naeem ve diğ., 2023).

Efficient Linear SVM'nin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, büyük ölçekli eğitim setleri ile çalışırken hesaplama ve modelleme karmaşıklıkları nedeniyle uygulanması zor olabilir. Ayrıca, yüksek boyutlu veri setlerinde, alt örnekleme yöntemlerinin performansı, boyut arttıkça daha kısıtlayıcı hale gelebilir Efficient Linear SVM'nin performansını

artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar önerilmiştir. Örneğin, en az kareler yaklaşımını kullanarak hesaplama hızını artıran bir SVM türü geliştirilmiştir (Bárcenas ve diğ., 2022). Ayrıca, çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak ele alınan doğrusal SVM sınıflandırma modelleri, özellik seçimi ve model karmaşıklığı arasında uygun dengeyi bulmayı amaçlamaktadır (Pirouz ve Pirouz, 2023). Efficient Linear Support Vector Machine, yüksek doğruluk ve verimlilik sağlayan temel bir makine öğrenme algoritmasıdır. Belirli sınırlamaları olmasına rağmen, devam eden araştırmalar ve geliştirmeler, performansını ve çeşitli alanlardaki uygulanabilirliğini iyileştirmeye devam etmektedir. Efficient Linear SVM'nin güçlü ve zayıf yönlerini anlamak, uygulayıcıların karmaşık sınıflandırma problemlerini çözmede tam potansiyelinden yararlanmalarını sağlar.

2.18.2.4. Gauss Dağılımlı Naif Bayes (Gaussian Naive Bayes, GNB) Modeli

Gaussian Naive Bayes, özelliklerin Gaussian dağılımını takip ettiğini varsayan Bayes teoremine dayalı olasılıksal bir sınıflandırıcıdır. Bu model, basit ama güçlüdür, özellikle normallik varsayımı geçerli olduğunda oldukça etkilidir. GNB modelleri, kronik böbrek hastalığı gibi hastalıkların varlığını tahmin etmek için hasta verilerini analiz etmekte kullanılmıştır (Yang ve diğ., 2023). Metin sınıflandırmada, GNB, kelime frekanslarının Gaussian dağılımı izlediği varsayımından yararlanarak belgeleri içeriklerine göre kategorize etmek için kullanılır (Al-Naeem ve diğ., 2023). Ayrıca, GNB, görüntü tanıma görevlerinde, piksel yoğunluk değerlerine dayalı olarak görüntüleri sınıflandırmada yardımcı olur (Zhang ve diğ., 2019).

Modelin Gaussian dağılımına göre dağıldığını varsayımı, verilerin olasılığının hesaplanmasını basitleştirir ve GNB'yi hesaplama açısından verimli ve basit bir model haline getirir. Belirli bir sınıfa ait olma olasılığı, Gaussian olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak hesaplanır (Yang ve diğ., 2023).

Avantajlarına rağmen, GNB'nin birkaç sınırlaması vardır. Ana zorluklardan biri, özellik bağımsızlığı varsayımıdır, bu gerçek dünya verilerinde geçerli olmayabilir. Bu, özellikler korele olduğunda optimal olmayan performansa yol açabilir. Ayrıca, sürekli özellikler için Gaussian dağılımı varsayımı her zaman geçerli olmayabilir, bu da veri dönüşümü veya ayrıklaştırma gibi tekniklerin kullanılmasını gerektirir (Al-Naeem ve diğ., 2023).

Bu zorlukları ele almak için, GNB'nin çeşitli geliştirmeleri ve varyantları önerilmiştir. Örneğin, Üç Yönlü Artımlı Naive Bayes sınıflandırıcısı, dinamik verileri işlemek ve sınıflandırma performansını artırmak için artımlı öğrenmeyi üç yönlü karar teorisi ile birleştirir (Yang ve diğ., 2023). Bir diğer yaklaşım, sürekli özellikleri kategorik olanlara dönüştürmek için bulanık ayrıklaştırma kullanarak modelin dayanıklılığını artırmayı içerir (Al-Naeem ve diğ., 2023).

Gaussian Naive Bayes, basitliği ve verimliliği nedeniyle makine öğrenme taşıt setinde temel bir algoritma olmaya devam etmektedir. Belirli sınırlamaları olmasına rağmen, devam eden araştırmalar ve geliştirmeler, performansını ve çeşitli alanlardaki uygulanabilirliğini iyileştirmeye devam etmektedir.

2.18.2.5. K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor, KNN) Modeli

K-Nearest Neighbor, sınıflandırma ve regresyon için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Bir örneği, en yakın k komşusu arasındaki çoğunluk sınıfına göre sınıflandırır. KNN, basitliği ve metin kategorilendirme ve hastalık teşhisi gibi çeşitli uygulamalardaki etkinliği ile bilinir. KNN algoritması, sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan en basit ve en etkili makine öğrenme algoritmalarından biridir. Parametrik olmayan yapısı ve kolay uygulanabilirliği, onu sağlık, finans ve görüntü tanıma gibi çeşitli alanlarda popüler bir seçim haline getirmektedir. KNN, bir veri noktasını k-en yakın komşusu arasındaki çoğunluk sınıfına göre sınıflandıran örnek tabanlı bir öğrenme algoritmasıdır. Algoritma, özellik uzayında en yakın komşuları bulmak için tipik olarak Öklid mesafesi gibi bir mesafe metriğine dayanır. KNN'nin basitliği, doğrudan yaklaşımında yatar: herhangi bir eğitim aşaması gerektirmez ve tüm hesaplamalar tahmin aşamasına kadar ertelenir (Akbulut ve diğ., 2017)

KNN, çok yönlülüğü ve sağlamlığı nedeniyle çeşitli alanlarda yaygın olarak uygulanmıştır. Örneğin, tıbbi teşhislerde, KNN hasta verilerine dayalı olarak hastalıkların varlığını tahmin etmek için kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar, KNN'nin tıbbi görüntüleri sınıflandırmadaki etkinliğini göstermiş ve yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır (Yang ve diğ., 2023). Benzer şekilde, finans alanında, KNN geçmiş verileri analiz ederek borsa trendlerini tahmin etmek için kullanılmıştır (Sonkavde ve diğ., 2023).

Avantajlarına rağmen, KNN'nin birkaç sınırlaması vardır. Ana zorluklardan biri, k ve mesafe metriğinin seçimine duyarlılığıdır. Uygun olmayan bir k seçimi, aşırı öğrenme veya yetersiz öğrenmeye yol açabilir. Ayrıca, KNN büyük veri kümeleriyle çalışırken hesaplama açısından pahalı olabilir, çünkü sorgu noktası ile veri kümesindeki tüm noktalar arasındaki mesafenin hesaplanmasını gerektirir (Kang, 2021).

Bu zorlukları ele almak için, KNN'nin çeşitli geliştirmeleri ve varyantları önerilmiştir. Örneğin, Uyarlanabilir K-En Yakın Komşular metodolojisi, k değerlerini ve eğitim verilerinin alt kümelerini dinamik olarak ayarlayarak uyarlanabilirliği artıran dinamik bir sınıflandırıcı seçim sistemi sunar (Saadatfar ve diğ., 2020). Bir diğer varyant olan Neutrosophic Set-Based KNN, doğruluk, belirsizlik ve yanlışlık üyelik derecelerini dikkate alarak sınıflandırma performansını artırmak için neutrosophic mantığı içerir (Akbulut ve diğ., 2017).

KNN, basitliği ve etkinliği nedeniyle makine öğrenme yöntemlerinde temel bir algoritma olmaya devam etmektedir. Belirli sınırlamaları olmasına rağmen, devam eden araştırmalar ve geliştirmeler, performansını ve çeşitli alanlardaki uygulanabilirliğini iyileştirmeye devam etmektedir. KNN'nin güçlü ve zayıf yönlerini anlamak, uygulayıcıların karmaşık sınıflandırma ve regresyon problemlerini çözmede tam potansiyelinden yararlanmalarını sağlar.

2.18.3. Derin Öğrenme (DL):

DL, verilerin çeşitli faktörlerini analiz etmek için birçok katmana sahip sinir ağlarını kullanan ML'nin daha ileri bir alt kümesidir. Özellikle görüntü ve konuşma tanıma gibi görevlerde etkilidir (Zhou ve diğ., 2023; Valente ve diğ., 2023). Derin öğrenme bir makine öğrenmesi sınıfıdır. Derin öğrenme, özellik çıkarma ve dönüştürme için birçok doğrusal olmayan işlem birimi katmanını kullanır. Her ardışık katman, önceki katmandaki çıktıyı girdi olarak alır. Algoritmalar denetimli (sınıflandırma gibi) veya denetimsiz (desen analizi gibi) olabilir Derin öğrenmede, verilerin birden fazla özellik seviyesinin veya temsillerinin öğrenilmesine dayanan bir yapı söz konusudur. Üst düzey özellikler, alt düzey özelliklerden türetilerek hiyerarşik bir temsil oluşturur. Bu temsil, soyutlamanın farklı seviyelerine karşılık gelen birden çok temsil seviyesini öğrenmektedir (Zhou ve diğ., 2023). Derin öğrenme temel olarak verinin temsilinden

öğrenmeye dayalıdır. Bir görüntü için temsil denildiğinde; piksel başına yoğunluk değerlerinin bir vektörü veya kenar kümeleri, özel şekiller gibi özellikler düşünülebilir (Alsharif ve diğ., 2023). Bu özelliklerin içinden bazıları veriyi daha iyi temsil etmektedir. Bu aşamada yine bir avantaj olarak, derin öğrenme yöntemleri, elle çıkarılan özellikler (handcrafted features) yerine veriyi en iyi temsil eden hiyerarşik özellik çıkarımı için etkin algoritmalar kullanmaktadır (Zhou ve diğ., 2023).

DL'nin kökleri, yapay sinir ağlarının geliştirilmesiyle 1940'lara kadar uzanır. Ancak, 2010'larda AlexNet gibi modellerin ImageNet yarışmasındaki başarısıyla önemli bir ivme kazanmıştır. Donanımda (örneğin GPU'lar) ve büyük veri setlerinin kullanılabilirliğinde yaşanan ilerlemeler, DL'nin ilerlemesinde kritik olmuştur (Krizhevsky ve diğ., 2012).

2.18.4. Pekiştirmeli Öğrenme

Pekiştirmeli öğrenme, bir öğrenen ajanın (yapay zeka veya robot gibi) çevresiyle etkileşime girerek ve bu etkileşimler sonucunda ödüller veya cezalar alarak karar verme yeteneğini geliştirdiği bir makine öğrenimi türüdür. Bu teknik, robotik, oyun oynama ve otonom sistemler gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme, dinamik ortamlara uyum sağlayabilen ve zamanla performansını artırabilen akıllı sistemlerin geliştirilmesini sağlar (Sutton ve Barto, 1998).

Örneğin, bir robotun belirli bir görevi yerine getirmesi için pekiştirmeli öğrenme kullanıldığında, robot çevresiyle etkileşime girer ve her eyleminin sonucunda bir ödül veya ceza alır. Bu süreç, robotun zamanla en iyi eylemleri öğrenmesini ve performansını optimize etmesini sağlar (Kober ve diğ., 2013).

Pekiştirmeli öğrenme algoritmaları, Markov Karar Süreçleri (MDP) ve kısmen gözlemlenebilir Markov Karar Süreçleri (POMDP) gibi matematiksel modeller üzerine kuruludur. Pekiştirmeli öğrenme, çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, robotik alanında, RL algoritmaları, robotların nesne kavrama ve otonom öğrenme gibi görevlerde hassasiyet ve uyum yeteneklerini artırmak için kullanılmıştır. Sağlık alanında ise, hücre büyüme problemlerinin optimize edilmesi ve terapötik çözümlerin geliştirilmesi için RL teknikleri kullanılmıştır (Al-Hamadani ve diğ., 2024). Eğitimde,

RL, öğrencilerin performansına göre uyarlanabilir öğrenme deneyimleri sunarak motivasyon ve katılım seviyelerini artırmayı hedefler. Pekiştirmeli öğrenmenin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, büyük ve karmaşık durum-uzaylarında optimal politikaların öğrenilmesi zordur. Ayrıca, RL algoritmalarının performansı, ödül fonksiyonunun doğru tanımlanmasına ve çevrenin doğru modellenmesine bağlıdır (Fahad ve diğ., 2023).

Pekiştirmeli öğrenmenin performansını artırmak için çeşitli geliştirmeler ve varyantlar önerilmiştir. Örneğin, derin pekiştirmeli öğrenme (Deep RL), derin sinir ağları ile RL algoritmalarını birleştirerek büyük veri kümelerinde daha etkili öğrenme sağlar. Ayrıca, meta-pekiştirmeli öğrenme, farklı görevler arasında transfer öğrenme yeteneklerini artırarak RL algoritmalarının genelleme yeteneklerini geliştirir (Tammewar ve diğ., 2023).

2.18.5. Makine Öğrenmesinde Ki-Kare Yönteminin Kullanımı

Makine öğrenmesinde özellik seçimi ve veri ön işleme aşamalarında sıklıkla kullanılan ki-kare testi önemli bir yer tutar. Ki-kare testi, özellikle kategorik verilerin analizinde kullanılır ve bağımsızlık testi olarak bilinir (Liu ve Yu, 2005). Bu test, gözlenen frekanslar ile beklenen frekanslar arasındaki farkı ölçer ve bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirler (McHugh, 2013).

Ki-kare testi, makine öğrenmesi modellerinde özellik seçimi için yaygın olarak kullanılır. Özellikle sınıflandırma problemlerinde, bağımsız değişkenlerin hedef değişkenle olan ilişkisini belirlemek için kullanılır (Sharma ve diğ., 2023). Bu sayede, modelin performansını artırmak için en önemli özellikler seçilir (Xie ve diğ., 2021).

Veri ön işleme aşamasında ham verilerin analiz edilebilir hale getirilmesi için bir dizi adım uygulanır. Bu süreçte, verilerin temizlenmesi, dönüştürülmesi ve düzenlenmesi gibi işlemler gerçekleştirilir. Ki-kare testi, veri ön işleme aşamasında da önemli bir rol oynar. Özellikle kategorik verilerin analizinde, verilerin bağımsız olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Ki-kare testi, iki veya daha fazla kategorik değişken arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için kullanılan bir istatistiksel testtir. Bu test, gözlenen frekanslar ile beklenen frekanslar arasındaki farkı analiz ederek değişkenlerin bağımsızlığını veya

ilişkisini test etmek amacıyla kullanılır. Örneğin, bir anket çalışmasında cinsiyet ve tercih edilen ürün kategorisi gibi iki kategorik değişkenin bağımsız olup olmadığını belirlemek için ki-kare testi uygulanabilir (García ve diğ., 2016). Veri ön işleme aşamasında, ki-kare testi kullanılarak kategorik verilerin bağımsızlığı test edilir ve bu sayede verilerin analiz için uygun hale getirilmesi sağlanır. Bu testin uygulanması, gözlenen frekansların toplanması, beklenen frekansların hesaplanması ve ki-kare istatistiğinin hesaplanması adımlarını içerir (Keogh ve Mueen, 2017). Ki-kare testi, parametrik olmayan bir test olduğu için, örneklem hacmi küçük olan veri setlerinde kullanılabilir (McHugh, 2013).

2.18.6. Makine Öğrenmesinde 5 Katlı Çapraz Doğrulama

Makine öğrenmesi (ML) modellerinin performansını değerlendirmek ve genelleme yeteneklerini artırmak için kullanılan yöntemlerden biri çapraz doğrulamadır. Çapraz doğrulama, veri setini eğitim ve test setlerine bölerek modelin farklı veri alt kümeleri üzerinde test edilmesini sağlar. Bu sayede modelin aşırı öğrenme (overfitting) veya eksik öğrenme (underfitting) yapma olasılığı azaltılır (Kohavi, 1995).

Çapraz Doğrulama Nedir? Çapraz doğrulama, veri setini belirli sayıda alt kümeye böler ve her bir alt kümeyi sırayla test seti olarak kullanır. Bu yöntem, modelin tüm veri seti üzerinde test edilmesini sağlar ve daha güvenilir performans tahminleri elde edilmesine yardımcı olur (Arlot ve Celisse, 2010).

5 katlı çapraz doğrulama, veri setinin beş eşit parçaya bölünmesi ve her bir parçanın sırayla test seti olarak kullanılması işlemidir. Bu yöntem, veri setinin her bir parçasının hem eğitim hem de test seti olarak kullanılmasını sağlar. Aşağıda bu yöntemin adımları detaylandırılmıştır:

Veri Setinin Bölünmesi: Veri seti beş eşit parçaya bölünür.

Modelin Eğitilmesi ve Test Edilmesi: İlk dört parça eğitim seti olarak kullanılırken, beşinci parça test seti olarak kullanılır. Bu işlem beş kez tekrarlanır ve her seferinde farklı bir parça test seti olarak seçilir.

Sonuçların Birleştirilmesi: Her bir adımda elde edilen performans metrikleri (örneğin doğruluk, F1 skoru) birleştirilir ve ortalama performans hesaplanır (Kohavi, 1995).

2.18.7. Beş Katlı Çapraz Doğrulamanın Avantajları

1. Genelleme Yeteneği: Modelin farklı veri alt kümeleri üzerinde test edilmesi, genelleme yeteneğini artırır (Zhang, Y., ve Yang, Q., 2021).
2. Veri Etkinliği: Tüm veri seti hem eğitim hem de test için kullanıldığından, veri etkinliği sağlanır (Kohavi, 1995).
3. Aşırı Öğrenmenin Azaltılması: Modelin aşırı öğrenme yapma olasılığı azaltılır (Ng, 2004).

5 katlı çapraz doğrulama, özellikle sınırlı veri setlerine sahip projelerde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, tıbbi görüntü analizi (Litjens, G., ve diğ., 2017) doğal dil işleme (Young ve diğ., 2018) ve finansal tahmin modellerinde bu yöntem sıklıkla tercih edilir (Fischer ve Krauss, 2018).

Bir çalışmada, tıbbi görüntülerin sınıflandırılması için derin öğrenme modelleri kullanılmış ve 5 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile model performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, modelin doğruluk oranı % 95 olarak bulunmuş ve modelin genelleme yeteneği yüksek olarak rapor edilmiştir (Esteva ve diğ., 2017).

2.18.8. Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix)

Karışıklık matrisi, makine öğrenimi ve veri madenciliği alanlarında sınıflandırma algoritmalarının performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir taşıttır. Bu matris, modelin tahmin ettiği sınıflar ile gerçek sınıflar arasındaki ilişkiyi gösterir ve modelin ne kadar doğru tahminler yaptığını anlamamıza yardımcı olur.

2.18.8.1. Karışıklık Matrisinin Yapısı

Karışıklık matrisi, genellikle dört ana bileşenden oluşur:

Gerçek Pozitif, (True Positive, TP): Modelin doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırdığı örnekler.

Gerçek Negatif, (True Negative, TN): Modelin doğru bir şekilde negatif olarak sınıflandırdığı örnekler.

Yanlış Pozitif, (False Positive, FP): Modelin yanlış bir şekilde pozitif olarak sınıflandırdığı örnekler.

Yanlış Negatif, (False Negative, FN): Modelin yanlış bir şekilde negatif olarak sınıflandırdığı örnekler.

Bu bileşenler, modelin performansını değerlendirmek için çeşitli metriklerin hesaplanmasında kullanılır. Örneğin, doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru gibi metrikler bu bileşenler kullanılarak hesaplanır (Markoulidakis ve diğ., 2021).

2.18.8.2. Karışıklık Matrisinin Kullanım Alanları

Karışıklık matrisi, özellikle aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılır: Tıp: Hastalık teşhisi ve sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için (Olaniran ve diğ., 2024). Müşteri Memnuniyeti: Müşteri geri bildirimlerini sınıflandırmak ve analiz etmek için kullanılır (Aamir ve diğ., 2024). Görüntü İşleme: Görüntü sınıflandırma ve nesne tanıma modellerinin doğruluğunu ölçmek için kullanılmaktadır (Johnson ve Jozdani, 2020).

2.18.9. Doğruluk, Kesinlik, Geri Çağırma ve F1 Skoru

Makine öğrenimi ve veri madenciliği alanlarında, model performansını değerlendirmek için çeşitli metrikler kullanılır. Bu metrikler arasında doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), geri çağırma (recall) ve F1 skoru önemli bir yer tutar.

2.18.9.1. Doğruluk (Accuracy)

Doğruluk, Denklem 2.48'de gösterildiği üzere modelin doğru tahminlerinin toplam tahminlere oranıdır. Basit bir ifadeyle, modelin ne kadar doğru tahmin yaptığını gösterir. Doğruluk, özellikle dengeli veri setlerinde kullanışlıdır, ancak dengesiz veri setlerinde yanıltıcı olabilir (Kim ve diğ., 2024).

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{2.48}$$

Doğruluk, modelin toplam doğru tahminlerinin (doğru pozitif ve doğru negatif) toplam tahminlere oranıdır. Dengeli veri setlerinde güvenilir bir ölçüt olarak kullanılabilir, ancak dengesiz veri setlerinde yanıltıcı olabilir. Örneğin, dengesiz bir veri setinde tüm örnekleri negatif olarak sınıflandıran bir model yüksek doğruluk elde edebilir, ancak pozitif sınıflara karşı başarısız olur

2.18.9.2. Kesinlik (Precision)

Kesinlik, modelin pozitif tahminlerinin ne kadarının doğru olduğunu gösterir. Yani, modelin pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu ölçer. Kesinlik, yanlış pozitiflerin önemli olduğu durumlarda kritik bir metriktir ve Denklem 2.49'da gösterildiği üzere hesaplanmaktadır (Dubey ve diğ., 2023).

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2.49}$$

Kesinlik, modelin pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu ölçer. Yani, yanlış pozitiflerin önemli olduğu durumlarda tercih edilen bir metriktir. Örneğin, bir spam e-posta sınıflandırıcısında, kesinlik yüksek olduğunda yanlışlıkla istenmeyen postaları işaretlemekten kaçınılır

2.18.9.3. Geri Çağırma (Recall)

Geri çağırma, modelin gerçek pozitif örnekleri ne kadar iyi yakaladığını gösterir. Yani, tüm gerçek pozitif örneklerin ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırıldığını ölçer. Geri çağırma, yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır (Farhadpour ve diğ., 2024).

$$Geri\ Çağırma = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2.50}$$

Geri çağırma, Denklem 2.50'de gösterildiği üzere modelin gerçek pozitifleri yakalama oranını gösterir. Yani, tüm gerçek pozitif örneklerin model tarafından doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırılma oranıdır. Özellikle yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda (örneğin, hastalık teşhisi) kullanışlıdır.

2.18.9.4. F1 Skoru

F1 skoru, Denklem 2.51'de gösterildiği üzere kesinlik ve geri çağırmanın harmonik ortalamasıdır. Bu denklem, hem yanlış pozitiflerin hem de yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda kullanılır. F1 skoru, modelin genel performansını daha dengeli bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olur (Ahmad, ve diğ., 2022).

$$F1\ Skoru = 2x\ \frac{(Kesinlik\ x\ Geri\ Çağırma)}{(Kesinlik +\ Geri\ Çağırma)} \tag{2.51}$$

F1 skoru, kesinlik ve geri çağırmanın harmonik ortalamasıdır. Hem yanlış pozitiflerin hem de yanlış negatiflerin önemli olduğu dengeli bir performans ölçütüdür. F1 skoru, modelin genel performansını daha dengeli bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olur

2.18.10. Toplam Verimli Bakım için Makine Öğreniminin Uygulanması

Makine öğrenimi (ML) modelleri, endüstriyel süreçlerin izlenmesi ve analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller, sıcaklık, titreşim ve basınç gibi makine parametrelerini izlemek için sensörlerden ve IoT cihazlarından gelen verileri kullanır. Bu süreç, verilerin doğru ve güvenilir olmasını sağlamak için birkaç adımdan oluşur.

Veri Toplama: Sensörler ve IoT cihazları, makine parametrelerini sürekli olarak izler ve bu verileri toplar. Örneğin, bir üretim hattındaki sıcaklık sensörleri, ortam sıcaklığını sürekli olarak ölçer ve bu verileri bir veri tabanına gönderir. Bu veriler, makine öğrenimi modelleri tarafından analiz edilmek üzere toplanır. Veri toplama süreci, verilerin zamanında ve doğru bir şekilde toplanmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Krishnamurthi ve diğ., 2020).

Veri Temizleme: Toplanan veriler genellikle ham ve gürültülü olabilir. Veri temizleme, bu verilerin gürültüden arındırılmasını ve hatalı verilerin düzeltilmesini içerir. Örneğin, bir sensör arızası nedeniyle oluşan anormal veri noktaları, veri setinden çıkarılabilir veya düzeltilir (Zhang ve diğ., 2021). Veri temizleme, makine öğrenimi modellerinin doğruluğunu artırmak için önemli bir adımdır.

Veri Normalizasyonu: Veri normalizasyonu, verilerin tutarlı bir formatta olmasını sağlar. Bu, farklı sensörlerden gelen verilerin aynı ölçek ve birimlerde olmasını içerir. Örneğin,

sıcaklık verileri farklı sensörlerden Celsius veya Fahrenheit cinsinden gelebilir. Bu veriler, analiz edilmeden önce aynı birime dönüştürülmelidir (Yang ve diğ., 2020). Veri normalizasyonu, verilerin karşılaştırılabilir olmasını ve analizlerin daha doğru sonuçlar vermesini sağlar.

Makine öğrenimi, toplam verimli bakım (TPM) süreçlerinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır:

Arıza Tahmini: Makine öğrenimi algoritmaları, sensör verilerini analiz ederek ekipman arızalarını tahmin edebilir. Bu, bakım ekiplerinin arızaları önceden tespit edip önleyici bakım yapmalarını sağlar. Örneğin, bir çalışmada, makine öğrenimi modelleri kullanılarak üretim ekipmanlarının arıza tahminleri yapılmış ve bu sayede bakım maliyetleri azaltılmıştır (Rojek ve diğ., 2023).

Bakım Zamanlaması: Makine öğrenimi, bakım zamanlamasını optimize etmek için kullanılabilir. Bu, ekipmanların en uygun zamanlarda bakım yapılmasını sağlayarak üretim kesintilerini en aza indirir. Bir başka çalışmada, makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak bakım zamanlaması optimize edilmiş ve üretim verimliliği artırılmıştır (Wolska ve diğ., 2023).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE MODELLEME

Deneylerin temel amacı; Li-ion pil hücrelerinin, batarya modüllerinin ve bataryalarının farklı etki koşulları altında (mekanik, termal ve elektrik);

(1) Termal kaçak davranışlarının karaktersitiğinin gözlemlenmesi, reaksiyonu durdurabilecek maddenin etkisinin gözlemlenmesi ve irdelenmesi,
(2) Termal kaçak mekanizmasının giderilmesi sonrası sıcaklığın, termal kaçağın başlayacağı kritik sıcaklık eşik seviyenin altına çekilmesinin gözlemlenmesi ve irdelenmesidir,
(3) Termal kaçak mekanizmasının oluşmasının öncesinde durum tahmini yapılması, toplam verimli bakım (TPM) anlayışı içinde makine öğrenmesi modellemesinin kurulması olarak özetlenebilir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Kullanılan Li-ion Pil ve Bataryalar

3.1.1.1. Silindirik LCO Tip Pil

Toplam 489 adet 18650 tip silindirik LCO ($LiCoO_2$) pil kullanılmıştır. Silindirik tipi pillerin çapı 18 mm ve uzunluğu 65 mm dir, Şekil 3.1'de kullanılan pillerden biri gösterilmiş ve Tablo 3.1'de kullanılan LCO tipi pilin özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Silindirik, 18650 LCO tipi pil

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan 18650, LCO tip pilin kapasite özellikleri

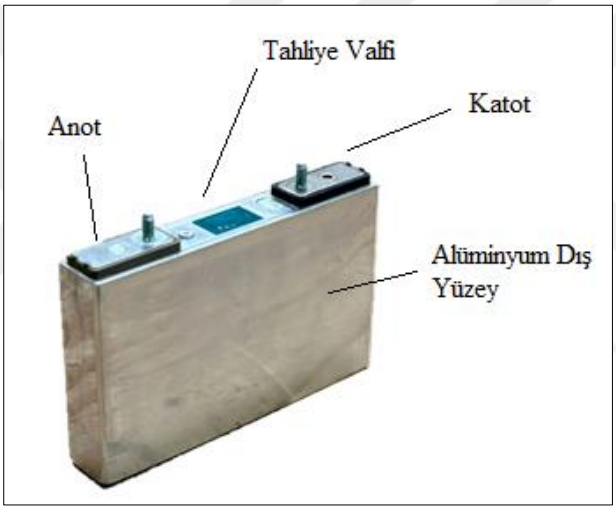
Parametre	Değer	Birim
Nominal Kapasite	2000	mAh
Şarj Gerilimi	4,2	V
Nominal Gerilim	3,7	V
Pil Ağırlığı	45	Gr
H	16	W/ (m^2K)
Cp	850	kJ/ (KgK)

3.1.1.2. Prizmatik NMC Tip Pil

7 adet prizmatik yapıda ve NMC 622 tipli EV (PHEV) taşıt bataryasına ait olan Şekil 3.2'de gösterilen pil hücresi kullanılmıştır. Pil hücresinin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. PHEV araca ait batarya modülü

Üretici	**Panasonic**
Kapasite	25 Ah
Nominal Akım Değeri	3,7 Volt
Hücre Tipi	Prizmatik hücre
Hücre Kimyası	NCM 622 ($LiNi_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}O_2$)



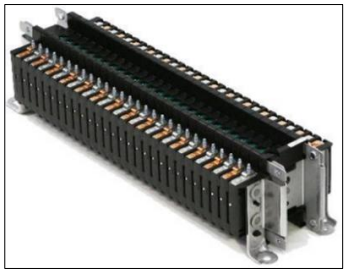
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan PHEV Pil

3.1.1.3. Prizmatik NMC Tip Batarya Modülü

3 adet prizmatik yapıda ve NMC 622 tipli EV (PHEV) taşıt bataryasına ait olan Şekil 3.3'de gösterilen modül kullanılmıştır. Modülün özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. PHEV araca ait batarya modülü

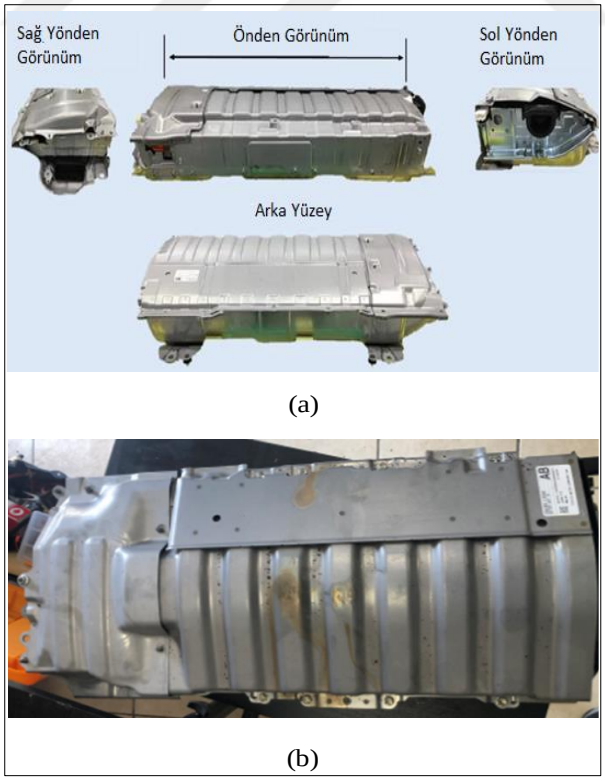
Üretici	**Panasonic**
Kapasite	51 Ah
Nominal Akım Değeri	3,7 Volt
Enerji Değeri	188,7 Wh
Hücre Tipi	Prizmatik hücre
Hücre Adedi	24 adet hücre
Hücre Kimyası	NCM 622 ($LiNi_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}O_2$)



Şekil 3.3. Deneyde kullanılan PHEV batarya modülü

3.1.1.4. Tam Ölçekli HV Tip EV Bataryası

Deneylerde 4 adet tam ölçekli EV bataryası kullanılmıştır. Şekil 3.4'de deneyde kullanılan tam ölçekli Li-ion taşıt bataryası verilmiştir. Üst kapağı metal, alt kapak ise döküm alüminyumdur. Alt kısımda havalandırma kanalları mevcuttur. Batarya HV araca sahip olması sebebiyle hava soğutma ünitesine sahiptir. Aracın bataryası, her biri 28 adet prizmatik hücreden oluşan 2 adet modülden meydana gelmiştir. 56 hücreden meydana gelen batarya; 56 x 51 Ah x 3,7 V = 10,5 kWh gücündedir. Batarya uzunluğu 989,5 mm, genişliği 393,6 mm ve yüksekliği 203,5 mm olup ağırlığı 32,7 kg dır. HV bataryanın özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.



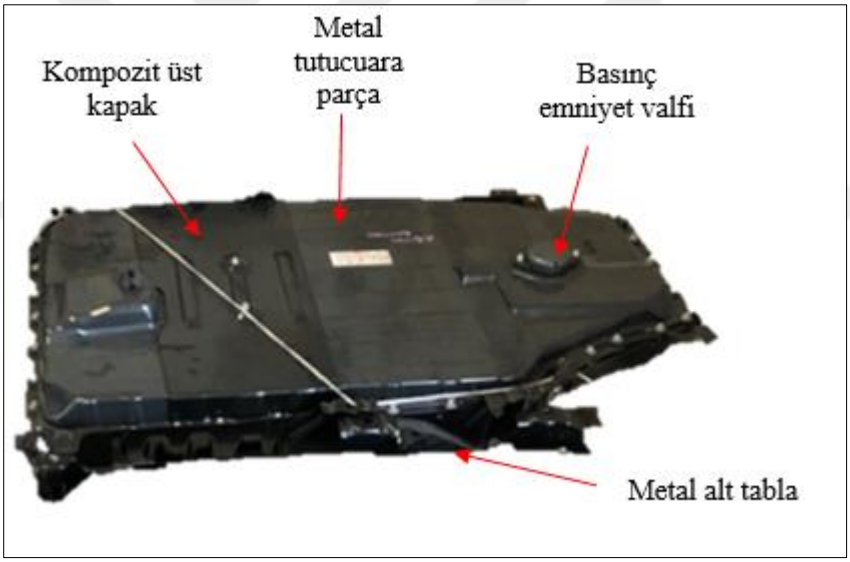
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan HV bataryanın dört yönden gösterimi

Tablo 3.4. Deneyde kullanılan HV bataryanın özellikleri

Üretici	**Panasonic**
Kapasite	51 Ah
Nominal Akım Değeri	3,7 Volt
Enerji Değeri	188,7 Wh
Hücre Tipi	Prizmatik hücre
Hücre Adedi	28 adet 2 sıra halinde, 56 adet hücre
Hücre Kimyası	NCM 622 ($LiNi_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}O_2$)

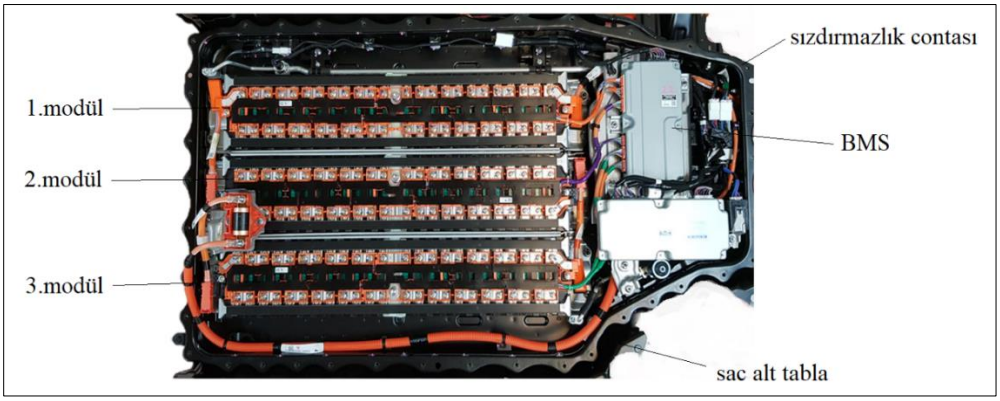
3.1.1.5. Tam Ölçekli PHEV Tip EV Bataryası

Deneylerde 2 adet tam ölçekli PHEV elektrikli taşıt bataryası kullanılmıştır. Şekil 3.5'de deneyde kullanılan tam ölçekli Lityum İyon taşıt bataryası verilmiştir. Üst kapağı kompozit, alt kapak ise metal sac malzemedir. Batarya hava geçirmezdir. Üretim esnasında sızdırmazlık sağlanmaktadır.



Şekil 3.5. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın gösterimi

Üst kapak kısmında bir aşırı basınç kapağı mevcuttur. Batarya PHEV araca sahip olması sebebiyle sıvı soğutma ünitesine sahiptir, Şekil 3.6'da bataryanın üst kapağı olmadan içi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın içi

Aracın bataryası, 24 hücrenin bir modülü oluşturduğu 3 modülden meydana gelmektedir. 72 hücre: 72 x 51 Ah x 3,7 V = 13,5 kWh gücündedir. Tablo 3.5'de kullanılan PHEV bataryanın özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.5. Deneyde kullanılan PHEV bataryanın özellikleri

Üretici	**Panasonic**
Kapasite	51 Ah
Nominal Akım Değeri	3,7 Volt
Enerji Değeri	188,7 Wh
Hücre Tipi	Prizmatik hücre
Hücre Adedi	24 adet 3 sıra halinde, 72 adet hücre
Hücre Kimyası	NCM 622 ($LiNi_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}O_2$)

Prizmatik hücre ölçüsü: uzunluk: 148 mm, yükseklik 91 mm, kalınlık 26,5 mm.

3.1.2. Termal Kaçağı Durdurmak İçin Kullanılan Kimyasallar

3.1.2.1. İnorganik Tabanlı Sıvı

İnorganik yapıdaki sıvı, MSDS'den sağlanan bilgiye göre içeriği Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Deneyde kullanılan söndürme maddesinin % içeriği

No	**Madde**	**CAS No**	**% Oranı**
1	Su	7732-18-5	98
2	Disodyum metasilikat	6834-92-0	1
3	Borik asit, disodyum tuzu	1330-43-4	1

3.1.2.2. Kuru Kimyevi Toz

Kuru kimyevi yapıdaki yangın söndürme maddesi, MSDS'lerinden sağlanan bilgiye göre içeriği Tablo 3.7'de, verilmiştir.

Tablo 3.7. Deneyde kullanılan söndürme maddesinin % içeriği

No	Madde	CAS No	% Oranı
1	Ammonium phosphate monobasic	7722-76-1	95

3.1.2.3. Karbondioksit Gazı (CO_2)

Gazlı söndürme maddesi için MSDS'lerinden sağlanan bilgiye göre içeriği Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Gazlı söndürme maddesi içeriği

No	Madde	CAS No	% Oranı
1	Karbondioksit	124-38-9	100

3.1.2.4. Köpük Maddesi

Köpüklü söndürme maddesi için MSDS'lerinden sağlanan bilgiye göre içeriği Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Köpük söndürme maddesi içeriği

No	Madde	CAS No	% Oranı
1	Su	124-38-9	100'e tamamlanması
2	Etan-1, 2 diol	107-21-1	1-5
3	Yüzey aktif maddesi	-	1-10
4	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	112-34-5	<10
5	Polysaccharide	-	1-2

3.1.2.5. Organik Tabanlı Madde

Organik tabanlı söndürücü (3 adet); MSDS verisine göre bileşiğin tanımına göre ''deterjanların, çok değerlikli bileşiklerin ve hetero-organik maddeler''şeklinde tanımlanmış olup pH değeri 7,5 yoğunluk değerindedir.

3.1.3. Modelleme Deneyinde Kullanılan Sarf Malzemeleri

3.1.3.1. MQ-4 Gaz Ölçüm Modülü

CH_4 ve türevi gaz kaçağı tespiti için uygundur. Bu sensör hızlı çalışmasının yanı sıra stabil sonuçlar verebilmektedir. Yüksek hassasiyetle doğal gaz ve metan gazı tespiti yapabilmektedir. Ayrıca, düşük hassasiyetle duman ve alkol ölçümü de gerçekleştirebilmektedir. Ölçüm aralığı 300 ppm'den 10000 ppm'e kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Hızlı cevap süresi ve Arduino gibi geliştirme kartları ile uyumlu çalışması, bu sensörün önemli teknik özelliklerindendir. Sensör Şekil 3.7 (a)'da gösterilmiştir.

3.1.3.2. MQ-7 Gaz Ölçüm Modülü

MQ-7 gaz sensörü, karbonmonoksit (CO) tespiti için kullanılan bir sensördür. Bu sensör, 10-10,000 ppm aralığında ölçüm yapabilen bu sensör, yüksek hassasiyetle karbonmonoksit tespiti yapabilmektedir. Hızlı cevap süresi ve uzun çalışma ömrü, bu sensörün önemli teknik özelliklerindendir. MQ-7 gaz sensörünün olumlu özellikleri arasında yüksek hassasiyet, geniş ölçüm aralığı, uzun ömür ve kararlılık bulunmaktadır. Gaz tespitinde hızlı bir şekilde tepki vermesi, bu sensörün güvenilirliğini artırmaktadır. Sensör Şekil 3.7 (b)'de gösterilmiştir.

3.1.3.3. MQ-9 Gaz Ölçüm Modülü

MQ-9 gaz sensörü, karbonmonoksit (CO) ve yanıcı gazların tespiti için kullanılan bir sensördür. 10-10,000 ppm aralığında ölçüm yapabilen bu sensör, yüksek hassasiyetle karbonmonoksit ve yanıcı gazların tespitini yapabilir. Hızlı cevap süresi ve uzun çalışma ömrü, bu sensörün önemli teknik özelliklerindendir. MQ-9 gaz sensörünün olumlu özellikleri arasında yüksek hassasiyet, geniş ölçüm aralığı, uzun ömür ve kararlılık bulunur. Sensör Şekil 3.7 (c)'de gösterilmiştir.

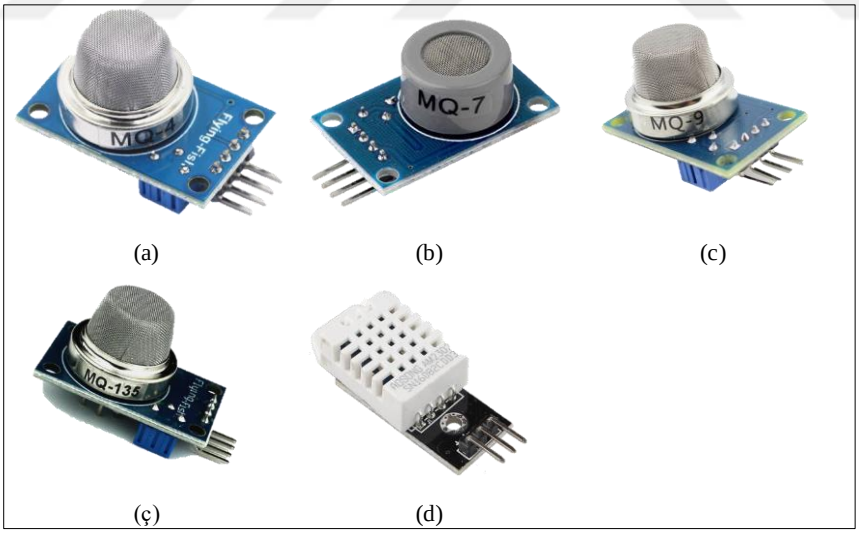
3.1.3.4. MQ-135 Hava Kalitesi Algılama

Kapalı hacimlerde NH_3 (amonyak), NOx (azot oksit türevleri), alkol, benzen C_6H_6, duman, CO_2, CO vb. algılama için uygundur. Yüksek hassasiyetlidir, hızlı cevap verir ve stabil sonuçlar üretir. Ölçüm aralığı 10 ppm-1000 ppm'dir. Doğru ölçüm için sıcaklık ve

nem etkisi göz önünde bulundurulması gerekir. Yüksek hassasiyetle sülfür, benzen, su buharı, duman ve diğer zararlı gazların (NH_3, NOx, CO_2 vb.) konsantrasyonunu ölçebilir. Uzun çalışma ömrü ve kararlılığı, bu sensörün önemli teknik özelliklerindendir. Ayrıca, hızlı cevap süresi ve Arduino gibi geliştirme kartları ile uyumlu çalışması, bu sensörün kullanımını kolaylaştırır. Sensör Şekil 3.7 (ç)'de gösterilmiştir.

3.1.3.5. DHT22 Nem ve Sıcaklık Algılama

Farklı ortamlarda nem ve sıcaklık değerlerinin ölçülmesini sağlar. -40 ℃ ile 80 ℃ arasında sıcaklık ölçümü yapabilir ve bu ölçümler 0,1℃ çözünürlükle gerçekleştirilir. Nem ölçüm aralığı ise % 0 ile % 100 aralığında bağıl nem (RH) olup, ± % 2 hassasiyetle ölçüm yapabilir. Sensörün okuma hızı 2 saniyedir, bu nedenle veriler 2 saniye geriden gelir. DHT22 sensörünün olumlu özellikleri arasında yüksek hassasiyet, geniş ölçüm aralığı, uzun ömür ve kararlılık bulunur. İçerisinde 8 bit mikroişlemci bulunur ve bu sayede yüksek ölçüm doğruluğuna sahiptir. Bu sensör, özellikle hava kalitesi izleme sistemleri, endüstriyel uygulamalar ve ev otomasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sensör Şekil 3.7 (d)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kullanılan sensörler (a) MQ-4 Metan sensörü, (b) MQ-7 Karbonmonoksit sensörü, (c) MQ-9 Karbonmonoksit ve yanıcı gazlar sensörü,

3.1.3.6. Raspberry Pi

Raspberry Pi, yüksek erişilebilirlik ve esneklik özellikleriyle öne çıkan, kompakt ve ekonomik bir bilgisayar kartıdır. İlk olarak 2012 yılında piyasaya sürülen bu kart, küçük

boyutu ve düşük maliyeti ile dikkat çeker (Ossont ve Cox, 2017). Arduino mikrodenetleyici platformlarına benzer şekilde, geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Ancak, Raspberry Pi'nin entegre internet iletişim modülü ve daha yüksek RAM kapasitesi gibi önemli farklılıkları vardır, bu da onu daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir kılar. Görüntü yakalama ve işleme gibi işlemci yoğun görevler için mükemmel bir kapasite sunar ve Raspbian adı verilen, özel olarak optimize edilmiş Linux tabanlı bir işletim sistemini çalıştırır (Vujović ve Maksimović, 2014). Raspberry Pi, Python, C/C++, Java ve JavaScript gibi çeşitli programlama dillerini destekler, bu da geliştiricilere geniş bir esneklik ve uygulama geliştirme özgürlüğü sunar (Wallace ve diğ., 2021).

Bu özellikler, Raspberry Pi'yi araştırmacılar için projelerinde ideal bir seçim haline getirir. Ayrıca, açık kaynaklı yazılım ve donanım topluluğundan geniş destek alması, kullanıcıların kaynaklara kolay erişimini ve projeler üzerinde ortak çalışmayı teşvik eder, böylece yenilikçi uygulamaların ve çözümlerin geliştirilmesine katkıda bulunur. Raspberry Pi'nin birçok farklı modeli bulunmaktadır. En yaygın kullanılan modeller arasında Raspberry Pi 5, Raspberry Pi 4, Raspberry Pi 3 ve Raspberry Pi Pico yer alır (McManus, S., ve Cook, M., 2021).

Raspberry Pi 4 tabanlı bir algılama sisteminde, sinyal ve görüntü işleme için sıcaklık, nem ve diğer sensörlerden alınan veriler işlenir, kızılötesi kamera ile görüntüler elde edilir. Raspberry Pi 4, bu sistemde merkezi bir işlem birimi olarak kullanılır. Gelen verileri ve görüntüleri toplayarak işleme görevini üstlenir. Verileri ve görüntüleri hem kaydeder hem de bu bilgileri ağ üzerinden uzaktan erişim gibi bulut tabanlı hizmetlere (thingspeak.com, Google Drive) gönderir.

3.1.3.7. Termal (IR) Kamera

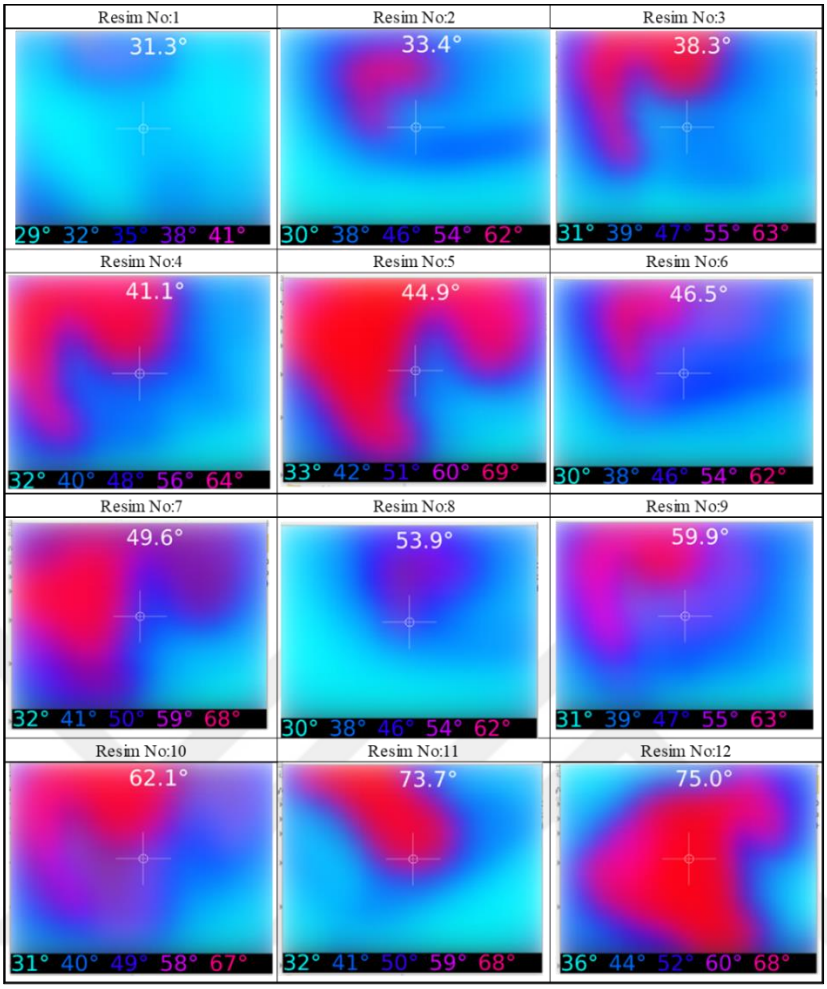
Melexis tarafından geliştirilen MLX90640 IR Termal Görüntüleme Kamerası, orta çözünürlüklü bir kızılötesi (IR) termal kamera sensörüdür. Bu sensör, 32x24 piksel çözünürlüğe sahip bir termal görüntüleme matrisinden oluşur ve -40 °C ile +300 °C arasındaki yüzey sıcaklıklarını hassas bir şekilde ölçebilir ve ölçüm doğruluğu ± 1°C'dir. Bu, kullanıcılara küçük sıcaklık farklılıklarını bile tespit edebilme yeteneği sunar, bu da

özellikle erken aşama arıza tespiti ve enerji kaybı analizleri için çok değerlidir. Geniş bir görüş açısına sahiptir, bu da kullanıcıların geniş alanları kolayca taramasına ve termal farklılıkları net bir şekilde görmesine olanak tanır. Küçük boyutu ve I2C haberleşme protokolü ile kolay entegrasyon imkânı sunması nedeniyle, çeşitli uygulamalar için idealdir. Bu uygulamalar arasında enerji verimliliği denetimleri, elektrik panolarında sıcak nokta tespiti, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin izlenmesi, vücut sıcaklığı ölçümü ve çevresel izleme yer alır.

Sensör, aynı zamanda taşınabilir ve sabit termal görüntüleme çözümleri için de tercih edilen bir bileşendir. Raspberry Pi 4 ilk çalıştırıldığında, sistem, DHT22 sıcaklık ve nem sensörünün uygun çalışma sıcaklığına ulaşmasını sağlamak için 15 saniye bekler. Bu ön ısınma süresi, sensörün doğru ve tutarlı ölçümler yapabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu ön ısınma süresi, sensörün doğru ve tutarlı ölçümler yapabilmesi için kritik bir rol oynar. Aynı zamanda, kızılötesi termal kamera da bu süre içinde aktif hale gelir, bu da sistemin termal görüntüleme yeteneklerini devreye sokar. Bu başlangıç aşamasının ardından, sistem ethernet kartı aracılığıyla kablolu internet bağlantısını kurma sürecini başlatır.

Bağlantı başarıyla kurulduktan sonra, sistem, thingspeak.com üzerinde önceden oluşturulmuş ve private channel ID 1685195 ile tanımlanmış bir bulut kanalıyla iletişime geçmek üzere programlanmıştır. İletişim sağlandıktan sonra, DHT22 sensörü tarafından ölçülen sıcaklık ve nem değerleri ile kızılötesi termal kameranın ölçtüğü pil hücresi odak sıcaklık değerleri her 4 saniyede bir kaydedilmeye başlanır. Raspberry Pi 4, Arduino Mega'ya kıyasla benzersiz bir avantaj sunar; kızılötesi termal kameranın elde ettiği görüntüleri hem yerel hafızada saklayabilir hem de Google Drive ile entegre çalışarak bu görüntüleri belirli aralıklarla otomatik olarak Google Drive hesabına yedekleyebilir. Bu özellik, veri kaybı riskini en aza indirirken, aynı zamanda uzaktan erişim ve analiz imkânı sağlar.

Güvenilirlik ve erişilebilirlik açısından Raspberry Pi 4'ün sunduğu görüntüler oldukça değerlidir. Modelleme için yapılan deneyler esnasında termal kameranın aldığı görüntülere örnek Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Termal kamera ile deney esnasında çekilen görüntü örnekleri

3.1.3.8. Arduino

Arduino, donanım ve açık kaynak kodlu yazılım geliştiren bir firmadır (McRoberts, 2013). Bu firma, kullanıcıların basitleştirilmiş C veya C++ programlama dilleri ile kod yazmalarına imkan tanıyan mikrodenetleyici kartları üretir ve bu kartlar sayesinde kullanıcılar prototip platformlar oluşturabilirler (Badamasi, 2014). Basitleştirilmiş mikrodenetleyici kartlara çeşitli modüller eklenerek prototip platformlar geliştirilebilir (Kondaveeti ve diğ., 2021). Arduino modülleri, genellikle ATMega328, ATMega1280 ve ATMega2560 çiplerini kullanır (Boloor, 2015). Bu çipleri kullanan mikrodenetleyicilere firma farklı isimler vermiştir; bunlar Uno, Nano, Mega, Leonardo ve Due olarak adlandırılmıştır. Arduino mikrodenetleyici çeşitleri Tablo 3.10'da verilmiştir (Purdum, 2012).

Tablo 3.10. Ardunio çeşitleri

					
Özellik	Arduino Uno R3	Arduino Nano	Arduino Mega 2560 R3	Arduino Leonardo	Arduino Due
İşlemci	ATmega328P	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	ATSAM3X8E
Saat Hızı	16 MHz	16 MHz	16 MHz	16 MHz	84 MHz
Flash Bellek	32 KB	32 KB	256 KB	32 KB	512 KB
RAM	2 KB	2 KB	8 KB	2.5 KB	96 KB
Dijital I/O Pin	14 (6 PWM çıkışlı)	22 (6 PWM çıkışlı)	54 (15 PWM çıkışlı)	20 (7 PWM çıkışlı)	54 (12 PWM çıkışlı)
Analog Giriş Pin	6	8	16	12	12
UART	1	1	4	1	4
SPI	Var	Var	Var	Var	Var
I2C	Var	Var	Var	Var	Var

Tablo 3.10'da verilen karşılaştırma, her modelin mikrodenetleyici tipi, flash hafıza kapasitesi, SRAM (Statik Rastgele Erişim Belleği), EEPROM (Elektrikle Silinebilir Programlanabilir Okunur Bellek) ve saat hızı gibi temel teknik özelliklerini içermektedir. Bu teknik özellikler, her bir Arduino modelinin belirli uygulama gereksinimlerine göre seçilmesine olanak tanır, böylece araştırmacılar projelerinin ihtiyaçlarına en uygun donanımı seçebilirler.

3.1.3.9. Termal Kamera

Termal kaçak deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan termal kamera özellikleri Tablo 3.11'de gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Testo 868 termal kameranın özellikleri

Görüş alanı	**31° x 23°**
Odak	sabit odaklı
Min. odak mesafesi	<0,5 m
Görüntü yenileme oranı	9 Hz
İnfrared çözünürlük	160 x 120 piksel
SuperResolution (Piksel)	320 x 240 piksel
Termal duyarlılık	<0,08 °C (80 mK)
Spektral aralık	7,5 … 14 µm

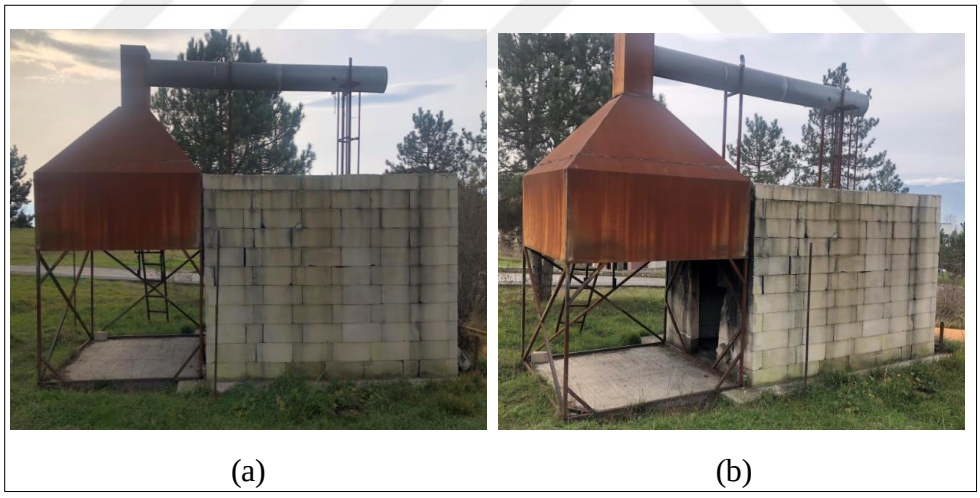
3.1.4. Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeleri

(1) Pil hücrelerinin termal kaçak mekanizmasını başlatmak amacıyla sarı çam odunu,
(2) Pil hücreleri arasını ayırmak için karton seperatörler,
(3) Her bir deneyde kullanılan 2 lt benzin ve mazot karışımı (% 50 benzin, % 50 mazot),
(4) Yangın tavası ve batarya bloğun üzerine yerleştirilmesine yarayan demir sehpa, pil bloklarının altına kullanılan alüminyum sac,
(5) Bataryanın yüksek akım kablosu,

3.2. Deney Düzenekleri

3.2.1. HV Batarya Termal Kaçak Deneyi Düzeneği

Testin yapıldığı oda, Avrupa test sınıflandırmalarına uygun TS EN 13823+A1 standardına uygun olarak yapılan bir test odasında gerçekleştirilmiştir. Test odasının yan duvarları ve tavan yapısı, yangın sınıflandırması standardına uyarınca A1 yanmaz olarak sınıflandırılan malzemeden yapılmıştır. Test odası Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.9. Test odasının yandan ve perspektiften görünümü

3.2.2. Termal Kaçak Gecikme ve Tekrar Başlatılması Den Düzeneği

Batarya kapalı deney fırını içinde demir sehpanın üzerine konulmuş, altına yangın tavası konularak deney için konumlandırma sağlanmıştır. Tava içerisine 1 lt (%50 mazot ve %50 benzin karışımı) hızlandırıcı konularak deney hazırlıkları tamamlanmıştır. Şekil 3.10'da deney düzeneği yan ve detay görüntüsü verilmiştir.

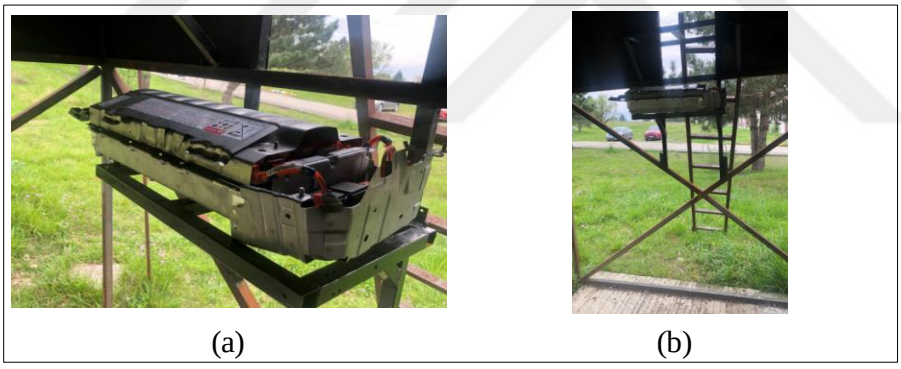


(a) (b)

Şekil 3.10. Deney düzeneği yandan ve detay görünümü

3.2.3. HV Batarya Düşürme Deney Düzeneği

1,5 m ve 2 m yüksekliği olan serbest düşme platformu çelik profilden imal edilmiştir. Platform Şekil 3.11'de verilmiştir. Platform, TS EN 13823+A1 standardı gözetilerek hazırlanmış, üç tarafı ve tavanı TS EN 13501 standardı gereği A1 sınıfı yangın dayanımı olan bir kapalı alanın içinde olması sağlanarak dış hava koşullarının etkisi ihmal edilecek boyuta indirgenmiştir.



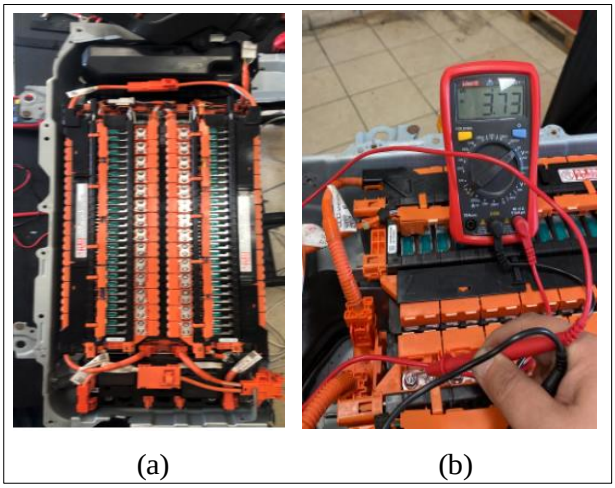
(a) (b)

Şekil 3.11. Deneyde kullanılmak üzere tasarlanmış serbest düşme platformu (a) 1,5 m platformu (b) 2 m platformu

3.3. Deneylerin Hazırlık Aşaması

3.3.1. Batarya Kapasite Ölçümü

Şekil 3.12 (a)'da gösterildiği üzere batarya üst kapak açılarak modüllerin izolasyonlu koruma kapağına ulaşılmış, plastik izolasyon kapağı da kaldırılarak gerilim değerleri ölçülerek not edilmiştir. Şekil 3.12 (b)'de yapılan kapasite ölçümü gösterilmiştir.



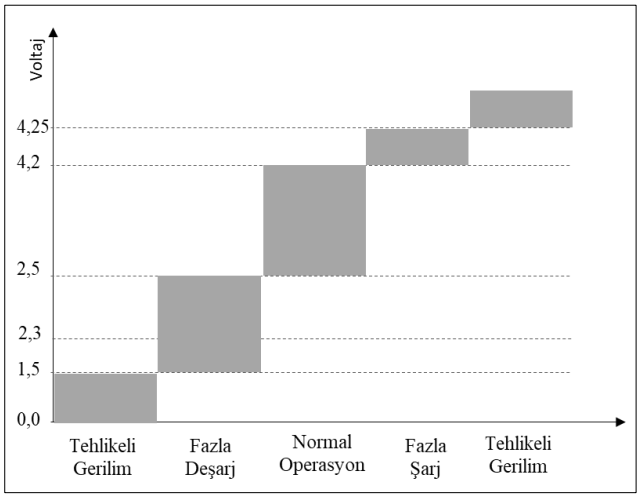
(a) (b)

Şekil 3.12. Deney öncesi batarya kapasite ölçümü

Piller deney öncesi kapasiteleri voltmetre aracılığı ile ölçülmüştür. Pillerin En fazla şarj geriliminin 4,2 volt, nominal çalışma gerilimlerinin 3,7 volt ve alt gerilim sınırının da 2,5 volt olduğu göz önüne alınarak deneylerin öncesi SOC değerleri bulunmuştur. Pil kimyasalına göre gerilim – kapasite değeri Tablo 3.12 ve Şekil 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Pil türlerine göre gerilim sınırları ile SOC değerleri

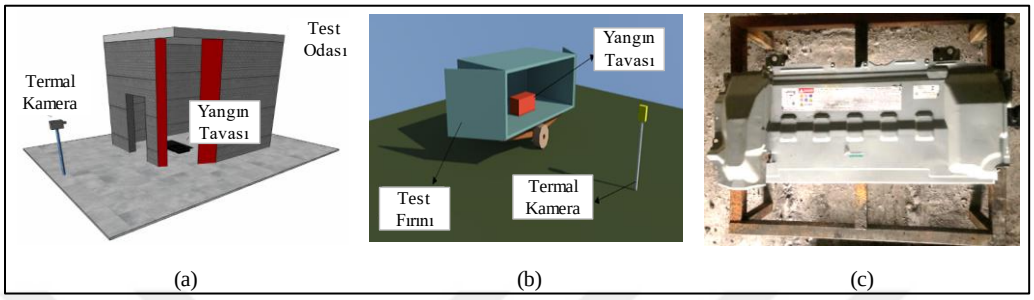
Pil Kimyasalı	Üst Gerilim (V)	Alt Gerilim (V)	% 90 SOC	% 10 SOC
LMO	4,2	2,5	3,78	2,75
LCO	4,2	2,5	3,78	2,75
NCA	4,2	3,0	3,78	3,3
NMC	4,2	2,5	3,78	2,75
LFP	3,65	2,5	3,285	2,75
LTO	2,85	1,8	2,565	1,98



Şekil 3.13. Pil gerilim sınırları ve tehlike durumu

3.3.2. 3.3.2. Termal Kamera Konumlandırılması

Kullanılan temel iki farklı deney düzeneği, ve termal kameranın deney düzeneğinde konumlandırılması Şekil 3.14'(a) ve (b)'de gösterilmiştir. EV bataryanın düzenek içinde metal tava üzerinde konumlandırılması Şekil 3.14'(c)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Termal kameranın deney düzeneklerinde yerleşimi

3.4. Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Deneylerin gerçekleştirilmesini iki aşamada verilmiştir. İlk aşama termal kaçak mekanizmasının oluşumunun ve aşamalarının incelenmesi. Termal kaçak reaksiyonlarını yavaşlatarak durdurabilecek kimyasal maddelerin ve etkilerinin gözlemlenmesi.

Bu deneyler sırasıyla;

Deney no 1: Karışık sıralı 18650 boyutlu LCO pillerin yanma davranışı ve termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı,

Deney no 2: Tüm hücrelerin dik sıralı olduğu 18650 boyutlu LCO pillerin yanma davranışı ve termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı,

Deney no 3: Gerçek boyutlu batarya modüllerinin yanma davranışı ve inorganik tabanlı sıvı madde ile termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı,

Deney no 4: İnorganik tabanlı söndürme sıvısı ile söndürülmüş gerçek boyutlu batarya modüllerinin tekrar yanma davranışı ve inorganik tabanlı söndürme sıvısı ile söndürme deneyi,

Deney no 5: Gerçek boyutlu batarya modüllerinin yanma davranışı ve kuru kimyevi toz, CO_2 ve köpük ile termal kaçak mekanizmasının bastırılması deneyi,

Deney no 6: HV bataryanın yüksekten düşürülmesi ile termal kaçak oluşum deneyi sonuçları,

Deney no 7: HV bataryanın yanma karakteristiği ve organik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma performansı sonuçları,

Deney no 8: HV bataryanın yanma karakteristiği ve inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyi,

Deney no 9: HV bataryanın termal kaçak mekanizmasının başında inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyi

Deney no 10: İnorganik tabanlı söndürücü uygulanmış HEV bataryanın tekrar tutuşma davranışı ve inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyi,

Deney no 11: PHEV bataryanın iç kısa devre nedeniyle tutuşma davranışı

Deney no 12: PHEV bataryanın yanma karakteristiği, termal kaçak reaksiyonlarının inorganik tabanlı maddesi ile durdurulması deneyi.

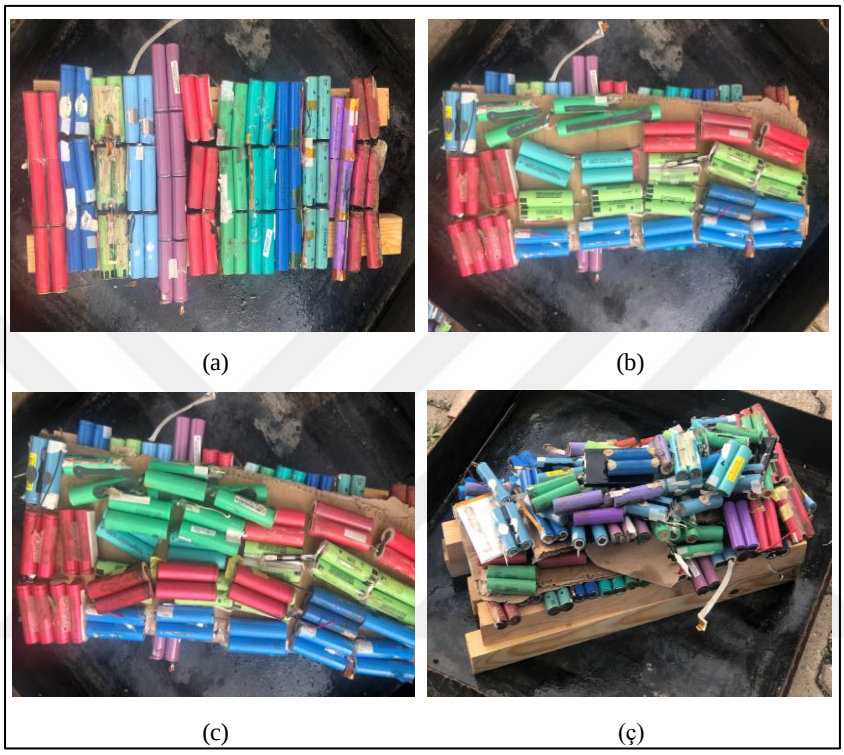
İkinci aşama ise makine öğrenmesi modelinin kurulması için verilerin elde edilmesidir. Bu amaçla tam boyutlu EV taşıt pil hücrelerinin mekanik darbe ile delinmesi, termal kaçak mekanizmasının başlatılması ve bu esnada salınan gazın, gaz dedektörleri vasıtasıyla analiz edilmesidir.

3.4.1. Termal Kaçak Aşamaları ve Durdurulması Deneyleri

3.4.1.1. Deney No: 1;

Karışık sıralı 18650 boyutlu LCO pillerin yanma davranışı ve termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı deneyinde, sıralamanın termal kaçak mekanizması oluşumuna etkisi, termal kaçak mekanizması ilk oluşmasından sonraki davranışlar ve inorganik sıvı maddenin termal kaçak mekanizmasını durdurma etkisi incelenmiştir.

Termal kaçak mekanizmasının başlaması için termal yönden tetiklemek amacıyla yangın tavası içerisine alt tarafında 3 adet sarıçam odunu gelecek şekilde, hazırlık yapılmıştır. Tavanın içerisine hızlandırıcı sıvı döküldüğünde direkt temas önlenmiştir. İlk kata 73 adet 18650 pil hücresi Şekil 3.15 (a)'da görüldüğü gibi tek doğrultuda birbirine temas edecek şekilde dizilmiştir.

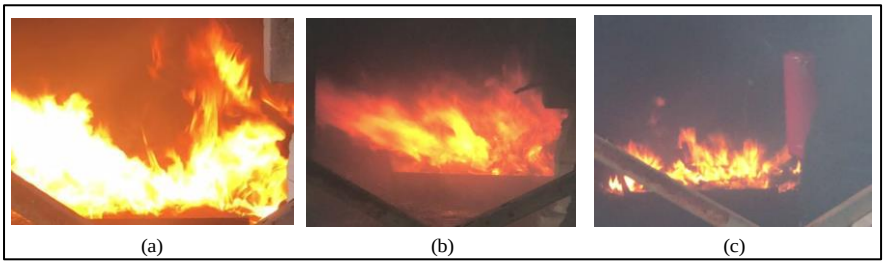


Şekil 3.15. Karışık sıralı dört kat 18650 pilin tava içine yerleştirilmesi

İkinci kata Şekil 3.15 (b)'de gösterildiği üzere ilk önce karton seperatör ardından 50 adet 18650 pil hücresi, bir alt katta yerleştirilen hücrelere dik doğrultuda dizilmiştir. Üçüncü kat olarak Şekil 3.15 (c)'de gösterildiği üzere araya karton separatör konulmadan 12 adet 18650 pil hücresi dizilmiştir. Dördüncü kat olarak Şekil 3.15 (ç)'de gösterildiği üzere araya bu kez yerleşim kolaylığı açısından karton separatör konularak 54 adet 18650 pil hücresi dağınık bir dizilimle konumlandırılmıştır.

Deney hızlandırıcının tutuşturulmasıyla başlatılmıştır, çamın tutuşması gözlemlenmiş, 62. s'de pillerin üzerindeki emniyet ventillerinin açılma sesleri duyulmuştur. Gaz emniyet ventillerinin açılmasıyla birlikte beyaz renkli gaz çıkışı başladığına gözlemlenmiştir. Yanma eyleminin devam ettiği süre içinde 20 adet ventil açma sesi duyulmuştur. 93. s'de

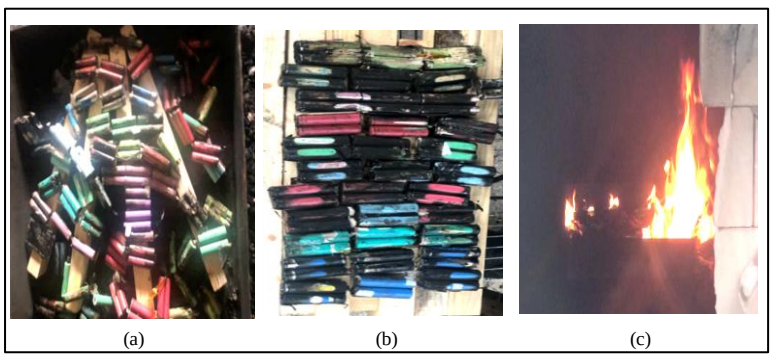
termal kaçak mekanizması gözlemlenmiştir, Şekil 3.16 (a) ve (b)'de termal kaçak mekanizması başlangıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Termal kaçak başlangıcı

Termal kaçak mekanizmasının başlaması sonrası ard arda çeşitli yönlerde termal kaçak mekanizmasının devam ettiği gözlemlenmiştir. 128. s'de söndürme eylemine geçilmiştir. Portatif inorganik bazlı sıvı madde kullanılarak termal kaçak mekanizmasının bastırılması fasılalı olarak 50 s sürmüştür. İlk tüp bitirilmiş, ardından ikinci tüp ile müdahale edilmiştir. İki fasıla arasında 60 s zaman geçmiştir. Şekil 3.16 (c)'de termal kaçak mekanizması zincir reaksiyonun kırıldığı gösterilmiştir.

Termal kaçak mekanizması ile birlikte tek yöne doğru başlayan alev hüzmesi tek doğrultuda devam etmemiş bir süre sonra diğer yönlerde de termal kaçak mekanizması geliştiği gözlemlenmiştir. Pil hücrelerinin sıralanma şekli termal kaçak mekanizmasının pilden pile geçiş yönünü ve termal kaçak mekanizmasının yayılım yönünü etkilediği gözlemlenmiştir. Pillerin ilk önce üst kısımlarında yer alan emniyet ventillerinin patladığı, bunun ardından basınçlı gazın çıkışı işitilmiş ve alev oluşumu gözlemlenmiştir. Termal kaçak mekanizmasına müdahale eylemi sonrası Şekil 3.17 (a) ve (b)'de gösterilen durum değerlendirildiğinde, bazı pillerde yanma, şekil bozukluğu ve şişme gözlenmemiştir.



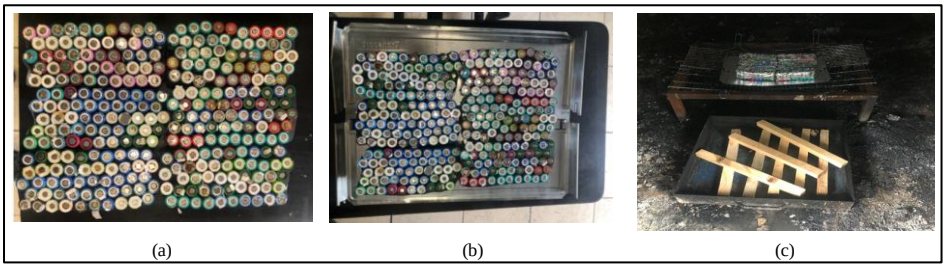
Şekil 3.17. Termal kaçak mekanizmasına müdahale öncesi ve sonrası

Pillerden çıkan beyaz duman, alev ile birlikte termal kaçak meydana gelmesinden sonra 35. s'de müdahale eylemi başlatılmış olması tüm pillerin termal kaçak durumuna girmesi için yeterli zaman bırakılmadığı ve piller arasında termal kaçak yayılımın ısı kaynağı olan hızlandırıcıya ve sarıçam odunlarına yakın olan ilk kattan başlayarak devam ettiği saptanmıştır. Şekil 3.17 (b)'de bu durum gösterilmiştir. Kullanılan inorganik sıvı madde termal kaçak mekanizmasını sonlandırma işlevini başarmıştır. Müdahale eylemini gerçekleştiren kişi solunum maskesi ve termal korumalı kıyafeti olmadığından müdahale fasılalı ve uzaktan yapılmıştır. Bu durum müdahale performanısını etkilemektedir. İki müdahale fasılası arasında 60 s zaman geçmiştir. Müdahale eylemleri arasında alev boyunun ve termal kaçağın şiddetini arttırmadığı gözlemlenmiştir, Şekil 3.17 (c)'de müdahale fasılaları arasında yanma durumu gösterilmiştir. Silindirik hücreli 18650 pillerin dizilim yönü termal kaçak oluşumunda alevin hüzmesinin yönünde belirleyici olmaktadır. Dizilim aynı zamanda termal kaçak mekanizmasının yayılım yönünü etkilemektedir. Isı kaynağına yakın olan bölgeden başlayarak pillerde termal kaçak oluşumu başlamakta ve sırayla devam etmektedir. Kullanılan inorganik tabanlı sıvı, termal kaçak başladığında zincir reaksiyonubu kırmayı başarmıştır. Müdahaleye ara verildiğinde yangının devam ettiği görülmüştür. Müdahale fasılaları arasında geçen süre boyunca alev boyunda bir değişiklik meydana gelmemiştir. Solunum maskesi ve termal yalıtkan koruyucu kıyafet olmadan yapılan müdahaleler kısıtlı olmaktadır. Termal kaçak mekanizmasının zincir reaksiyonu kırılması ancak kullanılan inorganik sıvının ara verilmeden kullanılması ile başarılı olmaktadır.

3.4.1.2. Deney No: 2:

Deney no 2: Tüm hücrelerin dik sıralı olduğu 18650 boyutlu LCO pillerin yanma davranışı ve termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı deneyinde; pil hücrelerinin EV bataryada kullanıldığı dik sıralama ile oluşturulan modüller bir araya getirildiği durumda, termal kaçak mekanizması oluşumu ve gelişimini gözlemlemek, termal kaçak mekanizması reaksiyonun kırılması faaliyetinde inorganik tabanlı sıvısının etkinliğinin gözlemlenmesi deneylenmiştir. Bu amaçla 300 adet 18650 tip silindirik LCO ($LiCoO_2$) pil kullanılmıştır. Yangın tavası içerisine alt tarafında 3 adet sarıçam odunu gelecek şekilde, hazırlık yapılmıştır. Tavanın içerisine hızlandırıcı sıvı döküldüğünde direkt temas önlenmiştir. Bataryalar 50 adet olacak şekilde emniyet ventilleri yukarıya

bakacak şekilde dik konumlandırılmış ve birbirine bant vasıtasıyla tutturulmuşlardır. Bu şekilde 6 adet blok bir araya getirilmiştir. Şekil 3.18 (a)'da gözüktüğü şekilde dizilmiştir.

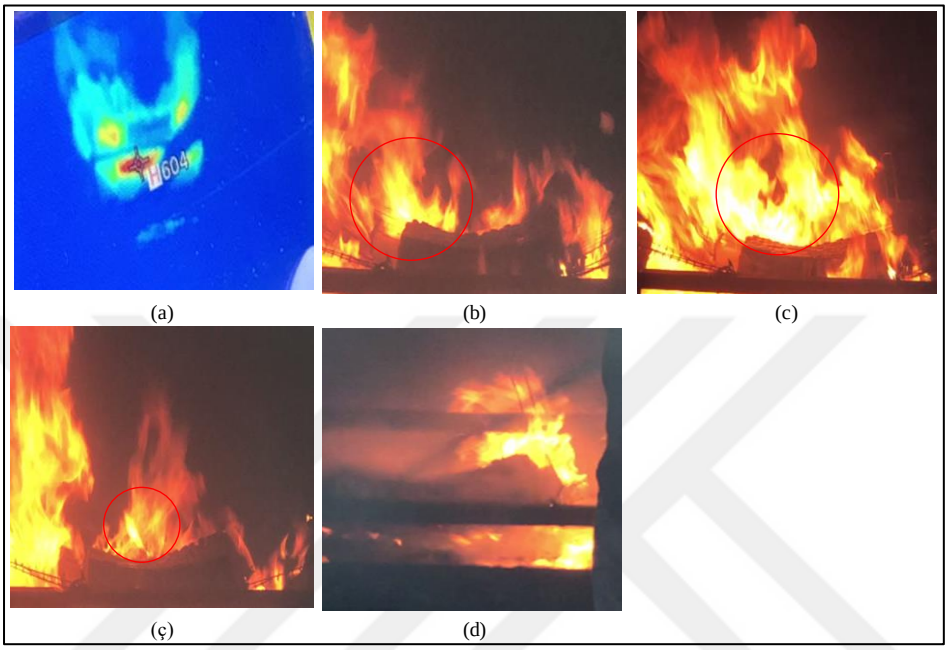


Şekil 3.18. Pillerin dizilimleri

Dizilimin altına konulan alüminyum sac ile taşıt bataryasının alt tabanı simüle edilmiştir. Bu sacın yanma başladığında ısının etkisini komşu bataryalara dağıtacağı düşünülmektedir. Bu durum Şekil 3.18 (b)'de gösterilmiştir. Deney düzeneği kapalı alana taşınarak tel ızgara üzerine oturtulmuş, yangın tavasının içine toplam 8 adet sarıçam odunu konulmuş, tavanın içine ise 1 lt hızlandırıcı (% 50 benzin, % 50 mazot) dökülmüştür, deney düzeneği Şekil 3.18 (c)'de gösterilmiştir.

Deney hızlandırıcının tutuşturulması ile başlamış, söndürülene kadarki süreç video kaydı alınarak aşamaları kayıt edilmiştir. Deney düzeneği tutuşturulmuş ve 41. s'de piller üzerinden yapılan sıcaklık ölçümlerinde en fazla 508 ℃ sıcaklık gözlemlenmiştir. Sıcaklık değeri 61. s'de yapılan ölçümlerde tavada en fazla 565 ℃ olarak ölçüldüğünde pillerin üzerine gelen en fazla sıcaklık değeri 97 ℃ olarak ölçülmüştür. 71. s'de ise sıcaklık değerinin 604 ℃'ye çıktığı gözlemlenmiştir, bu durum Şekil 3.19 (a)'da gösterilmiştir. 137. s'de pillerin gaz ventillerinden gelen basınçlı gaz çıkışı sesi duyulmuştur, bununla beraber pil bloğunun sıcaklığı 392 ℃ olarak ölçülmüştür. 151. s'de pil bloğunun 528 ℃'ye ulaştığı ölçülmüştür. 163. s'de termal kaçak mekanizması başlamıştır, bu durum Şekil 3.19 (b)'de gösterilmiştir. 172. s'de termal kaçak mekanizması şiddetini arttırarak devam etmiştir. Termal kaçak mekanizmasının başladığı noktadan yayılarak sürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil 3.19 (b)'de bu durum gösterilmiştir. Pil bloğunun sıcaklığı 188. s'de 666 ℃'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Termal kaçak mekanizmasının devam ettiği süre boyunca sıcaklığın da arttığı gözlemlenmiştir. 200. s'de termal kaçak mekanizması, etkilenmeyen diğer pil hücrelerinde de patlama meydana getirmiştir. 6 adet seri patlama sesi kaydedilmiştir. Şekil 3.19 (b), (c), (ç)'de patlayan pillerden çıkan alev hüzmesi kırmızı daire içinde gösterilmiştir. 362. s'de pil bloğunun

sıcaklığı 800 ℃ olarak ölçülmüştür. 403. s'de 8 adet aralıklarla ventil açma sesi duyulmuştur ve termal kaçak mekanizmasının durdurulması denemesine geçilmiştir. Termal kaçak mekanizması durdurma eylemi 9 s sürmüştür. Şekil 3.19 (d)'de termal kaçak zincir reaksiyonu durdurulması gösterilmiştir.



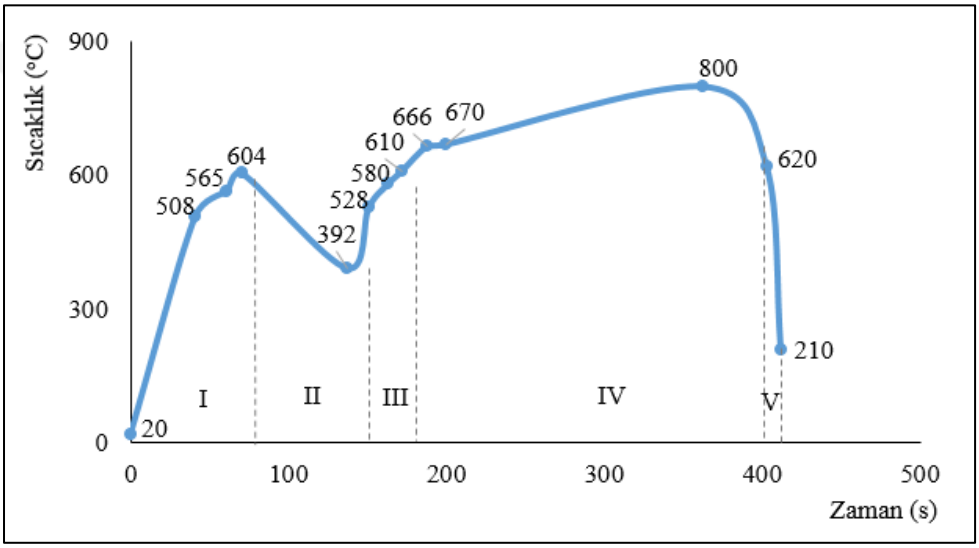
Şekil 3.19. Gözlemlenen termal kaçak gelişimi

Tek doğrultuda sıralanan pillerde, artan sıcaklığın etkisi ile termal kaçak mekanizması gözlemlenmiş gaz ventillerinin açmasıyla alev hüzmesi pil doğrultusunda gaz ventillerinin olduğu taraftan gelişmiştir. Bir önceki deney sırasında (farklı doğrultuda karışık yerleşimli pil grupları) ısıtıldığında, 93 s'de oluşan termal kaçak mekanizması, sıralı ve aynı düzlemde yerleştirilen pillerin olduğu deneyde 163 s'de oluştuğu gözlemlenmiştir. Sıralamanın termal kaçak mekanizmasının başlaması ile ilişkili olduğu ve pil dizilimin pillerin birbirini ısıtma (propagasyon) etkisinden kaynaklandığı yorumlanmıştır. Benzer durum termal kaçak mekanizmasının bastırılması eyleminde de gözükmüştür. Bir numaralı deneyde (farklı doğrultuda karışık yerleşimli pil grupları) 50 s süren müdahale eylemi, sıralı ve aynı düzlemde yerleştirilen pillerin olduğu bu deneyde inorganik söndürme maddesi ile 9 s sürmüştür. Tablo 3.13'de karışık dik sıralı ve dik sıralı pillerin termal kaçak mekanizmasının başlangıcına kadar olan süre ve aynı inorganik sıvı ile termal kaçak zincir reaksiyonunun kırılmasına kadar olan süre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 3.13. İki Sıralamanın termal kaçak mekanizma davranışı karşılaştırması

Deney No	Deney Tipi	Termal kaçak mekanizmasının başlangıç süresi (s)	Termal kaçak mekanizmasının kırılma süresi (s)
1	Karışık sıralı	93	50
2	Dik sıralı	163	9

Pillerin yerleştirilme doğrultusunun müdahale eyleminde ısının alandan uzaklaştırılması ile ilişkili olduğu yorumlanmıştır. Şekil 3.20'de termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 3.20. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Şekil 3.20'de belirtilen alanlar; I. ilk reaksiyonlar ve ısınma, II. hücrelerin gaz tahliye etmesi, III. termal kaçak oluşumu, IV. termal kaçak mekanizmasının diğer hücrelere geçişi, V. termal kaçak zincir reaksiyonu mekanizmasının inorganik sıvı madde ile kırılması ve soğuma aşaması şeklinde yorumlanmıştır.

Silindirik hücreli 18650 pillerin dizilim yönünün termal kaçak oluşumunu geciktirici etkisi olduğu saptanmıştır. Termal kaçak mekanizmasına giren pillerin, komşu pilleri etkilemesi ile tetiklediği sonucu pillerin durumuna bakılarak ve yanmayan pillerin varlığına dayanarak gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Kırmızı daire içinde termal kaçak mekanizmasının en güçlü yaşandığı yer işaretlenmiştir.

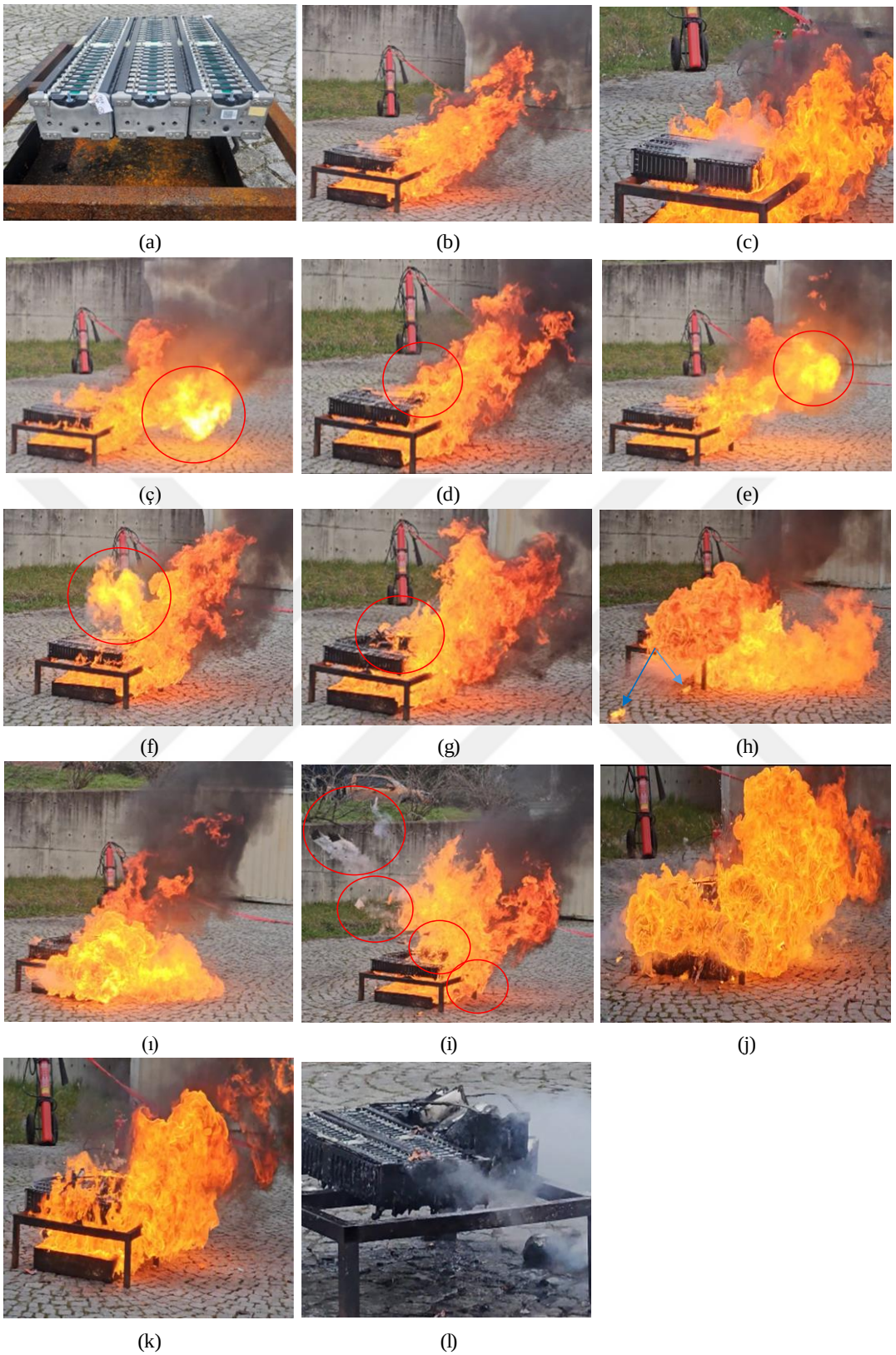


Şekil 3.21. Deney sonrası pillerin durumu

Müdahale eyleminin süresinin pillerin dizilimi ile ilişkili olduğu yorumlanmıştır. Dik sıralı pil gruplarının, karışık sıralı pil grubuna kıyasla daha kısa sürede termal kaçak mekanizması bastırılmıştır. Kullanılan inorganik tabanlı söndürme sıvısı, termal kaçak başladığında zincir reaksiyonu kırmayı başarmıştır.

3.4.1.3. Deney No: 3:

Gerçek boyutlu batarya modüllerinin yanma davranışı ve inorganik tabanlı sıvı madde ile termal kaçak mekanizmasının durdurulması performansı denenmiştir. Gerçek boyutlu bir PHEV taşıtta kullanılan batarya bloklarının birbirine bağlanmamış durumda ve birbirinden farklı SOC durumundaki 3 modülün (72 hücre) batarya bloğunun içinde olduğu halde yan yana durumda, bataryanın durumu canlandırılmıştır. Modüllerin birbiriyle etkileşimi, oluşan termal kaçak mekanizması gelişimi, termal kaçak mekanizması oluşumu ardından inorganik tabanlı sıvısının mekanizmayı durduma etkinliği denenmiştir. Pillerin kapasitesinin yapılan ölçüm neticesinde (SOC) % 83 civarında olduğu saptanmıştır. 3 Adet modül yangın tavası üzerine konularak deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.22 (a)'da gösterilmiştir. Deney yangın tavasındaki hızlandırıcının tutuşturlması ardından başlamıştır. 237. s'de sıcaklığın 623 ℃'ye ulaştığı ölçülmüştür. 254. s'de sıcaklık 649 ℃'ye ulaştığı ölçülmüştür. 265. s'de ise sıcaklık değeri 652 ℃ olarak ölçülmüştür. 271. s'de ilk patlama sesi duyulmuştur. 23. s'de modüllerin üzerinden beyaz duman çıkmaya başladığı görülmüştür. Bu durum beyaz dumanın artarak ve yayılarak devam etmiştir. Şekil 3.22 (b) ve (c)'de bu durum gösterilmiştir.

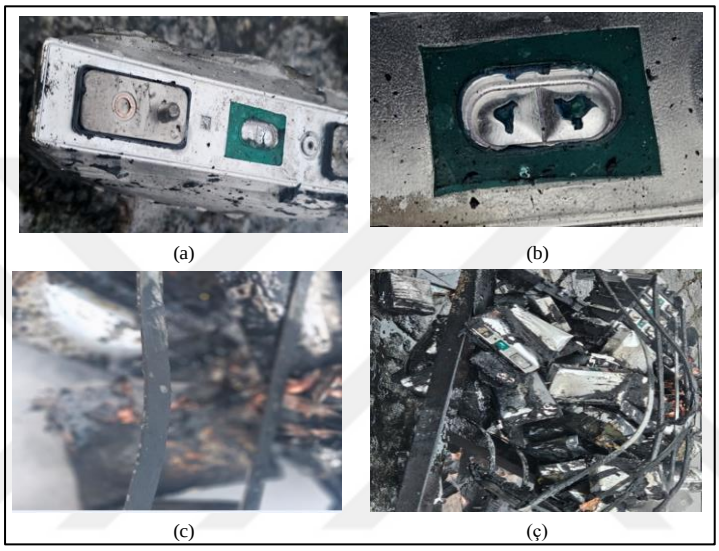


Şekil 3.22. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

118. s'de modülü bir arada tutan plastik malzemelerin erimesi ve yangın tavasına damlama sesleri duyulmuştur. Bu esnada sıcaklık ölçüm değerleri sırasıyla 237. s'de 623 ℃, 254. s'de 649 ℃ ve 265. s'de ise 652 ℃ olarak ölçülmüştür. 271. s'de ilk patlama sesi duyulmuştur. Patlama ile birlikte bir alev hüzmesi oluşmuş ve yangın tavasına batarya bloğundan bir parça düşmüştür. Düşen parçanın bir hücre olduğu ve modülü bir arada tutan karkas yapının çözülmeye başladığı anlaşılmıştır. Bu durum Şekil 3.22 (ç)'de gösterilmiştir. Bu zamana kadar devam eden beyaz duman çıkışı aniden kesilmiştir. Devamında, 275. s ile 280. s arasında batarya modülünden patlayan modül şişmeye başladığı ve batarya modülünü tutan karkasın deforme olduğu gözlemlenmiştir. 280. s'de karkas yapısı şekil değiştiren ve şişen modülde iki patlama daha oluşmuştur. Bu durum Şekil 3.22 (d) ve (e)'de gösterilmiştir. 280. s'ile 284. s arası karkas yapısından genleşme sesi duyulmuş, bunun hemen ardından karkas yapı dağılarak formunu kaybetmiştir. 294. s'de bu kez ilk modül diğerine göre daha şiddetli bir şekilde patlamıştır. Patlama ile birlikte basınçlı bir gaz çıkış sesi duyulmuştur. Modülün dağılması ile birlikte hücrelerin içinden katot ve anot parçalanarak ayrılmıştır. Şekil 3.22 (f)'de dağılan modül hücrelerinden ayrılan katot ve anot parçaları gösterilmiştir. 304. s'de bir kez daha şiddetli bir patlama oluşmuştur. Patlamanın ardından, 309. s 'de sıcaklık 663 ℃ olduğu ölçülmüştür. Bu son büyük patlama ardından 306. s'de bu kez batarya modülünde, çok sayıda katot ve anot folyolarını dışarıya atan bir patlama daha gerçekleşmiştir. Bu durum Şekil 3.22 (g, h, ı, i)'de gösterilmiştir. 323. s'de bir patlama daha meydana gelmiş, basınçlı bir gaz tahliye sesi duyulmuştur. Bu patlamada alevler yanal olarak daha fazla yayılmıştır. Basınçlı gaz sesi geldiğinde 333. s'de bir patlama daha gelişmiş, modül içindeki hücrelerden tavanın içine düşenler olmuştur. Karkas yapının tutuculuğunun kaybolduğu patlama Şekil 3.22 (j) ve (k)'da gösterilmiştir. 337. s'de inorganik tabanlı söndürme maddesi ihtiva eden yangın tüpü ile müdahale başlatılmıştır. 357. s'de (20 s toplam müdahale ile) termal kaçak reaksiyonu bastırılmıştır. 399. s'e kadar duman çıkışı devam etmiştir.

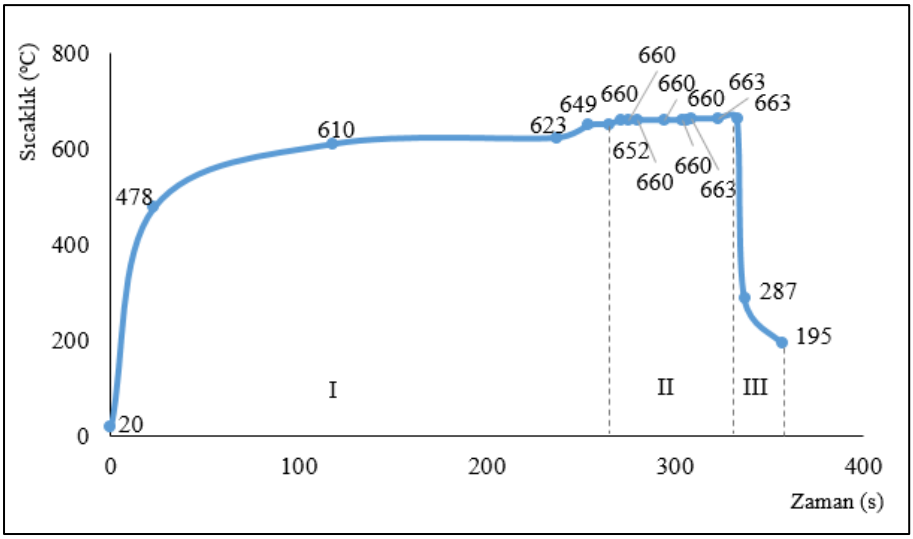
Kullanılan PHEV batarya modülleri, bir bataryanın içinde olduğu şekli ile simüle edilmiştir. Bataryanın alt metal sac ve üst kompozit kapakları olmayıp bu hali ile deney gerçekleştirilmiştir.

23. s'de modüllerden çıkmaya başlayan beyaz duman çökerek zemin seviyesinde birikmiştir. Şekil 3.23'de gösterildiği üzere hücrelerin emniyet ventilleri, hücre içi basınç artması sonucu şişmiş ve patlayarak içindeki VOC'i dışarı atmıştır. Bu esnada hücrenin kendisi de şişerek, Şekil 3.23 (a)'da gösterildiği şekilde modül içinde karkas yapıyı zorlamıştır. Şekil 3.23 (b)'de yırtılarak açılmış bir emniyet ventili detaylı olarak gösterilmiştir. Burada emniyet ventili içeriden artan basınç nedeniyle zorlandığı ve iki noktadan yırtıldığı saptanmıştır.



Şekil 3.23. Hücrenin emniyet ventilindeki yırtılma ve hücrenin şişmesi

Şekil 3.24'de termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği ve termal kaçak mekanizması aşamaları gösterilmiştir.



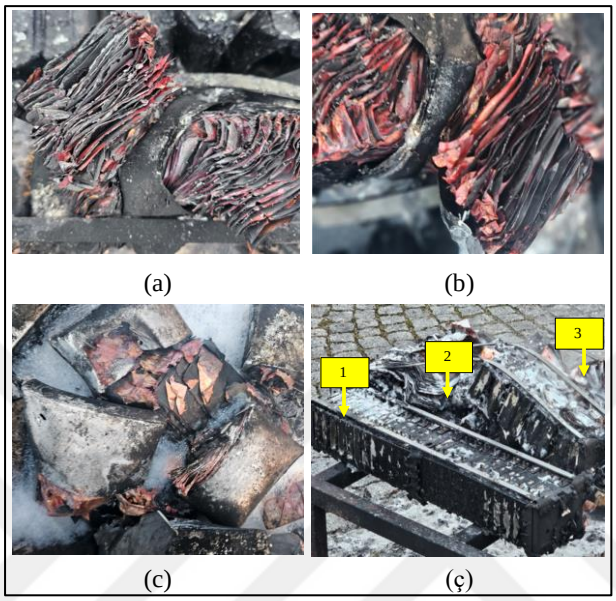
Şekil 3.24. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Şekil 3.24'de belirtilen alanlar; I. ilk reaksiyonlar ve ısınma, beyaz duman çıkışı ve plastik parçaların erimesi, II. 7 adet patlama oluşması, gaz çıkışı, hücrelerin formunu kaybetmeleri, termal kaçak mekanizmasının oluşumu ve yayılması, III. termal kaçak mekanizması reaksiyonlarının inorganik madde ile kırılması ve soğuma şeklinde yorumlanmıştır.

Çıkan yoğun siyah duman ise modüllerin etrafındaki koruyucu plastik kapaklardan ve modüllerin etrafındaki, üzerindeki plastik parçalardan kaynaklanmakta olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte plastik parçalar damlayarak yangın tavasına damlamaya başlamasıyla modülü bir arada tutan yapı zayıfladığı tespit edilmiştir. Yapıyı bir arada tutan metal karkas yapı hücrelerin şişmesi ve gaz salınımı ile birlikte hücreleri bir arada daha fazla tutamamıştır. Şekil 3.23 (c)'de formunu kaybetmiş metal karkas yapı gösterilmiştir. 271. s'de meydana gelen ilk patlama ile bilikte karkas yapıdan hücreler dağılmaya başlamış ve tavaya hücre düşmüştür Şekil 3.23 (a) ve (b)'de bu durum gösterilmiştir. Patlama ile birlikte beyaz duman çıkışı aniden azalması beyaz duman içinde VOC nin de tutuştuğunu göstermektedir. 284. s'de modülden gelen sesler ile birlikte nihayetinde dışa doğru modüldeki hücreler dağılmıştır. Bu zamana kadar sıralı duran hücreler bundan sonra karışık durumda yanma eylemine devam etmiştir. Termal kaçak mekanizmasının yayılımı deney no: 1'de yaşandığına benzer şekilde farklı yönlerde gelişi güzel devam etmiştir. Patlama ardından dağılan hücrelerin müdahale eylemi sonrası durumu Şekil 3.25 (ç)'de gösterilmiştir. Modül dağıldıktan sonra da basınçlı gaz çıkışı devam etmiştir. Bununla birlikte yeni patlamalar meydana gelmiştir. Son patlama ile birlikte hücrelerin dış alüminyum tabakası yırılarak hücrenin yapısını oluşturan katot ve anot folyolar parçalanarak dışarıya saçılmıştır. Karkas yapı dağıldığında hücreleın birbirini destekleyemediği ve artan basınç nedeniyle içeriden patlayarak katot ve anot folyolarının dağıldığı görülmüştür. Yanan üç batarya modülünden ikisinde anlatılan hücre dağılması yaşanmışken tekinde termal kaçak mekanizması başlamadan yapılan müdahale, modülün termal kaçak mekanizmasına geçişini önlemiştir. İnorganik söndürme maddesi ile termal kaçak mekanizmasına müdahale süresi 20 s'de tamamlanmıştır.

Yangın tavası üzerinde ve birbirine yaslanmış şekilde duran üç modülden Şekil 3.25 (ç)'de gösterilen 3 numaralı modül en fazla hasarı almışken 1 numaralı modül hasarı en

az olarak deney sonlanmıştır. Termal kaçak mekanizmasının 3 numaralı modülde başladığı ve 1 numaralı modüle doğru yayıldığı tespit edilmiştir. 1 numaralı modüldeki hücrelerin gaz ventillerinin açılmadığı görülmüştür. Deney esnasında en yüksek sıcaklık 663 ℃ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.25. Alüminyum dış katmanın yırtılması ve folyoların açığa çıkması

Modülleri bir arada tutan karkas yapı, hücrelerin şişmesi, yüksek ısı, gaz salınımı nedenleriyle yapısını koruyamamaktadır. Hücrelerin sıralı yapısı bozulduğunda, termal kaçak yönü ve doğrultusu etkilenmektedir. Hücrelerin dış alüminyum kabı içeriden basınç nedeniyle yırtılarak hücreyi oluşturan folyoların dağılmasına sebep olmuştur. Şekil 3.25 (a), (b), (c)'de bu durum gösterilmiştir. İnorganik tabanlı sıvı, modül yangınında etkili olarak termal kaçak mekanizmasını kırmayı başarmıştır.

3.4.1.4. Deney No: 4:

İnorganik tabanlı söndürme sıvısı ile söndürülmüş gerçek boyutlu batarya modüllerinin tekrar yanma davranışı ve inorganik tabanlı söndürme sıvısı ile söndürme deneyi, deney No:3'de termal kaçak mekanizmasının diğer iki modüle yayılmadığı görülmüştür. Yanmayan bu iki modül ile, yangın tavası içerisine aynı miktarda hızlandırıcı konularak bu kez inorganik sıvı bulaşmış batarya modülünün tekrar yakılmaya çalışılması ile söndürme sıvısının yangını geciktirme etkisi ve tekrar tutuşmuş batarya modüllerinin

söndürme etkisi denenmiştir, Şekil 3.26 (a)'da bu durum gösterilmiştir. Yangın tavası içindeki hızlandırıcının tutuşturulması ile deney başlamıştır.



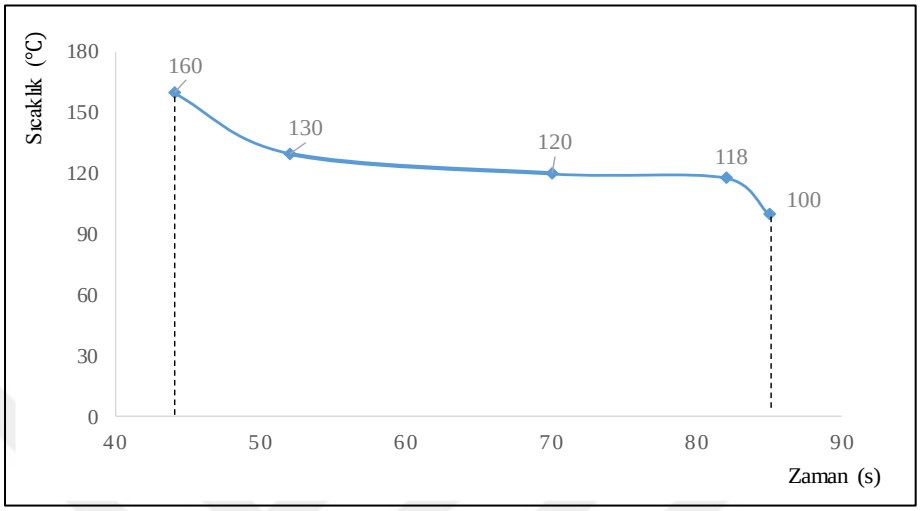
Şekil 3.26. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Batarya modülleri tutuşturulduktan 7. s'de ilk patlama gerçekleşmiştir. Şekil 3.26 (b)'de bu durum gösterilmiştir. 14. s'de modül grubunu bir arada tutan karkas yapı yapı bütünlüğünü kaybetmiştir. Yanmamış olan ikinci blok dağılmıştır. Karkas yapının dağılması Şekil 3.26 (c)'de gösterilmiştir. 15. s'de bir başka şiddetli patlama meydana

gelmiştir. Bu patlama ile birlikte batarya hücrelerinin içinden anot ve katot folyoları saçılmıştır. Patlama anı Şekil 3.26 (ç) ve hücrelerin içinden anot ile katot folyolarının dağılması Şekil 3.26 (d) ve (e)'de gösterilmiştir. 23. s'de batarya modülünün altına doğru bir patlama meydana gelmiştir. Bu patlamalar ile birlikte beyaz duman çıkışı da gözlemlenmeye devam etmiştir. Bu noktada modüllerin termal kaçak mekanizmasına müdahale etmek için yangın tavası sehpanın altından çekilmiştir. Beyaz dumanın yayılması ve modülün alt tarafından gelişen patlama durumu Şekil 3.26 (e)'de gösterilmiştir. 24. s'de bu kez daha şiddetli bir patlama meydana gelmiştir. Bu patlama ile birlikte hücrelerin yapısında bulunan anot ve katot folyoları modüllerin dışına doğru fırlamışlardır. Basınçlı gaz çıkışı ve alev hüzmesi 30. s'e kadar devam etmiştir. Bu sürenin sonunda bir patlama ile birlikte modülleri bir arada tutan yapı çözülmüş ve hücreler ortalığa dağılmıştır. Bu durum Şekil 3.26 (f), (g), (h)'de gösterilmiştir. 34. s 'de inorganik tabanlı söndürme sıvısı ile termal kaçak mekanizmasına müdahale eylemine geçilmiştir. 44. s'de söndürme tek tüp kullanılarak tamamlanmıştır. Şekil 3.26 (ı)'da gösterilen müdahale eylemi ile birlikte yoğun miktarda beyaz duman oluşumu gözlemlenmiştir. 44. s'de modüllerin sıcaklığı 160 ℃ olarak ölçülmüşken 52. s'de bu sıcaklık 130 ℃'ye düşmüştür. Şekil 3.26 (i)'de gösterilen soğutma çalışması bir başka inorganik tabanlı söndürme maddesi içeren söndürme tüpü ile gerçekleştirilmiştir. Bu söndürücü 59. s'de tatbik edilmeye başlanmıştır. Bu süre boyunca yoğun beyaz duman çıkışı devam etmiştir. Sıcaklık 70. s'de 120 ℃ olarak ölçülmüştür. 82. s'de ise sıcaklık 118 ℃ olarak ölçülmüştür. 85. s'de 100 ℃ olarak ölçülmüştür.

Tutuşturma ardından 7. s'de ilk patlama gerçekleşmiştir. Karkas yapının 14. s'de dağılması ardından 15. s'de patlama gelişmesi termal kaçak mekanizmasının kaldığı yerden devam ettiğini göstermektedir. 23. s'de patlama ve beyaz duman çıkışı gözlemlenmesi HF ve VOC çıkışının devamını göstermektedir. 24. s'de meydana gelen basınçlı alev hüzmesi ve patlama beyaz duman beraberinde salınan VOC'i tutuşturmuştur. Termal kaçak mekanizmasına müdahale eylemi toplamda 10 s de tek inorganik tabanlı söndürme maddesi içeren söndürme tüpü kullanılarak tamamlanmıştır. Termal kaçak mekanizmasını durdurma eylemi bir önceki deneydeki zamandan 10 s kısa sürmüştür. Müdahale ile birlikte sıcaklık 41 s içinde toplam 60 ℃ düşmüştür. Bu zaman boyunca inorganik sıvı soğutma amacıyla 15 s sonra kullanılmaya başlanmıştır. İnorganik sıvı maddenin soğutma etkisi Şekil 3.27'de gösterilmiştir. İnorganik tabanlı söndürme

maddesi kullanılmaya devam ettikçe soğutma etkisinin termal kaçak oluşumunu tekrar etmesini önlebileceği tespit edilmiştir. İnorganik sıvının temas ettiği yüzeyde sıcaklığı etkin bir şekilde düşürebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.27. Tatbik edilen inorganik sıvının soğutma etkisi

Sıcaklık ölçümleri yapıldığında, bazı hücrelerde sıcaklığın yeterince düşmediği saptanmıştır. Hücrelerin sırası bozulduğunda hücrelerin arasına inorganik sıvı daha kolay girmekte ancak aralarına inorganik sıvının giremeyeceği kadar sıkı olan hücrelerde sıcaklık düşümü daha yavaş olmaktadır. Bu durum Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Söndürme sonrası hücrelerde sıcaklık

Li-ion batarya termal kaçak mekanizmasının sona erdirilmesi nihayetinde sıcaklığın belli bir seviyenin, eşik sıcaklık değerinin altına indiğinden emin olunmaması, ısı kaynağına bağlı olarak devamında yangının tekrar ve aynı şiddetle devam etmesine sebep olmaktadır.

İnorganik sıvı maddenin tekrar tutuşmaya gecikme etkisi ancak sıcaklığın düşürülmesi ile mümkün olabilmektedir. İnorganik sıvı ısıyı ortamdan uzaklaştırarak, zincir reaksiyonu kırması termal kaçak mekanizmasını bastırmıştır. Termal kaçağın sona ermesi sonrası uygulama devam ettikçe soğutma etkisi olduğu tespit edilmiştir.

3.4.1.5. Deney No: 5:

Gerçek boyutlu batarya modüllerinin yanma davranışı ve kuru kimyevi toz, CO_2 ve köpük ile termal kaçak mekanizmasının bastırılması deneyi gerçekleştirilmiştir. Gerçek boyutlu bir PHEV taşıtta kullanılan batarya bloklarının birbirine bağlanmamış durumda ve birbirinden farklı SOC durumundaki 3 modülün batarya bloğunun içinde olduğu fiziksel koşulda, Şekil 3.29 (a)'da gösterildiği şekilde bataryanın durumu gösterilmiştir.

Modüllerin birbiriyle etkileşimi, oluşan termal kaçak mekanizması gelişimi, termal kaçak mekanizması oluşumu ardından yangın söndürme faaliyetinde kurukimyevi tozlu (KKT), hemen ardından CO_2 gazlı ve ardından köpük maddelerinin termal kaçak mekanizmasının kırılması etkinliğinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Her bir modülün gerilim değerleri ölçülerek not edilmiştir. SOC (pil şarj seviyesi) % 83 civarında olduğu saptanmıştır. Deney düzeneği, yangın tavası içindeki hızlandırıcının tutuşturulması ile deney başlamıştır.

Tavanın tutşturulması ardından 18. s'de sıcaklık 630 ℃ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.29'(b)'de görüldüğü üzere 19. s'de is batarya modülünün üzerinden beyaz duman çıkışı başlamış ve zemine çökmeye başlamıştır. 40. s'de modüllerin plastik aksamı eriyerek damlamaya başladığı görülmüştür.



Şekil 3.29. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Beyaz duman çıkışı devam ettikçe dumanın zeminde birikmeye ve kümelenmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu kümelenme Şekil 3.29 (c)'de gösterilmiştir. 60. s'de sıcaklık 670 ℃'ye çıktığı ölçülmüştür. 63. s'de ilk kısa devre sesi duyulmuştur.

İkinci kez kısa devre bu kez 88. s'de gerçekleşmiştir. 119. s'de sıcaklık 680 ℃'ye çıkmıştır. 172. s'de hücrelerin kutup başları kısa devre nedeniyle akkor hale gelmiştir. Bu durum Şekil 3.29 (ç)'de gösterilmiştir.

Batarya modülünün üzerinde kısa devre nedeniyle akkor hale geçen kutup başları ve alt kısımda ısı nedeniyle erimeye başlayan hücrelerin plastik aksamı yangın tavasına

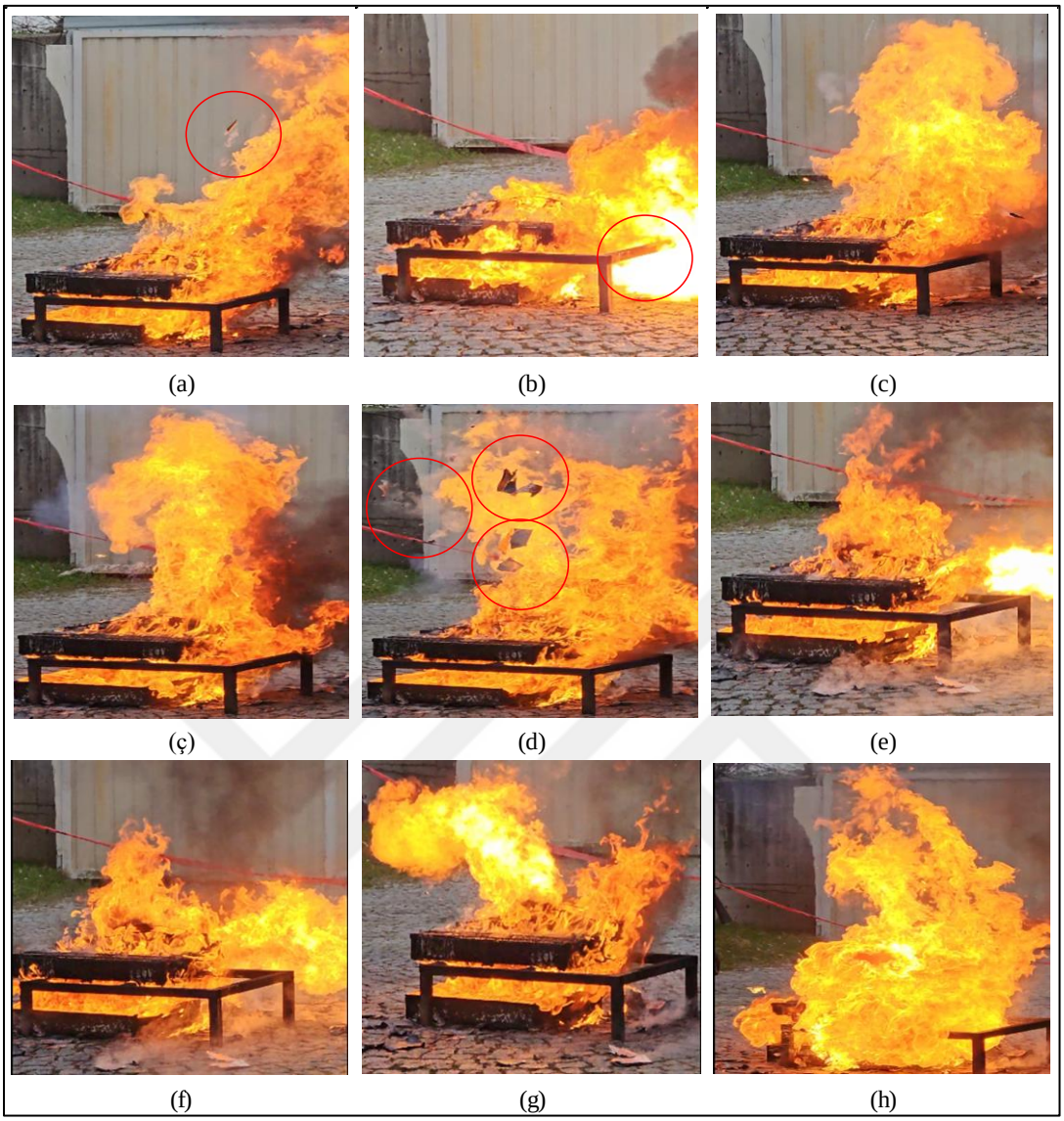
damlaması Şekil 3.29 (d)'de gösterilmiştir. 200. s'de sıcaklık 700 ℃ olarak ölçülmüştür. 224. s'de batarya modülünü bir arada tutan karkas yapı hücrelerin şişmesi nedeniyle fiziksel bütünlüğünü koruyamayarak dağılmıştır. Bu durum Şekil 3.29 (e)'de gösterilmiştir. 237. s'de kutup başında başlayan kıvılcım 245. s'e kadar devam etmiştir. Bu durum Şekil 3.29 (f)'de gösterilmiştir. Kıvılcım ardından 248. s'de beyaz duman çıkışı başlamıştır. 259. s'de modül üzerinde modülün ucundan ilk patlama meydana gelmiştir, bu durum Şekil 3.29 (g) ve (h)'de gösterilmiştir.

260. s'de bu kez ilkinden daha şiddetli olan ikinci patlama meydana gelmiştir, bu durum Şekil 3.30 (a)'da gösterilmiştir. Bu patlama ile birlikte hücre yapısını oluşturan anot ve katot parçalanarak folyoları ortalığa saçılmıştır Şekil 3.30 (b)'de bu durum gösterilmiştir. 264. s'de modülün alt tarafından bir üçüncü patlama gerçekleşmiştir. Bu patlama ile birlikte basınçlı gaz tahliye sesi duyulmuştur. 266. s'de bir dördüncü patlama gelişmiş, bu patlamada hücre yapısını oluşturan anot ve katot parçalanarak folyoları patlama etkisi ile dağılmıştır. 267. s'de ise beşinci patlama meydana gelmiştir. 269. s'de önceki iki patlamadan daha şiddetli bir altıncı patlama meydana gelmiştir.

Ardışık yaşanan bu üç patlama Şekil 3.30 (c), (ç), (d)'de gösterilmiştir. 273. s'de basınçlı gaz çıkış sesi ile birlikte alev hüzmesi oluşumu gözlemlenmiştir. 278. s'de ise ikini bir basınçlı gaz çıkışı gerçekleşmiştir.

Bu durum Şekil 3.30(e) ve (f)'de gösterilmiştir. 279. s'de yedinci patlama oluşmuş, 280. s'de oluşan sekizinci patlama ile hücre yapısını oluşturan anot ve katot parçalanarak folyoları patlama etkisi ile dağılmıştır. 284. s'de oluşan dokuzuncu patlama ile bir önceki patlamada yaşandığı gibi anot ve katot parçalanarak folyoları patlama etkisi ile dağılmıştır. 296. s'de meydana gelen onuncu patlama oluşmuştur.

Bu patlama ile hücrelerin anot ve katot folyoları da ortalığa dağılmıştır. Bu durum sırasıyla Şekil 3.30 (g) ve (h)'de ve Şekil 3.31 (a)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

311. s'de onbirinci patlama meydana gelmiş ve bu kez hücreler de karkas yapıdan ayrılarak patlama etkisi ile fırlamıştır. Bu noktadan sonra yangın tavası yanmakta olan modülün altından çekilerek söndürme eylemine geçilmesine karar verilmiştir. Bu durum Şekil 3.31 (b)'de gösterilmiştir. Söndürme eylemine kuru kimyevi tozlu (KKT) söndürücü ile başlanmıştır. Şekil 3.31 (c) ve (ç)'de gösterildiği üzere KKT ile söndürme esnasında yangının bastırılması emaresi gözükmemiştir. Yangın şekilde devam etmiştir. Kullanılan 6 kg lık KKT tüpünün boşalması 16 s kadar sürmüştür. KKT'nin boşalmasına mütakip 327. s'de modül üzerinde bir patlama daha meydana gelmiştir. KKT'nin termal kaçak zincir reaksiyonuna etkisi olmamıştır. Batarya modülleri yanma eylemini devam ettirmiştir. İkinci aşama olarak CO_2 tüpü ile söndürme eylemine geçilmitir. CO_2 tüpü

hazırlanırken 343. s'de bir patlama meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 3.31 (d) ve (e)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

359. s'de CO_2 tüpü ile söndürme eylemi başlatılmıştır. Söndürme eylemi devam ederken yangın davranışında bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu durum Şekil 3.31 (f)'de gösterilmiştir. Söndürme eyleminin devam ettiği 377. s'de bir batarya modüllerinde bir patlama meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 3.32 (g)'de gösterilmiştir. CO_2 tüpü ile söndürme eylemi 25 s kadar devam ettirilmiş, ancak batarya modüllerinin yanma davranışında bir değişiklik gözlemlenmemiştir. CO_2 tüpü ile gerçekleştirilen söndürme eylemi 384. s'de bırakılmıştır. CO_2 tüpü ile gerçekleştirilen söndürme eylemi ardından 388. s'de batarya modülünde bir patlama meydana gelmiştir. Şekil 3.31 (h)'de bu durum gösterilmiştir. CO_2 termal kaçak zincir reaksiyon mekanizmasını kırabilecek bir etki gösterememiştir. Söndürme eyleminde bu kez itfaiye aracından köpük ile müdahale edilmeye başlanmıştır. Köpük müdahalesi 439. s'de başlatılmıştır. Şekil 3.31 (ı)'da bu durum gösterilmiştir. Köpük ile müdahalede 19. s'de batarya modülündeki yangının söndürüldüğü tespit edilmiştir. 458. s'de yangın söndürülmüştür. Söndürme eylemi gerçekleşmesi ardından 36 s boyunca köpük uygulaması soğutma amacıyla devam ettirilmiş ve bu 494. s'de sıcaklık 200℃ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.31 (i)'de soğuma eylemi gösterilmiştir. Köpük, termal kaçak zincir reaksiyonunu durdurmuş ancak soğutma etkisi sınırlı olmuştur.

Bir önceki deneyelerde görülen beyaz duman bu deneyde de görülmüş ve yine zeminde çökmeye başlamıştır. Bu deneyde kutup başlarının, oluşan kısa devre nedeniyle akkor hale geldiği gözlemlenmiştir. Bir önceki deneylerde görülmeyen bu durum SOC seviyesinin yüksek olması ile ilişkili olduğuna yorumlanmıştır. Modüllerin yanma ve termal kaçak mekanizması, bir önceki deneydekine benzer şekilde gelişmiş olup toplamda on patlama meydana gelmiştir ve deney esnasında katot ile anot folyoları patlama etkisi ile alüminyum hücre çeperinin yırtılması sebebiyle patlamalar ile birlikte dışarı saçılmıştır. Ölçülen en yüksek sıcaklık 700 ℃ olmuştur. İlk madde olarak kuru kimyevi tozlu söndürücü maddenin termal kaçak mekanizmasını kırma etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Uygulanması esnasında alev boyunda bir küçülme olmasına rağmen uygulama bitirildiğinde eski haliyle devam etmiş, müdahale ardından bir patlama meydana gelmiştir. İkinci madde olarak CO_2 gazı uygulanmış olup termal kaçak mekanizmasını kırmak konusunda bir etkinliği olmamıştır. Termal kaçak mekanizması devam etmiştir. Yapılan müdahale ardından bir patlama gelişmiştir. Üçüncü madde

olarak köpük söndürme üzerinde etkin olmuştur. Termal kaçak mekanizmasının 19 s içinde bitirildiği tespit edilmiştir.

3.4.1.6. Deney No: 6

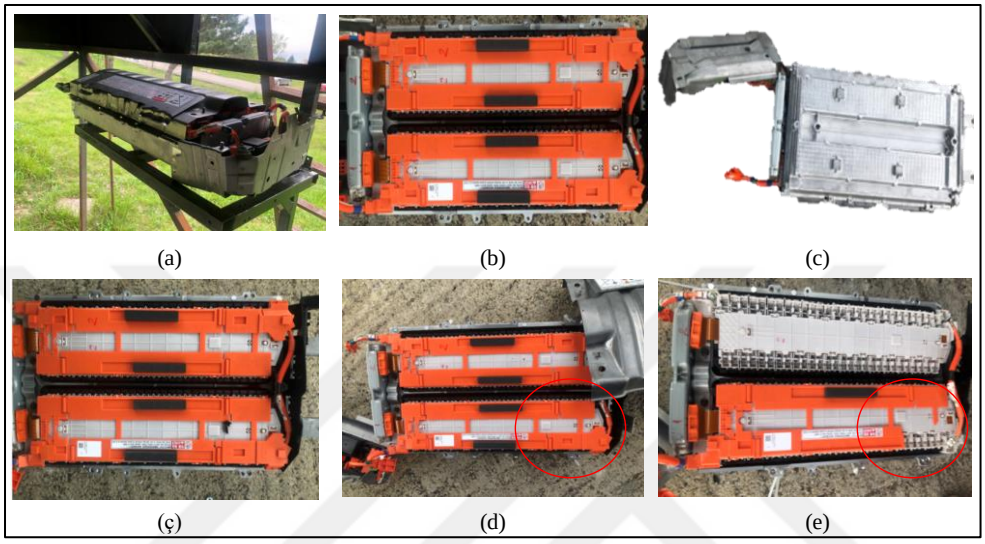
HV bataryanın yüksekten düşürülmesi ile termal kaçak oluşum deneyine; otomobillerin üretilmesi esnasında birden fazla üretim safhasında, bataryanın mekanik (mechanical abuse) hasarı nedeniyle termal kaçak mekanizmasına sebep olabilecek durumlar bulunmaktadır. Bunların en temelinde lojistik hareketleri gelmektedir. Bataryanın henüz taşıt üzerine takılmadan önce üretim tesisi içinde taşınması, esnasında sevkiyat aracından düşmesi, bulunduğu rafın üzerinden düşmesi, araca montaj esnasında düşmesi gibi birçok senaryo tüm araba üretim tesislerinde mevcut olup bu tür durumlarda oluşabilecek hasarlar deneysel olarak tecrübe edilmesi amaçlanmıştır. Düşürme deneyleri standart kasa yükseklikleri ile araca montajın yapıldığı yükseklik düşünülerek iki farklı yükseklik (1,5 m ve 2 m) için gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi bataryanın SOC (pil şarj seviyesi) % 83 civarında olduğu saptanmıştır. Düşme öncesi iç ve dış sıcaklıklar ölçülmüştür. Batarya koruma kapağı üzerinden dış sıcaklık termal kamera vasıtası ile ölçülmüştür. Kapak üzerinde ölçülen değerler 23 – 25 ℃ arasında değişkenlik göstermektedir. Düşürme öncesinde yapılan ölçümler Tablo 3.14'de gösterilmiştir. Batarya üst koruma kapağı sökülerek batarya modülü üzerinden, plastik koruma kapağı varken iç sıcaklık termal kamera vasıtası ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır. İç sıcaklığın modül üzerinde 20 – 25 ℃ arasında değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Tablo 3.14. Düşme deneyi öncesi gerçekleştirilen iç sıcaklık ölçümleri

İç Sıcaklık	**20,9** ℃
	21,0 ℃
	25,0 ℃
Dış Sıcaklık	23,0 ℃
	24,9 ℃
	25,6 ℃

Batarya, deneyin ilk kademesinde önce 1,5 m yükseklik olan deney düzeneğinin ilk katına konulmuştur. Buradan ard arda 5 kez düşürülerek bataryanın genel durumu kayda geçirilmiş, her seferinde ısınma durumu gözlemlenmesi için üst kapağı açılarak iç sıcaklık termal kamera ile ölçülmüştür. Deney düşme eylemleri sonrası iç sıcaklıkların kayıt altına alınması sağlanmış, her bir düşürme sonrası bataryanın darbeye bağlı fiziksel

durum değişikliği kayıt altına alınmıştır. 1,5 m düşme platformu üzerinde bataryanın durumu Şekil 3.32 (a)'da verilmiştir. 1,5 m birinci düşme sonrası fiziksel olarak değişiklik gözlemlenmemiştir. Bataryanın düştüğü noktada (köşe) hafif ve önemsiz ezilme meydana gelmiştir, Şekil 3.32 (b)'de gösterilmiştir. Düşme sonrası ölçülen en fazla sıcaklık 30 ℃ olarak saptanmıştır.



Şekil 3.32. 1,5 m düşme deneyleri öncesinde, sırasında ve sonrası batarya

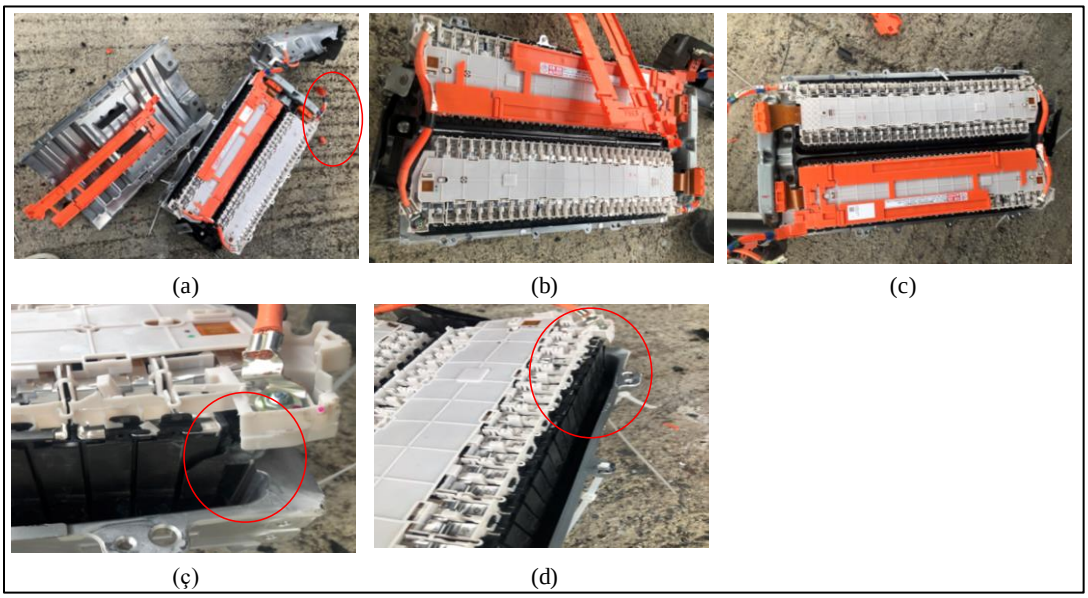
1,5 m ikinci düşme sonrası fiziksel olarak batarya yönetim sistemi (BMS) ve sigortanın olduğu ilave kutuda ayrılma tek taraflı olarak görülmüştür. Düşme sonrası sıcaklık en fazla 26 ℃ olarak ölçülmüştür. Düşürme sonrası batarya bloğu içinde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Şekil 3.32 (c)'de ikinci düşme sonrası batarya gösterilmiştir. 1,5 m üçüncü düşme sonrası fiziksel olarak batarya içinde bir deformasyon görülmemiştir. Düşme sonrası en fazla 24,5 ℃ sıcaklık saptanmıştır. Şekil 3.32 (ç)'de üçüncü düşme sonrası batarya içi gösterilmiştir. 1,5 m dördüncü düşme sonrası fiziksel olarak batarya içinde BMS kutusunun karşısında bulunan kısımdan deformasyon nedeniyle bir miktar yükselti oluşmaya başladığı görülmüştür. Batarya içinde yükseltinin oluştuğu yer Şekil 3.32 (d)'de üzerinde kırmızı daire içinde gösterilmiştir. Düşme sonrası en fazla 28 ℃ sıcaklık saptanmıştır. 1,5 m beşinci düşme sonrası yükseltinin oluştuğu yerde kayma hareketi devam etmiştir. Üzerinde bulunan plastik izolasyon kapağı kırılarak ayrılmıştır. Diğer taraftaki izolasyon kapağı ise yerinden çıkmıştır. Batarya içinde izolasyon plastik kapağının kırıldığı yer Şekil 3.32 (e)'da üzerinde kırmızı daire içinde gösterilmiştir. Düşme sonrası en fazla 30,9 ℃ sıcaklık saptanmıştır. Aşağıda Tablo 3.15'de düşme

sırasına göre düşme sonrası sıcaklıklar verilmiştir. Boş bırakılan hücrelere karşılık gelen yerlerde ölçüm yapılmamıştır.

Tablo 3.15. 1,5 m'den düşürme deneyleri sonrası ölçülen sıcaklıklar

Düşme	**Ölçüm Noktaları / Sıcaklık (℃)**						
Sıra	1	2	3	4	5	6	7
1	23 ℃	26 ℃	29 ℃	30 ℃			
2	20 ℃	20,6 ℃	21 ℃	22 ℃	23 ℃	26 ℃	21,5 ℃
3	23,3 ℃	22,7 ℃	24,2 ℃	24,5 ℃	23,3 ℃	21,5 ℃	
4	27 ℃	28 ℃	27,7 ℃	25,9 ℃	26 ℃	24,9 ℃	25,1 ℃
5	28,9 ℃	27,3 ℃	26,9 ℃	29,4 ℃	29,2 ℃	30,3 ℃	30,9 ℃

Batarya deneyin ikinci kademesinde bu kez 2 m yükseklik olan deney düzeneğinin ikinci katına konulmuştur. Buradan ard arda 5 kez düşürülerek bataryanın genel durumu kayda geçirilmiş, her seferinde ısınma durumu gözlemlenmesi için üst kapağı açılarak iç sıcaklık termal kamera ile ölçülmüştür. 1,5 m düşürme deneyleri bittikten sonra sıcaklık artışı durumu gözlemlenmek için 10 dakika ara verilmiştir. Deney sıcaklığın stabil olduğu tespit edildiğinden 2 m'den düşürme deneyleri başlatılmıştır. 2 m birinci düşme sonrası önemli bir değişiklik olmamıştır. Plastik kapaklar yerine takıldığı halde tekrar çıkmıştır. Bataryanın döküm alt tabanında ezilme izleri dışında büyük bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Düşme sonrası plastik parçalarda kırılmalar oluşmuştur. Şekil 3.34'de bataryanın genel durumu gösterilmiştir. Düşme sonrası en fazla 29,1 ℃ sıcaklık saptanmıştır.



Şekil 3.33. 2 m düşme deneyleri sırasında ve sonrası batarya

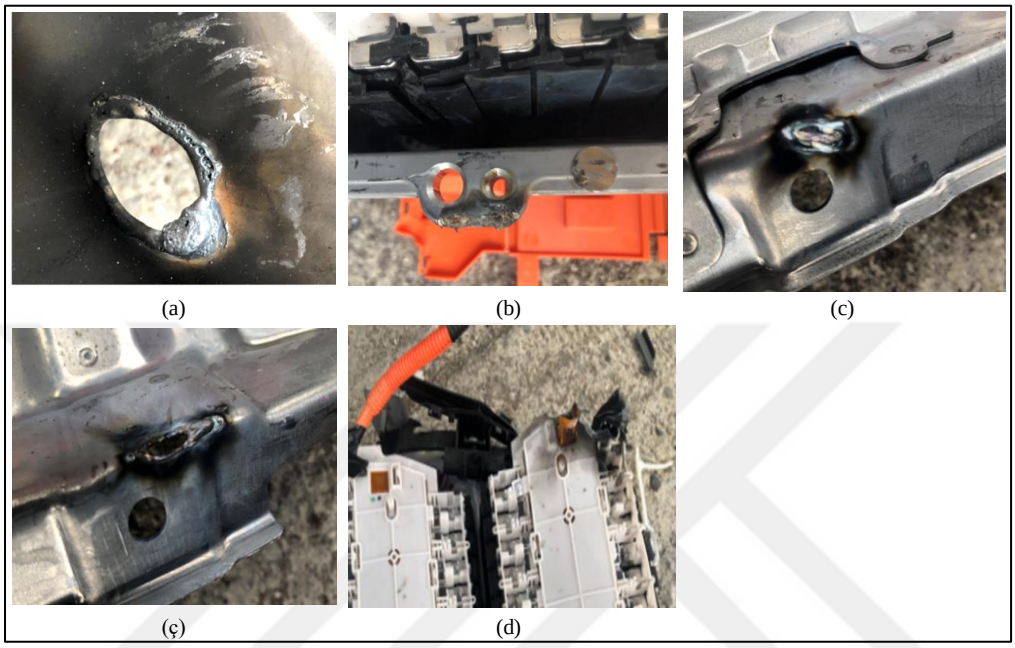
1,5 m ikinci düşme sonrası bir önceki duruma göre belirgin bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Düşme sonrası en fazla 30,7 ℃ sıcaklık saptanmıştır. İkinci düşürme sonrası bataya içi Şekil 3.33 (a)'da verilmiştir. Üçüncü düşme sonrası plastik parçalarda yeni kırılmalar meydana gelmiştir, batarya bloğunun yerinden çıkma eğilimi gözlemlenmiştir. Yükselti miktarında artış gözlemlenmiştir. Düşme sonrası durum Şekil 3.33 (b)'de gösterilmiştir. Düşme sonrası sıcaklık en fazla 30,6 ℃ olarak ölçülmüştür. Dördüncü düşme sonrası bataryanın yerinden kaymış blok hücrelerinin izolasyon plastik kapakları kırılmış, yerinden ayrılma eğilimi göstermektedir. Şekil 3.33 (c)'de bu durum gösterilmiştir. Düşme sonrası en fazla 32 ℃ sıcaklık saptanmıştır. Düşme sonrası zarar gören hücrelerin ve durumu Şekil 3.33 (ç)'de gösterilmiştir. Kırmızı daire içinde hücredeki hasar gösterilmiştir. Beşinci düşme sonrası bataryanın ayrılmaya başlayan hücre bloğunun ayrılma miktarı artma eğilimi göstermiştir. Batarya üst ve alt kapağında belirgin bir hasar oluşmamasına rağmen iç bloğun yerinden oynadığı görülmüştür. Düşme sonrası en fazla 32,1 ℃ sıcaklık ölçülmüştür. Şekil 3.33 (d)'de batarya bloğunun yerinden çıktığı kısım kırmızı daire içinde gösterilmiştir. Son düşme deneyi gerçekleşip iç ölçümler alınması ardından batarya üst kapağı kapatıldığında kısa devre oluşumu ve bu sebeple plastik parçaların tutuşması sonucu yangın oluşumu gözlemlenmiş derhal müdahale edilerek söndürülmüştür. Aşağıda Tablo 3.16'da düşme sonrası sıcaklıklar verilmiştir.

Tablo 3.16. 2 m'den düşürme deneyleri sonrası ölçülen sıcaklıklar

Düşme Sıra	**Ölçüm Noktaları / Sıcaklık (℃)**						
	1	2	3	4	5	6	7
1	28,8 ℃	29,1 ℃	22 ℃	26,7 ℃	27 ℃	23 ℃	24 ℃
2	24,5 ℃	26,2 ℃	28 ℃	30,7 ℃	28,3 ℃	28,8 ℃	24,7 ℃
3	29,3 ℃	28 ℃	29,3 ℃	29,4 ℃	30,6 ℃	28,8 ℃	20,6 ℃
4	31 ℃	30,9 ℃	31,1 ℃	30,7 ℃	30,4 ℃	30,9 ℃	32 ℃
5	32,1 ℃	27,1 ℃	26,1 ℃	31,5 ℃	32 ℃	33 ℃	30,4 ℃

İlk denemelerin bataryanın sağlam üst kapağında veya alt döküm havalandırma kanalında sadece ufak ezilmelere sebep olduğu görülmüştür. Denemeler devam ettikçe batarya bloğunun üzerindeki izolasyon plastiklerinin yerinden çıktığı ve sert plastik olan kapak parçalarının kırıldığı gözlemlenmiştir. Düşmeler devam ettirildikçe batarya bloğunun yerinden çıktığı ve kaydığı gözlemlenmiştir. Son denemelerde hücreyi koruyan plastiklerin de kırıldığı gözlemlenmiştir. Plastik izolatörün kırılıp ayrılması, yerinden

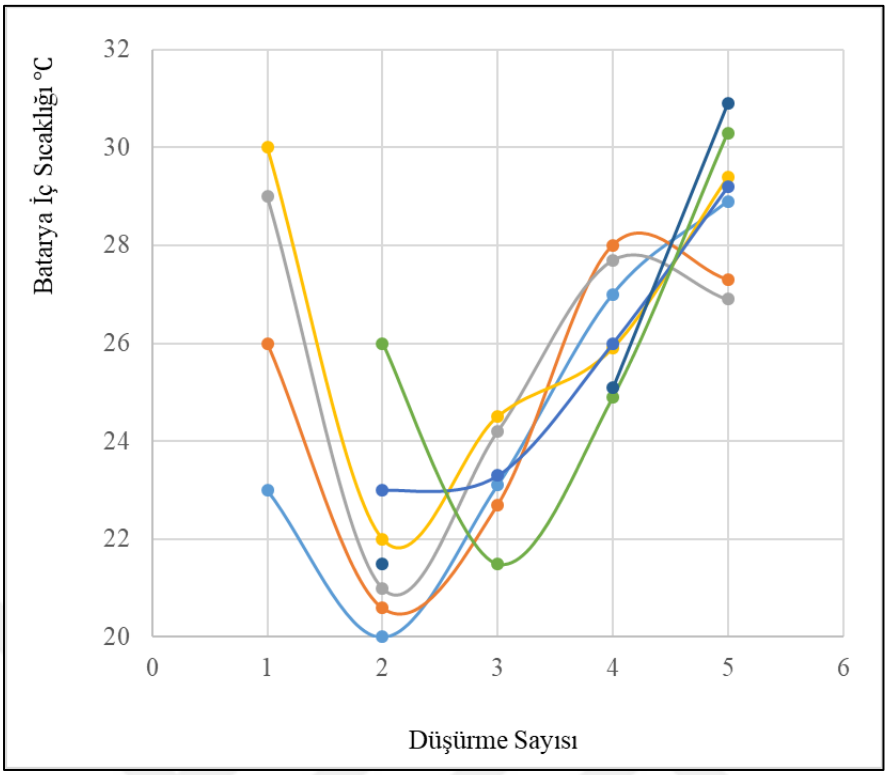
kaymış olan batarya bloğunun, bataryanın metal üst kapağı ile azalan mesafe nedeniyle temas etmesi kısa devreye sebep olmuştur. Oluşan kısa devre metal üst kapağın temas noktalarında delinmelere sebep olmuştur. Bu durum Şekil 3.34 (a), (b), (c), (ç)'de gösterilmiştir.



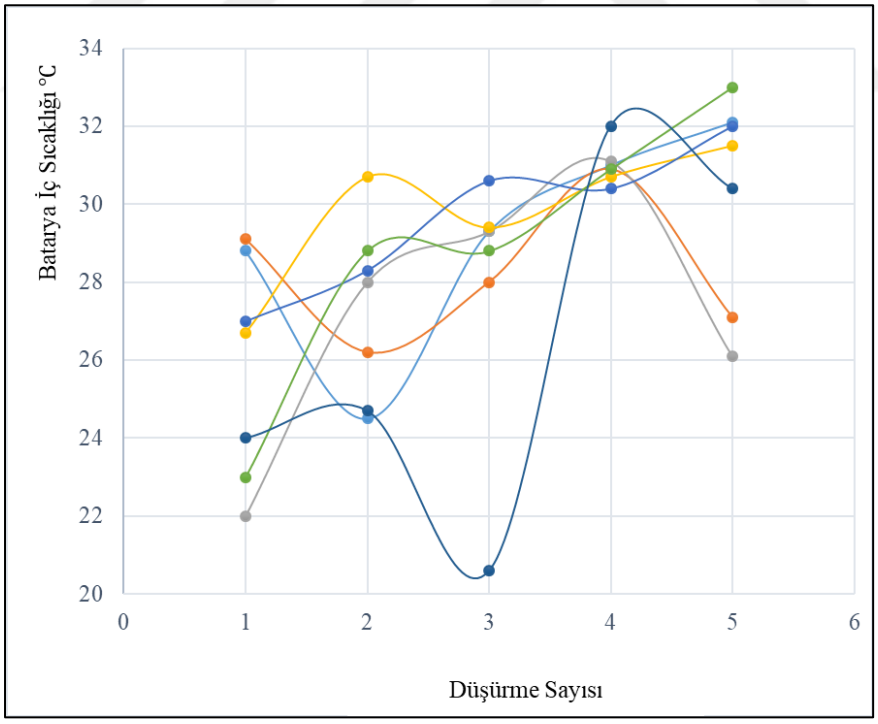
Şekil 3.34. Bataryanın düşürülmesi denemeleri ve oluşan hasarlar

Elektrikli taşıt üretimi esnasında taşıt bataryasının 1,5 m ila 2 m arasındaki yüksekliklerde taşındığından, karşılaşılabilecek düşme eylemlerinde termal kaçak mekanizmasına sebep olabilecek mekanik zorlanmanın hemen meydana gelmediği ve batarya üst-alt kapaklarının düşmeye karşı yeterince koruma sağladığı hükmüne varılmıştır. Bu durum Şekil 3.34 (d)'de gösterilmiştir. Düşme sayısı arttıkça batarya kasasına verilen hasarın artmasıyla birlikte batarya hücrelerinin kutup başlarının metal kapağa değmesinin yangına sebep olabilecek kısa devreye sebep verdiği gözlemlenmiştir. Üst kapağın plastik, kompozit gibi elektrik iletkenliği olmayan malzemelerden yapılması kısa devre oluşumuna engel olabileceği düşünülmektedir.

Düşme mekanizmasının iç sıcaklığı kayda değer bir şekilde arttırmadığı tespit edilmiştir. Şekil taşıt üretim tesislerinde HV bataryaların taşınması, taşıt içerisine konulması süreçlerinde düşme tehlikesine karşı önlemlerin alınması gerektiği düşünülmektedir. Düşürme sayısı ve batarya hücre yüzeyleri sıcaklık değişimi Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da verilmiştir. NMC piller için kritik sıcaklık değerine ulaşılmamıştır.



Şekil 3.35. 1,5 m düşme yüksekliği düşme sayısı ile sıcaklığın değişimi



Şekil 3.36. 2 m düşme yüksekliği düşme sayısı ile sıcaklığın değişimi

3.4.1.7. Deney No: 7

HV bataryanın yanma karakteristiği ve organik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma performansı deneyinde; batarya bloğunun açıkta olduğu, HV taşıt üretim tesislerinde meydana gelebilecek yangınlara ilk müdahale söndürme maddesinin doğru bulunması, çıkacak yangına doğru müdahalede bulunulmasını da sağlayacağından önemlidir.

Batarya üst kapak açılarak modüllerin izolasyonlu koruma kapağına ulaşılmış, plastik izolasyon kapağı da kaldırılarak akım değerleri ölçülerek not edilmiştir. Pillerin geriliminin 3,56 volt olarak ölçülmüş, buradan SOC (pil şarj seviyesi) % 85 olduğu saptanmıştır. Batarya demir sehpanın üzerine konulmuş, altına yangın tavası konularak deney için konumlandırma sağlanmıştır.

Tava içerisine 2 lt (%50 mazot ve %50 benzin karışımı) hızlandırıcı konularak deney hazırlıkları tamamlanmıştır. Hızlandırıcı yakıldıktan 110. s'de tavanın sıcaklığı 258 ℃ ve bataryanın 275 ℃ olarak ölçülmüştür. 130. s'de bataryada meydana gelen kısa devre sebebiyle ilk kıvılcım oluşması gözlemlenmiştir.

Bu durum Şekil 3.37 (a)'da gösterilmiştir. 131. s'de kısa devre sebebiyle seri olarak ard arda kıvılcım oluşması Şekil 3.37 (b)'de gözlemlenmiştir. 205. s'e kadar batarya içinde seri kıvılcımların ve 216. s'de basınçlı gaz çıkış sesi duyulmuştur. Bu esnada kısa devre kaynaklı patlama sesleri tekrar duyulmuştur, Şekil 3.37 (c)'de gösterilmiştir. Basınçlı gaz çıkışının sesi 7 s devam etmiştir. 235. s'de ilk termal kaçak görülmüştür. Termal kaçak nedeniyle oluşan alev hüzmesinin batarya üzerinde oluştuğu bölge, kablo geçişleri için kullanılan boşluk olduğu görülmüştür, Şekil 3.37 (ç).

Termal kaçak nedenli alev hüzmeleri, 250. s'de şiddetlenerek devam etmiştir Şekil 3.37 (d) ve (e). alt kapak yüzeyinde kısa devre nedeniyle delinen yüzeyden termal kaçak nedenli alev sızıntıları oluştuğu görülmüştür Şekil 3.37 (f). 253. s'de alt kapak patlayarak açılmış ve batarya hücrelerini batarya hacmi içinde tutacak bağlantı elemanı kalmaması nedeniyle hücrelerin bir kısmı yangın tavasına düşmüştür Şekil 3.37 (g)'. 262. s'de duman tabakası kalınlaşmaya başlamıştır Şekil 3.37 (h).



Şekil 3.37. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

266. s'de kısa devre kaynaklı patlamalar tekrar etmeye başlamıştır. Bununla beraber basınçlı gaz çıkış sesi duyulmuştur, Şekil 3.38 (a), 286. s'de organik tabanlı söndürme sıvı içeren portatif söndürme cihazı ile müdahale başlatılmıştır. Müdahale 31 s boyunca devam ettirilmiştir. İlk söndürme tüpünün bitmesiyle birlikte sıcaklığın 300 °C'ye düştüğü ancak yanmanın devam ettiği gözlemlenmiştir, Şekil 3.38 (b), 330. s'de ikinci tüp ile müdahale başlatılmıştır. İkinci söndürme tüpü 21 s'de boşalmıştır. İkinci tüp boşaltılması

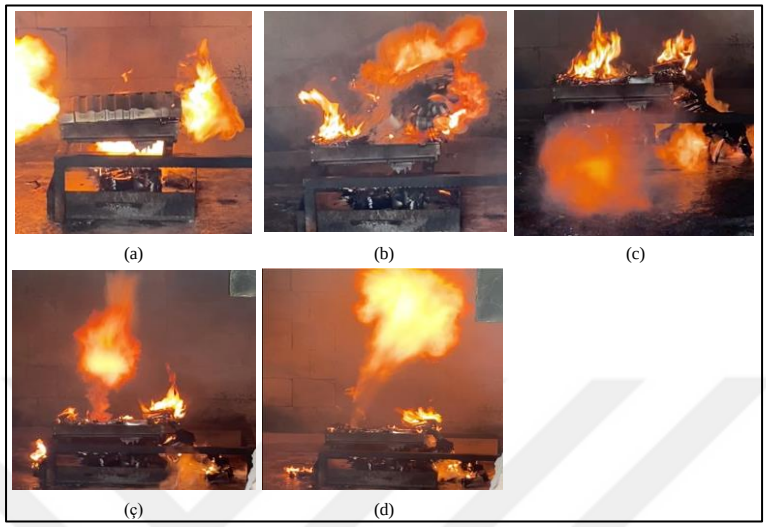
ardından termal kaçak mekanizmasının tekrar başladığı gözlenmiştir, bu durum Şekil 3.38 (c)'de gösterilmiştir. Şekil 3.38 (ç). 379. s'de üçüncü tüp ile müdahale başlatılmıştır, 16 s süren müdahale sonrası sıcaklık 200 ℃'ye düştüğü saptanmıştır. 420. s'de sıcaklığın ilk önce 362 ℃, yükseldiği, 441. s'de 370 ℃, 452. s'de 380 ℃'ye yükseldiği görülmüştür. Bu noktadan sonra 504. s'e kadar alev boyunun durağan kaldığı ve sıcaklığın 290 ℃'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu süre sonunda ise termal kaçak nedenli alev huzmesinin oluştuğu gözlemlenmiştir Şekil 3.38 (d), 534. s ile 589. s arasındaki 55 s boyunca basınçlı gaz tahliye sesi duyulmuştur, sıcaklık bu esnada 380 ℃ olarak ölçülmüştür. Takip eden süre boyunca tekrar kısa devre kaynaklı patlamalar meydana gelmiştir Şekil 3.38 (e) ve (f). 641. s'de yaşanan termal kaçak mekanizması sonrası alev boyu aniden küçüldüğü ancak yanma eyleminin devam ettiği gözlemlenmiştir, Şekil 3.38 (g) ve (h).



Şekil 3.38. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

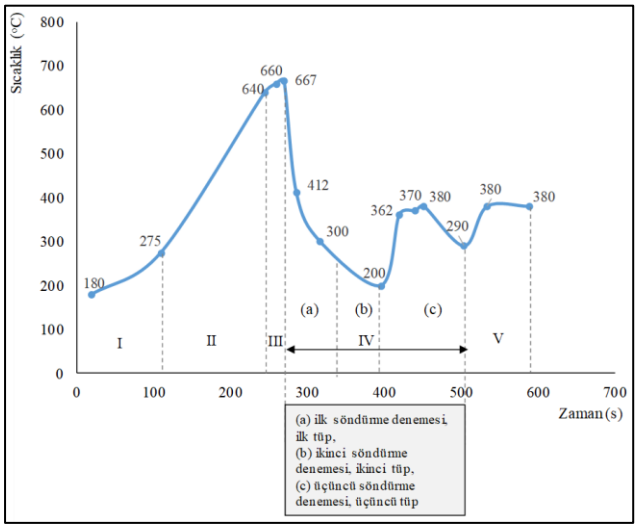
649. s'de bataryanın üst kapağı patlayarak gövdeden ayrılmıştır. Saçılan hücrelerin termal kaçak mekanizmasına devam ettirdiği ve patlamalar gözlemlenmiştir Şekil 3.39 (a) ve

(b). 649. s'den sonra 11 adet patlama sesi duyulmuştur. Her hücre kendi başına termal kaçak mekanizmasına girdiği ve bunun etkisini 804. s'e kadar koruduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.39 (c), (ç) ve (d)'de patlayan hücreler gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Kullanılan organik tabanlı sıvı söndürme maddesi ile yapılan 3 müdahale sonrası, sıcaklığın bir miktar azaldığı ancak bunun termal kaçak mekanizmasının reaksiyonunun kırmaya yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Temal kaçak mekanizması ile birlikte gelişen olaylar ve alınan sıcaklık ölçümleri Şekil 3.40'da özetlenmiştir.

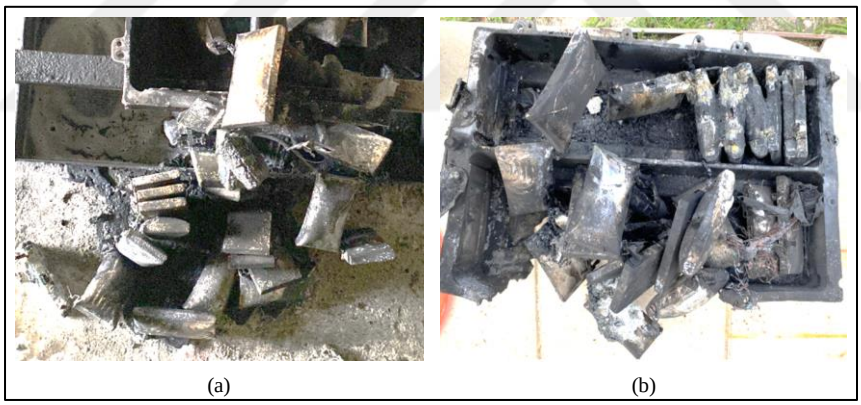


Şekil 3.40. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Şekil 3.40'da belirtilen alanlar; I. ilk reaksiyonların oluşumu ve ısınma, II. gaz çıkışı ve patlamalar, III. termal kaçak alevleri, IV. termal kaçak mekanizmasını kırma girişimi; (a)

ilk deneme, ilk tüp, (b) ikinci deneme, ikinci tüp, (c) üçüncü deneme, üçüncü tüp, V. termal kaçak devam etmesi şeklinde yorumlanmıştır.

Organik sıvının uygulandı durumda sıcaklığın bir miktar azaldığı ancak termal kaçağın devam ettiği, bataryanın içinde meydana gelen kısa devre nedeniyle batarya alt tabanını erittiği ve batarya hücrelerinin bu alt kapaktan düştüğü gözlemlenmiştir. Pil hücrelerinin düştüğü yerde de termal kaçak mekanizmasına devam ettiği tespit edilmiştir. Termal kaçak nedeniyle iç basıncın artmasıyla birlikte batarya üst kapak patlayarak ayrılması gözlemlenmiştir. Yanma eylemi sonrası bataryaların durumu Şekil 3.41'de verilmiştir. Bazı hücrelerin şişmediği bazı hücrelerin ise şiştiği halde patlamamış olduğu gözlemlenmiş, ayrıca kısa devre oluşumunun batarya döküm alt kısmını eritebildiği gözlemlenmiştir. Termal kaçak mekanizmasının oluşumu, batarya gövdesini eritmesi ve patlaması ele alındığında, termal kaçak mekanizmasının başlamasından önce kısa devreler oluşumuyla birlikte etkin sıcaklık düşümü, yangının yayılımını önlemek için elzem olduğu düşünülmektedir.



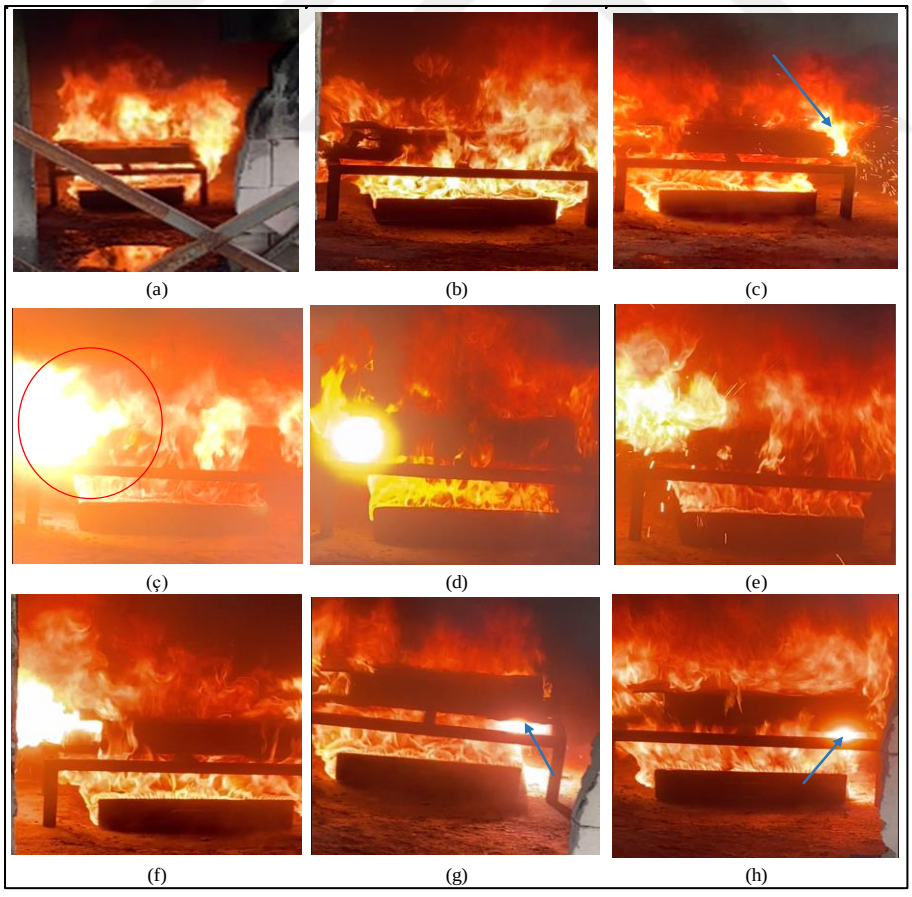
Şekil 3.41. Yanan batarya içindeki hücreler ve hasar gören batarya alt tablası

3.4.1.8. Deney No: 8

HV bataryanın yanma karakteristiği ve inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyi ile EV taşıt üretim tesislerinde meydana gelebilecek yangınlara ilk müdahale söndürme maddesinin doğru bulunması, üretimin ve çalışanların güvenliğini etkilemesi amacıyla önemlidir.

Doğru söndürme maddesi, aracın kullanım süresi içinde çıkacak yangına doğru müdahalede bulunulmasını da sağlayacağından önemlidir. Bu nedenle farklı yapılarda

söndürme etken maddeleri deneylerde kullanılarak söndürme etkinliği test edilmiştir. Deneyde kullanılan bataryanın SOC (pil şarj seviyesi) % 88 civarında olduğu saptanmıştır. Deney hızlandırıcının tutuşturulması ile başlamış, söndürme eylemi, süreç video kaydı alınarak aşamaları kayıt edilmiştir. Tutuşturma başladıktan 42 s sonra batarya 547 ℃ sıcaklığa ulaşmıştır. 79. s'de eriyen plastik aksamdan damlama sesleri duyulmuştur Şekil 3.42 (a)'da bu durum gösterilmiştir. 113. s'de batarya 615 ℃ sıcaklığa ulaştığı ölçülmüştür. 140. s'de ilk kısa devre kaynaklı patlamalar duyulmuştur, Şekil 3.42 (b). 236. s'de basınçlı gaz çıkış sesi duyulmuştur. 336. s'de bataryanın sağ yan boşluğundan patlama gelişmiştir. 403. s'de bir diğer patlama ise bu kez bataryanın sol yan boşluğundan gelişmesi ile birlikte termal kaçak mekanizması görülmüştür, Şekil 3.42 (c). 405. s'de yine bataryanın sol yan boşluğundan şiddetli patlamalar ile birlikte termal kaçak mekanizmasının devamı gözlemlendi, Şekil 3.42 (ç), (d) ve (e)'de gösterilmiştir. Kısa devre kaynaklı patlamalar 452. s'e kadar devam etmiş, hemen ardından sol boşluğundan basınçlı alev çıkışı gözlemlenmiştir, Şekil 3.42 (f).



Şekil 3.42. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

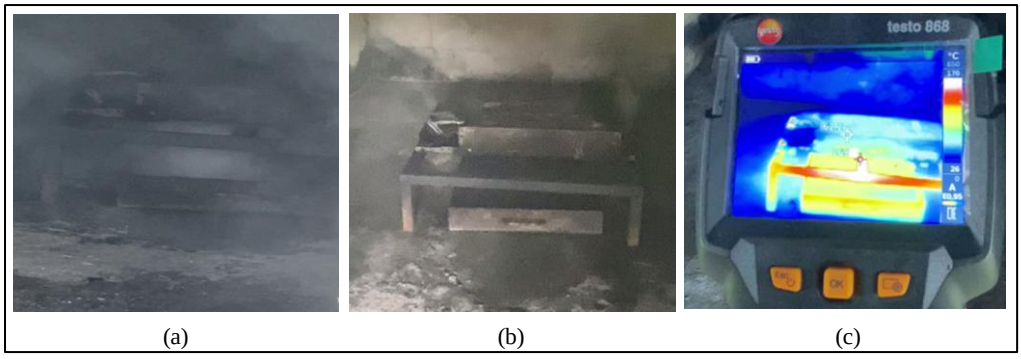
Bataryadan basınçlı gaz tahliye sesi duyulması ile birlikte patlamaların bataryanın taban sacında da meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunların kısa devre kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir. Bataryanın delinen üst ve alt koruma sac kapaklarından basınçlı gaz çıkışı ile birlikte basınçlı alev çıkışı da gözlemlenmiştir. Şekil 3.42 (g) ve (h)'de taban sacının delinmesi esnasındaki kısa devre kaynaklı patlamalar gösterilmiştir.



Şekil 3.43. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Şekil 3.43 (a)'da termal kaçak mekanizması devam ederken delinen alt ve üst koruma sacından çıkan basınçlı alev hüzmeleri gösterilmiştir. Bataryanın alt tabanında patlamalar devam ederken bu kez bataryanın yan kısmında iki adet kısa devre kaynaklı patlama gelişmiş, delinen yan koruma sacından basınçlı alev çıkışı gözlemlenmiştir Şekil 3.43 (b). Şekil 3.43 (c)'de kısa devre kaynaklı patlamaların ardından delinen koruma sacının

deliğinden dışarı çıkan basınçlı alev hüzmesi gösterilmiştir. Deneyin bu aşamasında patlama sesleri ve termal kaçak mekanizması devam ederken kullanılacak inorganik tabanlı sıvı söndürme maddesinin denenmesine karar verilmiştir. Söndürme eylemi bataryanın tutuşmasından 507. s sonra bataryanın sağ kısmından başlatılmıştır Şekil 3.43 (ç). Söndürme eyleminin sağ yandan başlamasıyla birlikte alevler bataryanın sol yanından süpürerek dışarı çıkmaya başlamıştır. Çıkan alevlerin boyutu termal kaçak mekanizması devam ederken çıkan alevlerden daha kısa süreli ancak daha şiddetli olduğu gözlemlenmiştir. Söndürme eylemi 514. s'e kadar bataryanın sağ yan boşluğundan devam ettirildikten sonra bu kez sol yan boşluğuna geçilerek söndürme eylemine devam ettirilmiştir. Sol yandan başlayan müdahale ile bu kez alevlerin sağ batarya boşluğundan ve diğer tüm boşluklardan birlikte ancak şiddeti azalarak çıktığı gözlemlenmiştir. Söndürme eylemi 520. s'e kadar sol yandan devam ettirilmiş, ardından bataryanın sağ tarafına tekrar geçilerek söndürmeye devam edilmiştir. Şekil 3.43 (d) ve (e). Söndürme ajanı bataryanın içine nüfus etmesiyle alev şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bataryanın söndürme eylemi her iki batarya boşluğundan gerçekleştiğinde buradan çıkan alevlerin kaybolduğu halde kısa devre nedeniyle oluşan deliklerden, taban sacından aşağı doğru alevlerin devam ettiği gözlemlenmiştir, Şekil 3.43 (f). İlk tüp ile söndürme eylemine 565. s'e kadar devam ettirilmiş, söndürme tüpünün bitmesi ile birlikte, itfaiye eri dışarı çıkarak, Şekil 3.43 (g) ikinci yangın tüpünü almaya çıkmıştır. Bu esnadaki bataryanın durumu Şekil 3.43 (h)'de verilmiştir.



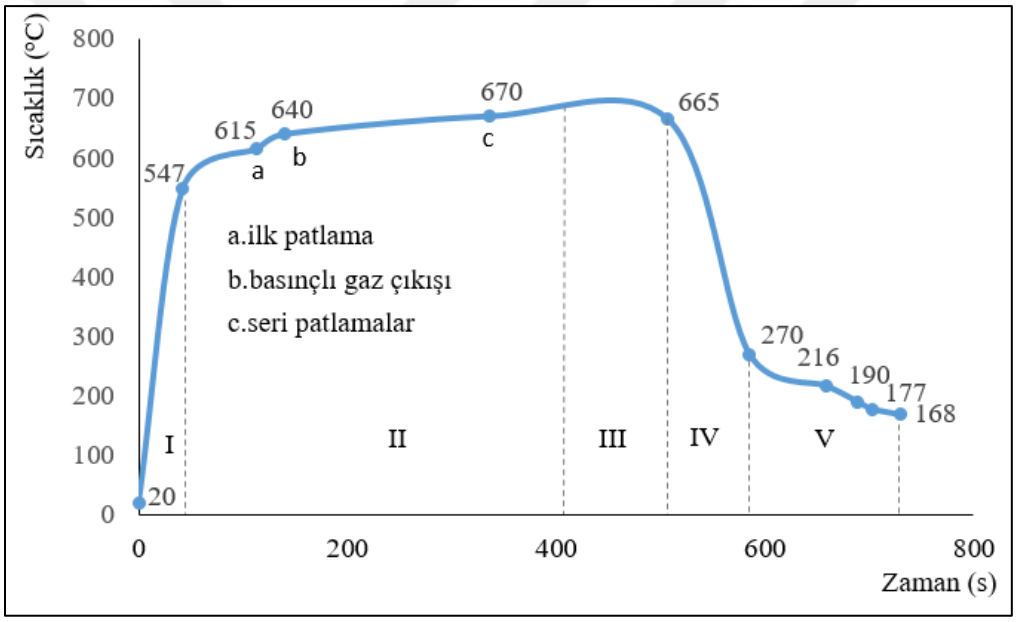
(a) (b) (c)

Şekil 3.44. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

572. s'de alevler kendiliğinden sönmüştür. İkinci tüp ile müdahaleye gerek kalmamıştır. Bu durum 3.44 (a)'da gösterilmiştir.

Batarya yangınının söndürülmesini izleyen aşamasında söndürme maddesinin ısıyı uzaklaştırma özelliği gözlemlenmeye başlanmıştır. Yangının söndürülmesi ardından termal kamera ile bir dizi sıcaklık ölçümü yapılmaya başlanmıştır. Bu durum 3.44 (b) ve (c)'de gösterilmiştir Bataryanın sönmesine müteakip alınan ölçümlerde; 585. s'de sıcaklık 270 ℃, 659. s'de 216 ℃ 'ye düşmüştür. 688. s'de sıcaklık 190 ℃'ye, 703. s'de 177 ℃′ye düşmüştür. Son alınan ölçüm ise 729. s'de 168 ℃ olarak ölçülmüştür.

Termal kaçak mekanizması başlaması ile birlikte kısa devre kıvılcımları ve patlamaları devam ederken inorganik söndürme maddesi uygulanarak termal kaçak mekanizası durdurulmuştur. Temal kaçak mekanizması ile birlikte gelişen olaylar ve alınan sıcaklık ölçümleri Şekil 3.45'de özetlenmiştir.



Şekil 3.45. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Şekil 3.45'de belirtilen alanlar; I. ilk reaksiyonlar ve ısınma, II. gaz çıkışı ve patlamalar, III. termal kaçak alevleri, IV. termal kaçak mekanizmasının inorganik sıvı madde ile kırılması, V. soğutma aşaması şeklinde yorumlanmıştır.

Bataryanın yanmasında ilk olarak batarya hücrelerinin etrafında olan kabloların, batarya izolasyon plastik kapaklarının erimesiyle ve bataryanın her iki tarafındaki kablo boşluklarından dışarıya yanması şeklinde gelişmiştir. Bataryanın üzerinde izolasyon kapaklarının erimesiyle birlikte hücreler ile metal kapak arasında bir izolasyon örtüsü kalmamıştır. Bu durum Şekil 3.46'da gösterilmiştir.



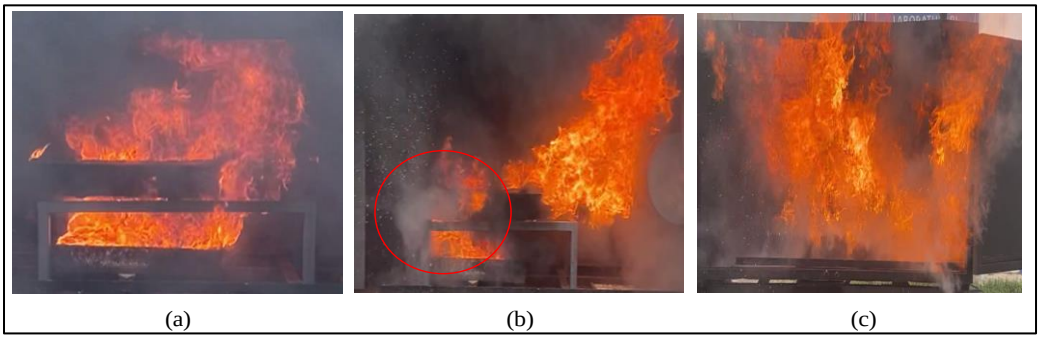
Şekil 3.46. Plastik aksam, kablo izolasyonu, metal aksam hasarları

Termal kaçak mekanizması, bataryaların şişmeye başlaması ve hücrelerin şişerek metal ana gövdeye değmesiyle kısa devre oluşumu ardından hemen başlamamıştır. Batarya hücrelerinin şişmesi metal üst kapak ve alt kapağa izolasyonsuz teması ile kısa devre oluşturmuş, bu kısa devre nedenli elektrik arkı patlamalar şeklinde gözlemlenmiştir. Kısa devre kaynaklı patlamalar koruma sacı üzerinde delinmelere yol açmıştır. Bu delinmeler

taban sacında daha büyük ve sayısının daha fazla olmasının müdahale esnasında bir miktar gecikmeye neden olduğu yorumlanmıştır. Delinen koruma kapağından basınçlı gaz çıkışı ve basınçlı alev çıkışı gözlemlenmiştir. Müdahale inorganik tabanlı söndürme maddesi ile gerçekleştirildiğinde, termal kaçak mekanizması zincir reaksiyonu tek tüp kullanarak başarılı olarak sona erdirilmiştir. İnorganik sıvısının uygulanması ardından batarya sıcaklığı 91 s içinde 102 ℃ 'ye düşürmüştür. İlgili sıvının uygulanması gaz çıkışının bastırdığı gözlemlenmiştir.

3.4.1.9. Deney No: 9

HV bataryanın termal kaçak mekanizmasının başında inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyi ile, batarya bloğunun açıkta olduğu ve üst ile alt koruma kapaklarının takılı olmadığı durumda, EV taşıt üretim tesislerinde meydana gelebilecek yangınlara ilk müdahale söndürme maddesinin doğru bulunması, üretimin güvenliği kadar çalışanların da güvenliğini etkilediğinden önemlidir. LIB geriliminin 3,7 volt olduğu göz önüne alınarak normal operasyon sınırları içinde olduğu ve SOC % 88 civarında olduğu saptanmıştır. Tutuşturma başladıktan 38 s sonra bataryanın plastik aksamları eriyerek bataryadan damlamaya başlamıştır. 146. s'de ilk kısa devre kaynaklı patlama sesi duyulmuştur. 211. s'de kısa devre kaynaklı patlamalar ard arda duyulmuştur, Şekil 3.47 (a) ve (b)'de bu patlamalar gösterilmiştir. Termal kaçak mekanizmasında görülen yoğun alev hüzmelerinin başlamasından önce söndürme eylemine karar verilmiştir. İnorganik tabanlı söndürme sıvısı ile söndürme eylemi 215. s'de başlatılmıştır Şekil 3.47 (c)'de söndürmeye karar verildiği durum gösterilmiştir.


(a) (b) (c)

Şekil 3.47. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Söndürme eyleminin süpürdüğü doğrultuda alevlerin yoğun bir şekilde dışarıya çıktığı görülmüştür. Bataryanın söndürülmesi 269. s'de gerçekleşmiştir 3.48 (a). Söndürmenin

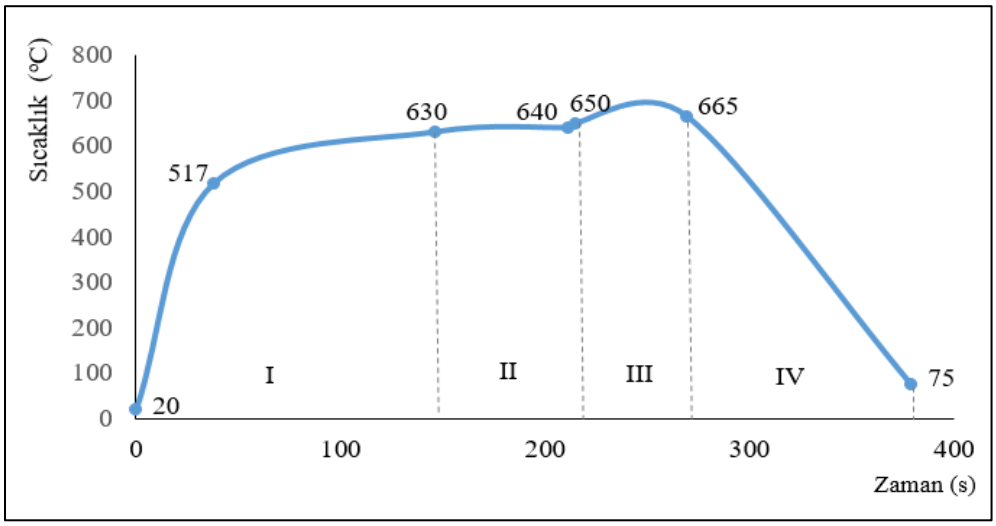
sonuçlanması ardından, 379. s'e kadar duman çıkışı devam etmiştir. 379. s'de bataryanın sıcaklığı 75 ℃ olarak ölçülmüştür, Şekil 3.48 (b).



(a) (b)

Şekil 3.48. Söndürme eyleminin başlaması

Termal kaçak mekanizması başlamadan, kısa devre kıvılcımlarının görülmesiyle inorganik söndürme maddesi uygulanmıştır. İnorganik sıvı uygulanmış bataryanın termal kaçak mekanizmasına girişi engellemiş ve bataryayı söndürmüştür. Söndürme sıvısının uygulanması ardından batarya sıcaklığı 50 s içinde 75 ℃ mertebesine indirebilmiştir. İlgili sıvının uygulanması gaz çıkışının bastırılmasını sağlamıştır. Bataryanın yanma mekanizması ile birlikte gelişen olaylar ve alınan sıcaklık ölçümleri Şekil 3.49'da özetlenmiştir.



Şekil 3.49. Bataryanın yanma aşamaları ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Şekil 3.49'da belirtilen alanlar; I. ilk reaksiyonlar ve ısınma, II. gaz çıkışı ve seri patlamalar, III. termal kaçak mekanizmasının sıvı madde ile kırılması, IV. soğutma aşaması şeklinde yorumlanmıştır.

3.4.1.10. Deney No: 10

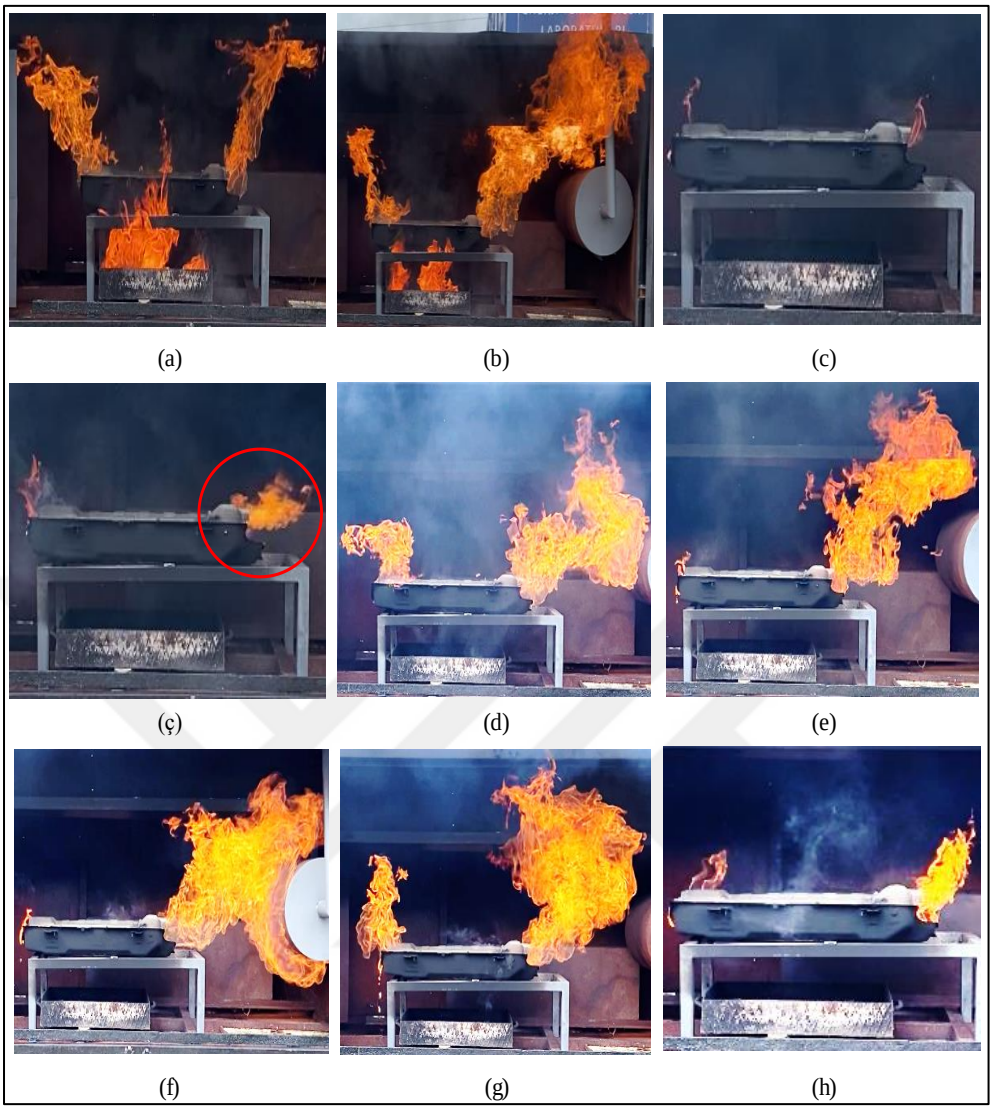
İnorganik tabanlı söndürücü uygulanmış HEV bataryanın tekrar tutuşma davranışı ve inorganik tabanlı söndürme maddesi ile termal kaçak zincir reaksiyonu kırma deneyinde; Li-ion batarya barındıran taşıt yangını söndürüldüğünde dahi uzun zaman sonra tekrar tutuşabileceği saptanmıştır. Bu sebeple termal yönden bataryanın söndürme eylemi ardından izlenmesi ve tekrar tutuşmaması için sıcaklığın hızlıca azaltılması gerekmektedir. Doğru söndürme maddesi, aracın kullanım süresi içinde çıkacak yangına doğru müdahalede bulunulmasını da sağlayacağından önemlidir. Aynı söndürme maddesinin sıcaklığı kısa sürede azaltması da çok önemlidir. Bu nedenle bu deneyde, inorganik tabanlı söndürme maddesi uygulanmış bir HEV bataryanın tutuşturulmaya çalışılması ve söz konusu maddenin tekrar tutuşma süresinde bir değişikliğe sebep olup olamayacağı araştırılmıştır. Pillerin geriliminin 3,7 volt olduğu ölçülmüştür. SOC % 88 civarında olduğu saptanmıştır. Deney hızlandırıcının tutuşturulması ile başlamış, söndürülene kadarki süreç video kaydı alınarak aşamaları kayıt edilmiştir. Tutuşturma başladıktan 60. s'de bataryanın plastik aksamları erimeye ve batarya üst sacı ile tabanı arasından sızarak tavaya damlamaya başlamıştır. Bu esnada kaynama ve damlama sesleri duyulmuştur. 228. s'de bataryanın kablo boşluğundan beyaz duman şeklinde gaz çıkışı başlamıştır. Şekil 3.50 (b)'de beyaz gaz çıkışı kırmızı daire içinde gösterilmiştir. 253. s'de sıcaklığın 445 ℃ ulaştığı ölçülmüştür. 274. s'de kısa devre kaynaklı Şekil 3.50 (c)'de gösterilen ilk kıvılcım oluşması gözlemlenmiştir. 286. s'de diğer bir kısa devre kaynaklı kıvılcım daha gözlemlenmiştir. 322. s'de kablo geçişleri ve üst kapak birleşim noktalarından alev çıkışı gözlemlenmiştir. Yanan malzemenin plastik parçalar olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.50 (ç)'de bu durum gösterilmiştir. 330. s'de ard arda 4 adet kısa devre kaynaklı kıvılcım oluşmuştur. Bu durum Şekil 3.50 (d) ve (e)'de gösterilmiştir. 364. s'de ard arda 4 adet kısa devre kaynaklı kıvılcım oluştuğu gözlemlenmiştir. 440. s'de termal kaçak mekanizması başladığı görülmüştür. Şekil 3.50 (f)'de kırmızı daire içinde gösterilmiştir. Termal kaçak mekanizmasının gözlemlenmesi ile birlikte basınçlı bir gaz salınım sesi duyulmuştur. Termal kaçak bataryanın kablo geçişlerinin olduğu boşluktan dışarı doğru gelişmiştir. Bu durum Şekil 3.50 (g) ve (h)'de gösterilmiştir. Termal kaçak mekanizması 14 s boyunca devam etmiş ancak alev boyu ve basınçlı gaz sesi azalmıştır.



Şekil 3.50. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

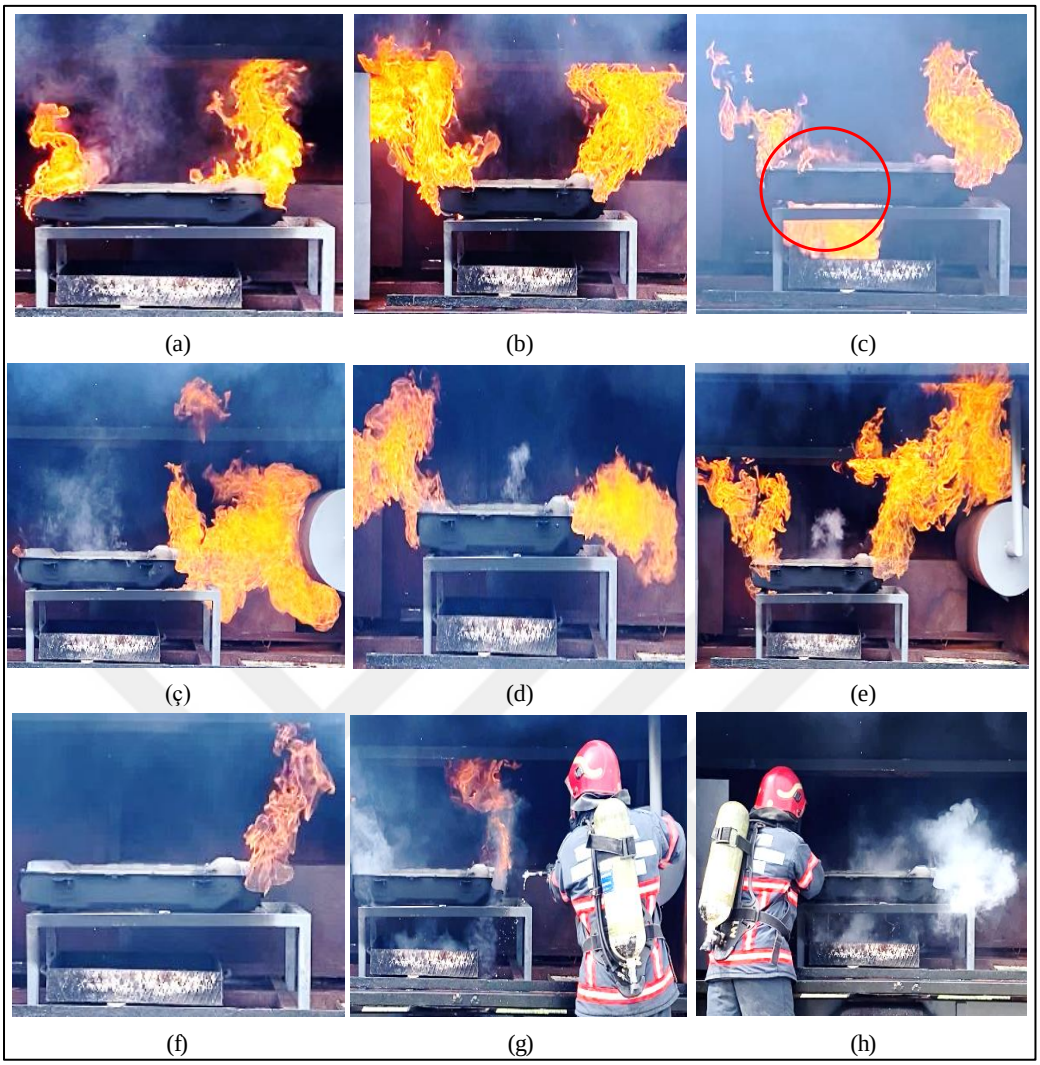
Şekil 3.50 (g)'de ilk termal kaçak oluşumundan 14 s sonra basınçlı alev boyunun durumu gösterilmiştir. 454. s'de termal kaçak mekanizması birdenbire şiddetlenerek etkisini arttırmış, alev boyu ve basınçlı gaz çıkışı şiddetlenmiştir. Bu durum Şekil 3.50 (h)'de gösterilmiştir.

457. s'de termal kaçak mekanizması bataryanın her iki ucunda gelişmiştir. Bu durum Şekil 3.51 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. 459. s'de termal kaçak mekanizması şiddetini arttırmış, bu anda 8 adet ardışık kısa devre kaynaklı patlama sesi duyulmuştur. 549. s'de şiddetini ani olarak azaltmış ve sönme eğilimine geçtiği izlenimi oluşturmuştur. Bu durum Şekil 3.51 (c)'de gösterilmiştir. Bu esnada ölçülen sıcaklığın 420 ℃ olduğu ölçülmüştür.



Şekil 3.51. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Stabil alev boyu 568. s'e kadar sürmüş, kendi kendine sönmeye başladığı izlenimi oluşturmuştur. 566. s'de termal kaçak mekanizması tekrar şiddetlenerek başlamıştır. Basınçlı gaz çıkış sesi duyulmuştur. Şekil 3.51 (ç)'de gösterilmiştir. Termal kaçak mekanizması bu aşamadan sonra şiddetini arttırarak devam etmiş ve bataryanın her iki ucundan basınçlı şekilde alevlerin kablo giriş boşluğundan sıvı halde plastik aktığı gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.51 (d), (e), (f) ve (g)'de gösterilmiştir. 654. s'de alev şiddetini yitirmiş, sönme eğilimine girdiği izlenimi oluşmuştur. Bu esnada tekrar ardışık olarak 4 adet kısa devre kaynaklı patlama sesleri duyulmuştur.

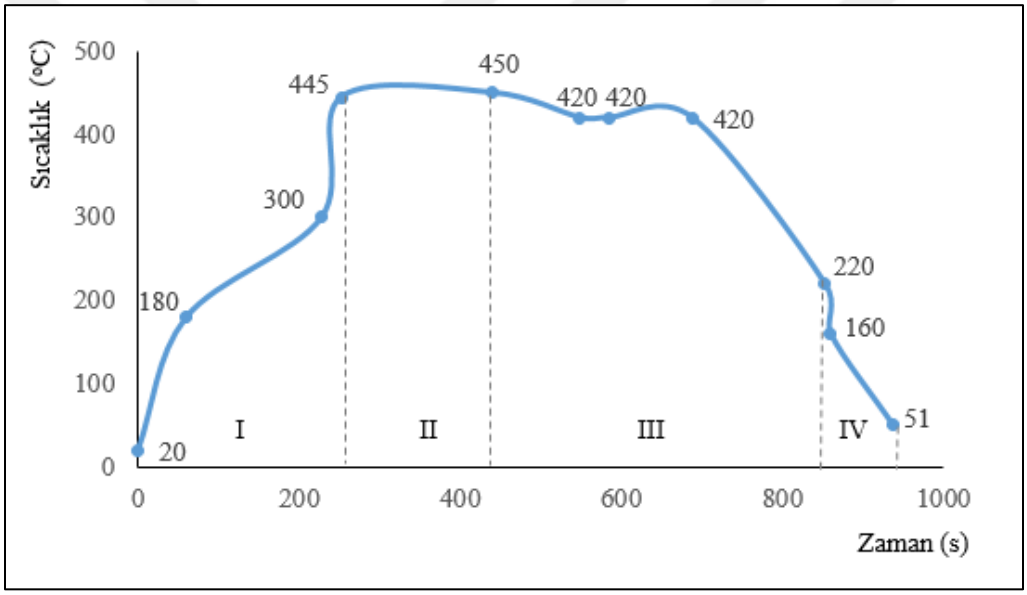


Şekil 3.52. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Bu durum Şekil 3.52 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. 663 s'de alev şiddetini tekrar arttırmış, bu esnada kısa devre kaynaklı patlama sesleri duyulmuştur. 675. s'de, bataryanın kapalı ve döküm olan alt kapağının bulunduğu noktadan termal kaçak mekanizmasının aşağı doğru basınçlı çıkışı gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.52 (c)'de de kırmızı daire içinde gösterilmiştir. 801. s'e kadar stabilizesini koruyan yanma, bu anda tekrar şiddetlenmiştir. Bataryanın her iki ucundan termal kaçak oluşumu basınçlı gaz çıkışı ile birlikte gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.52 (ç), (d) ve (e)'de gösterilmiştir. 840. s'de alev boyu ve termal kaçak şiddetini yitirmiştir. Bu esnada söndürmeye karar verilmiştir. Şekil 3.52 (f)'de gösterilmiştir.

Termal kaçak mekanizmasına müdahale eylemi inorganik sıvı içeren söndürücü kullanılarak gerçekleştirilmiş olup 13 s (853. s'e kadar) boyunca sürmüştür. Şekil 3.52

(g) ve (h)'de söndürme eylemleri gösterilmiştir. Söndürme eylemi esnasında sıcaklık ölçülmüş ve müdahale sonu (853. s) batarya sıcaklığı 220 ℃ olarak ölçülmüştür. Devam eden 860. s'de (7 s içinde) 160 ℃′ ye düştüğü ölçülmüştür. Söndürme eylemi tamamlandıktan 937. s'de sıcaklık 51 ℃′ ye düştüğü ölçülmüştür. Bataryadan bir süre daha gaz çıkışı gözlemlenmiştir. İnorganik sıvının yüzeyine tatbik edilmiş batarya tekrar yakılmaya çalışıldığında, termal kaçak mekanizmasının başlamasında belirgin bir gecikme oluşturduğu gözlemlenmiştir. Sıvı uzun süre geciktirici özelliğini korumuş, ardından termal kaçak mekanizmasının oluşumunu engellememiştir. Bataryanın yanma mekanizması ile birlikte gelişen olaylar ve alınan sıcaklık ölçümleri Şekil 3.53'de verilmiştir.



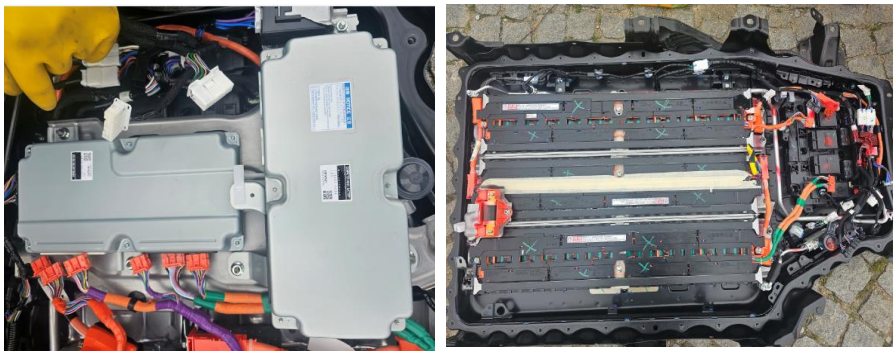
Şekil 3.53. Termal kaçak mekanizması ve müdahale sıcaklık zaman grafiği

Bataryanın termal kaçak mekanizmasının şiddeti değişken olmuştur, uygulanmış sıvının etkisi olduğu düşünülmektedir. Bir önceki deneye göre termal kaçak mekanizmasının oluşumu belirgin olarak ötelenmiştir. Termal kaçak mekanizması yaşanan bataryanın söndürülmesi, inorganik tabanlı sıvı uygulanmış bataryada daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Kullanılan inorganik tabanlı söndürme sıvısı, termal kaçak eylemi devam eden bataryada söndürme eylemini başarmıştır. İnorganik tabanlı söndürme sıvısı, termal kaçak mekanizmasının yaşandığı bataryada soğutma etkisi oldukça hızlı ve yoğun olmuştur.

3.4.1.11. Deney No: 11

PHEV bataryanın iç kısa devre nedeniyle tutuşma davranışı deneyinde; PHEV, BV, HV taşıtlarda bulunan Li-ion bataryaların, üretim hatası, şarj nedeniyle oluşan kısa devreler gibi aracın durduğu yerde yanması ile sonuçlanan durumları olduğu bilinmektedir. Bu deney ile gerçek bir PHEV bataryanın kendi enerjisi ile kısa devre oluşturularak yanmaya zorlanması ve sıcaklığın zaman içindeki değişimi ölçülerek termal kaçak mekanizmasına girip girmeyeceği denenmiştir. Böylelikle içsel etkilerin termal kaçak mekanizmasına PHEV taşıtlardaki etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

Deney olarak PHEV bataryasının seçilmesinin sebepleri; ilki, tam elektrikli taşıtların (BV) henüz yaygınlaşmaması ve hibrit taşıtların (HV) yerini artık PHEV taşıtlara bırakmaya başlamış olmasıdır. İkinci sebep ise HV taşıtların batarya enerjilerinin düşük olması sebebiyle, PHEV bataryanın BV taşıt bataryaları öncesi batarya enerji kapasitesi olarak tam ortada kalması gösterilebilir. Batarya açık alanda demir sehpanın üzerine konulmuştur. Bu aşamadan sonra ise kısa devre düzeneği oluşturulmaya başlanmıştır. Deney düzeneğinde, ilk adım kompozit batarya üst kapağının açılarak batarya modüllerinin ortaya çıkartılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri tümü üst kapak çıkmışken modüller üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu durum Şekil 3.54 (a)'da gösterilmiştir. Bu deneyde kısa devre yapılacağından ötürü, ikinci adımda bataryanın kendini koruma mekanizması olan BMS in devreye girmemesi için BMS ve sigortalar sökülmüştür.

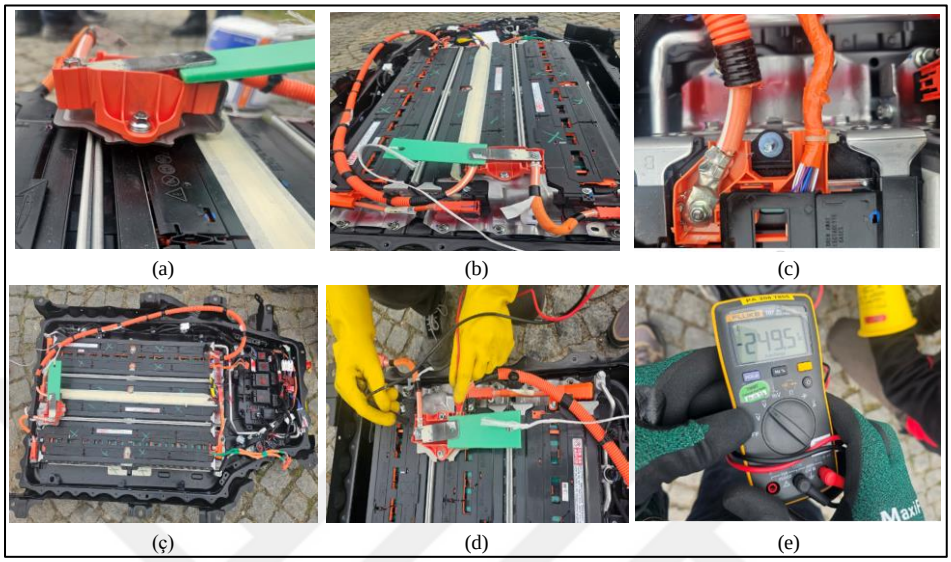


(a) (b)

Şekil 3.54. BMS ve sigortaların sökülmesi

BMS söküldükten sonra batarya Şekil 3.54 (b)'de gösterilmiştir. Bundan sonraki adımda kısa devre mekanizması kurulmuştur. Bunun için bataryada kullanılan üç modülün

enerjisini taşıyan bir başka kablo (turuncu), iki uca bağlanmış, bağlantının ucuna ise bir plastik (yeşil) parça takılarak uzaktan bir ip vasıtasıyla (çekildiğinde devre dışı kalacak şekilde) bir düzenek kurulmuştur. Düzenek Şekil 3.55'(a), (b), (c), (ç)'de gösterilmiştir.



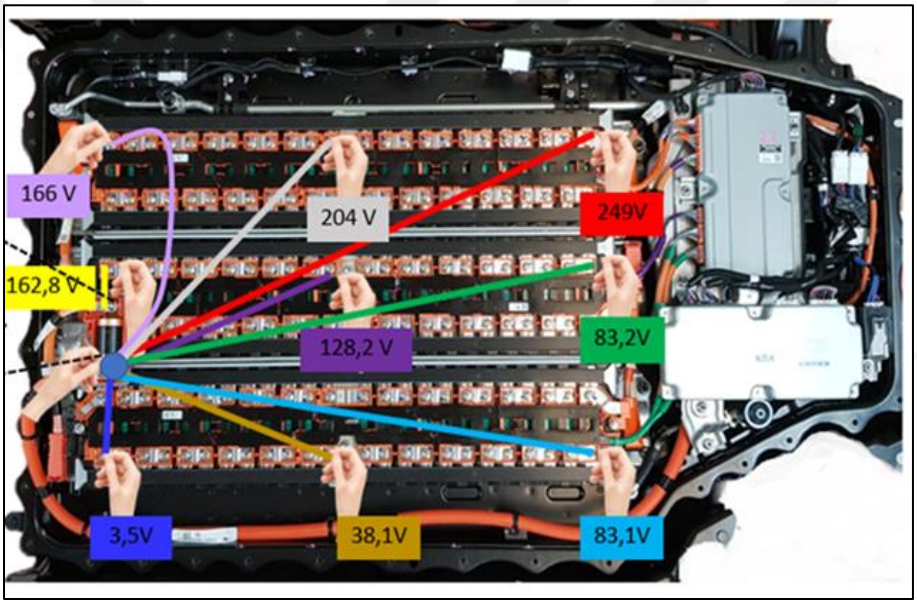
Şekil 3.55. Kısa devre düzeneği

Bataryanın doluluk oranı (SOC) ölçülmesi için voltmetre ile üç modülün birleştiği noktadan ölçüm alınmıştır. Ölçüm alınması Şekil 3.55 (d) ve (e)'de gösterilmiştir. Bataryanın 88 V olan tek modül gerilim değeri üç modül birleştirildiğinde 264 V nominal gerilime sahiptir. Ölçülen 249,5 V gerilim yaklaşık olarak % 94,5 olduğu söylenebilir. Deney ipin çekilmesi ve kutupları birbirinden ayıran plastik malzemenin aradan çekilmesi ile başlamış, deneyin her kademesi video kaydı alınmıştır. Deneyin başlangıcı Şekil 3.56'de gösterilmiştir.



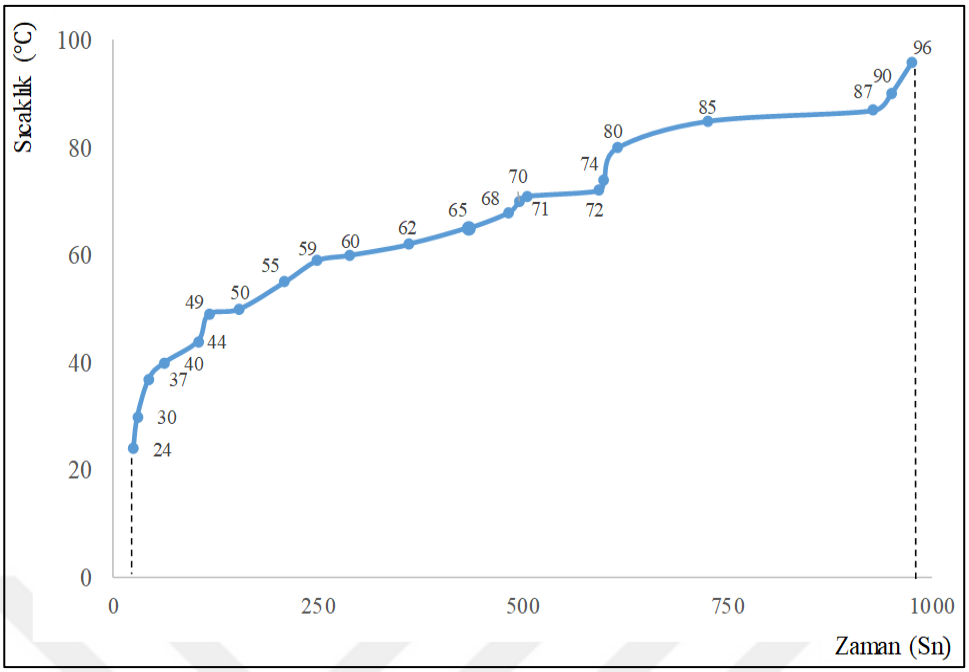
Şekil 3.56. Deneyin başlangıç aşaması

Bataryanın kapağı açıkken yüzeyden ve üç modülde en yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir. Buna göre deneyin başlangıcında 25. s'de 24 ℃ olarak ölçülmüştür. Bunu takip eden saniyelerde alınan en yüksek sıcaklık ölçümleri sonuçları Şekil 3.56.'da verilmiştir. Deney bitirilene kadar 22 ölçüm alınmıştır. Kısa devrenin gerçekleştiği modülde sıcaklık en fazla 96 ℃ okunurken, orta modülde en fazla 75 ℃ okunmuş ve en dış modülde ise en fazla 60 ℃ okunabilmiştir. Deney gerçekleştirilirken gaz çıkışı, yanma, duman çıkışı veya mekanik olarak bir şişme hareketi gözlemlenmemiştir. Sıcaklık değerinin deneyin devamında 96 ℃ 'de kalması ve yükselmemesi nedeniyle 1370. s'de kesilmiştir. Bataryanın çeşitli noktalarından alınan gerilim ölçümleri aşağıda Şekil 3.57'de gösterilmişir.



Şekil 3.57. Bataryanın farklı noktalarından gerilim ölçümü

Bataryanın doluluk oranı (SOC) % 94,5 olduğu yapılan ölçümde saptanmıştır. Deneyde iç enerji, oluşturulan kısa devrenin termal kaçak mekanizmasını oluşturmaya yetmemiştir. Oluşturulan kısa devre neticesinde sıcaklık zaman içerisinde kademeli olarak artmış ancak termal kaçak mekanizmasının başlaması için gerekli olan sıcaklık seviyesine çıkmamıştır. Uzun süre 96 ℃ ve üzerine çıkmayan sıcaklık deneyin bitirilmesine karar verilmiştir. Şekil 3.58'de sıcaklığın zaman içindeki değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.58. Batarya kısa devre ardından alınan sıcaklıklar ve zaman grafiği

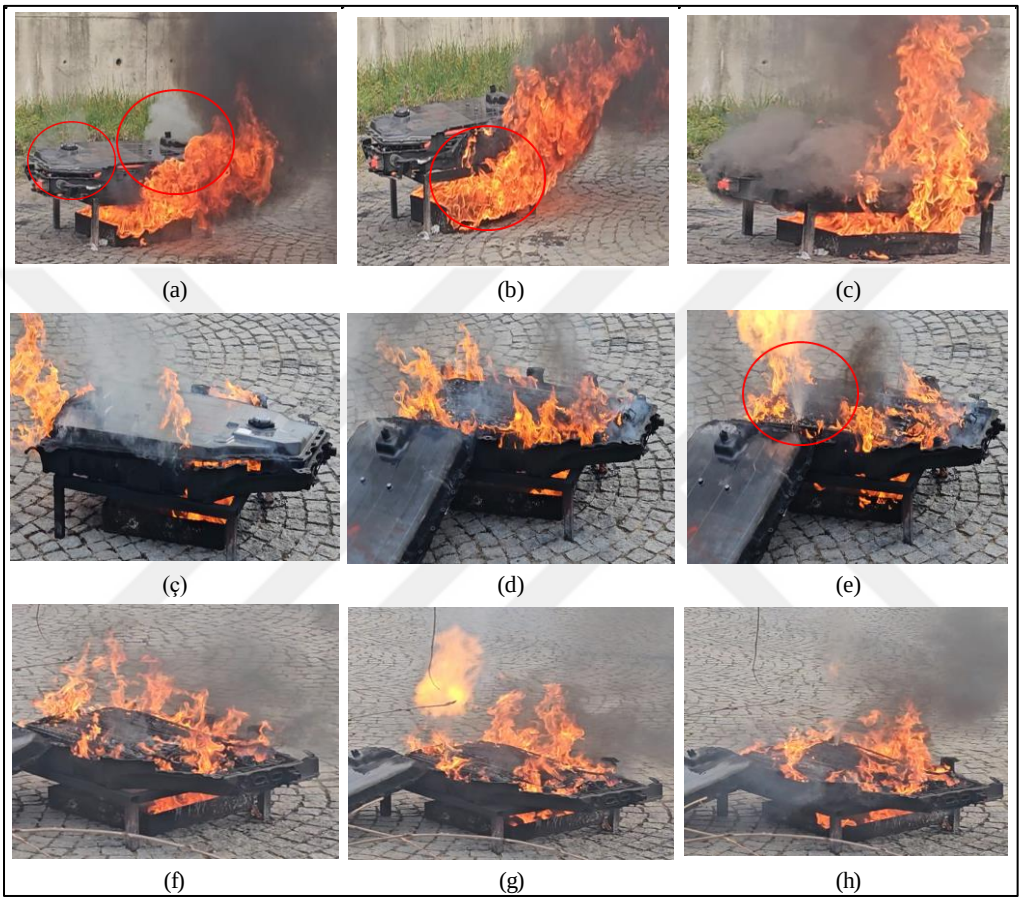
Oluşturulan kısa devre, bataryanın sıcaklığının yükselmesine sebep olmuştur. Sıcaklık en fazla 96 ℃'ye çıkmıştır. SOC seviyesi yüksek olmasına rağmen oluşturulan kısa devre bataryanın termal kaçak mekanizmasına girmesini sağlayamamıştır. Sıcaklık kısa devrenin oluştuğu modülde 96 ℃'ye çıktığında, diğer modüllerde de sıcaklık artışına sebep olmuştur.

3.4.1.12. Deney No: 12

PHEV bataryanın yanma karakteristiği, termal kaçak reaksiyonlarının inorganik tabanlı maddesi ile durdurulması deneyinde; PHEV, BV, HV taşıtlarda bulunan Li-ion bataryaların, aracın durduğu yerde yanması ile sonuçlanan durumları olduğu bilinmektedir. Bu deney ile batarya bloğunun açıkta olduğu, PHEV taşıt üretim tesislerinde meydana gelebilecek yangınlara ilk müdahale söndürme maddesinin doğru bulunması, üretimin güvenliği kadar çalışanların da güvenliğini etkilemektedir. Doğru söndürme maddesi, aracın kullanım süresi içinde çıkacak yangına doğru müdahalede bulunulmasını da sağlayacağından önemlidir.

Bu nedenle HV bataryada etkin söndürme yaptığı denenmiş olan inorganik söndürme etken maddesi deneylerde kullanılarak PHEV üzerinde söndürme etkinliği test edilmiştir.

Batarya açık alanda demir sehpanın üzerine konulmuştur. Bu aşamadan sonra ise yangın tavasındaki hızlandırıcının tutuşturulmasıyla deney başlamıştır. 50. s'de bataryanın plastik parçalarından erime sesleri gelmeye başladığı duyulmuştur. 91. s'de batarya üzerinden beyaz duman çıkmaya başladığı gözlemlenmiştir, bu durum Şekil 3.59 (a)'da gösterilmiştir. 131. s'de bataryadan çıkan beyaz dumanın yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.59. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

146. s'de batarya yanından eriyen plastiklerin damlamaya başladığı gözlemlenmiştir, Şekil 3.59 (b)'de gösterilmiştir. 218. s'de beyaz duman çıkışı batarya geneline yayıldığı görülmüştür, bu durum 757. s'e kadar devam etmiş, durumu daha iyi gözlemleyebilmek için batarya üst kapağı itfaiyeci tarafından demir ekipman ile (bataryanın üst kapağını tutan civatalar önceden çıkartılmıştır) kenara alınmıştır bu durum Şekil 3.59 (d)'de gösterilmiştir. Kapak çıkartılmadan hemen önceki yoğun duman çıkışı Şekil 3.59 (c) ve (ç)'de gösterilmiştir. Üst kapak çıkartılıp kenara alındıktan hemen sonra 761. s'de ilk patlama gerçekleşmiştir. Bu esnada bir başka hücreden basınçlı gaz çıkışı da gözlemlenmiştir. Patlama ve hücreden basınçlı gaz çıkışı Şekil 3.59 (e)'de kırmızı

yuvarlak içinde gösterilmiştir. 773. s'de ikinci patlama gerçekleşmiştir. 782. s'de üçüncü patlama gerçekleşmiştir. Bu patlamadan hemen sonra beyaz duman çıkışı azalmıştır. Şekil 3.59 (f) ve (g)'de bu iki patlama gösterilmiştir. 817. s'de dördüncü patlamanın oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.60 (a)'da gösterilmiştir. 833. s'de beşinci patlamanın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.60. Deneyin gerçekleştirilmesi ve aşamaları

Patlamanın öncesinde hücrelerden çıkan basınçlı gazın tutuşarak alev hüzmesine dönüştüğü kayıt edilmiştir. 838. s'de altıncı patlamanın olduğu gözlemlenmiştir. 846. s'de yedinci patlamanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu patlamanın alevleri henüz devam ederken bu kez 847. s'de sekizinci patlamanın olduğu gözlemlenmiştir. 852. s'de dokuzuncu patlamanın ve 857. s'de onuncu patlamanın olduğu gözlemlenmiştir. 860. s'de onbirinci patlama ile birlikte modülleri bir arada tutan yapı, hücrelerin şişmesi sebebiyle

ayrılarak dağılmıştır Şekil 3.60 (b)'de bu durum gösterilmiştir. Bununla birlikte yangın şiddetlenmiştir. Bu durum Şekil 3.60 (c), (d), (e), (f), (g) ve (h) de gösterilmiştir.



Şekil 3.61. Bataryadan yoğun duman çıkışı

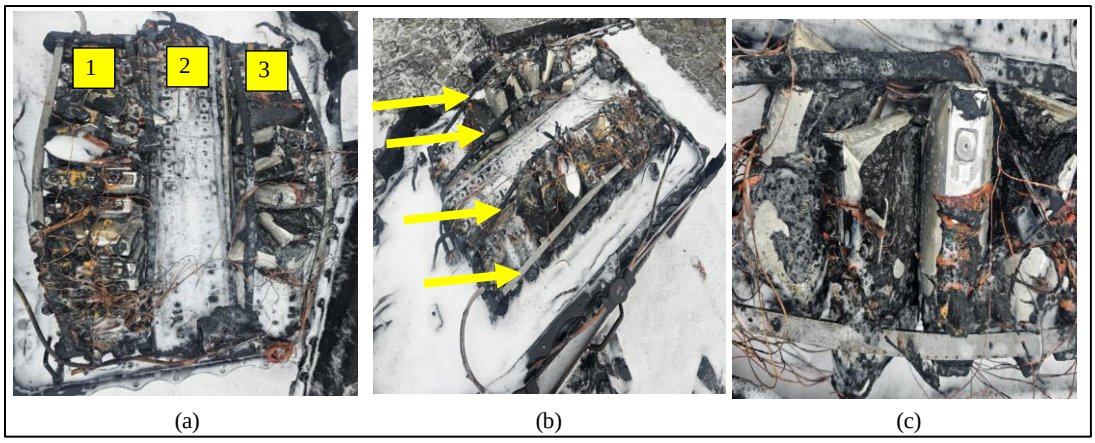
868. s'de on ikinci patlama gerçekleşmiş, ardından 877. s'de ise on üçüncü patlama gerçekleştiği sırada anot ve katot folyoları barındıran yapı dağılarak ortalığa saçılmıştır, bu durum Şekil 3.61 (c)'de gösterilmiştir. 883. s'de on dördüncü patlama Şekil 3.61 (ç)'de gösterilmiştir, hemen ardından 885. s'de ise on beşinci patlama Şekil 3.61 (d)'de gösterilmiştir. 887. s'de söndürme faaliyetine başlanmıştır. Söndürme maddesi olarak bir adet inorganik tabanlı söndürme sıvısı içeren yangın tüpü kullanılmıştır. Bataryanın söndürülmesi Şekil 3.61 (e) ve (f)'de gösterilmiştir. 895. s'de söndürme faaliyeti, termal kaçak zincir reaksiyonunun kırılması ardından bataryanın sönmesi (8 s) ile bitirilmiştir. Bundan sonra soğutma maksadıyla söndürme sıvısı tatbik edilerek batarya yüzeyindeki

sıcaklıklar ölçülmüştür. Söndürme faaliyeti tamamlandıktan sonra uzun bir süre beyaz duman çıkışı devam etmiştir. Beyaz duman çıkışı Şekil 3.61 (g)'de gösterilmiştir. Batarya üzerinde söndürme faaliyeti ardından ölçülen en yüksek sıcaklıklar aşağıda Tablo 3.17'de verilmiştir.

Tablo 3.17. Söndürme ardından zamana bağlı sıcaklıktaki değişim

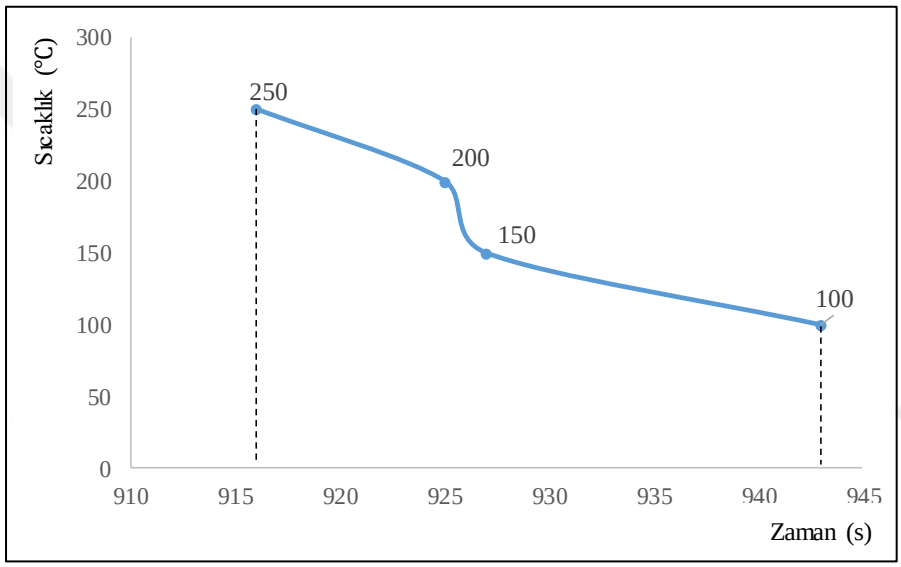
Süre (s)	Sıcaklık (°C)
916	250
925	200
927	150
943	100

Deney esnasında bataryanın üst kapak korumasının erimediği ve formunu değiştirmediği görüldü. Öncesinden üst kapak açılması vasıtasıyla sızdırmazlığını kaybetmiş bataryadan yanma esnasında beyaz duman çıkışı görülmüştür. Yanmanın gözlemlenebilmesi amacıyla batarya üst kapağı çıkartıldığında patlamalar görülmeye başlanmıştır. Bataryanın üst ve alt kapaklarının varlığı hücrelerin bir arada tutulmasına etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Üst kapak çıkartıldıktan sonra tıpkı modül deneylerinde olduğu gibi seri patlamalar gözlemlenmiştir. Yanma sonrası Şekil 3.62 (a)'da gösterilen batarya içinde yapılan incelemede dış taraflardaki iki modüldeki hasarın fazla olduğu ancak orta modülde hasarın az olduğu görülmüştür. Hücrelerde meydana gelen patlamalar, hücre dış yüzeyi olan alüminyum dış yapının yırtılması ile anot ile katot folyolarının saçılması sadece 1 ve 2 numaralı modüllerde meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 3.62 (b) ve (c)'de gösterilmiştir. 2 numaralı modüldeki hasar nispeten daha az olmuştur.



Şekil 3.62. Yanma sonrası batarya ve modüllerin durumu

Batarya modüllerini bir arada tutmaya yarayan karkas yapı, alt ve üst kapaklar sayesinde hücrelerin dağılmasını engellediği tespit edilmiştir. Yanma deneyi üst ve alt kapak olmadığı duruma göre tüm aşamalarda bir miktar gecikme yaşanmıştır. Alt ve üst kapağın olmasının yangının yönetilmesi açısından olumlu etkisi olduğu yorumlanmıştır. Bataryanın üst ve alt kapakları patlamaların oluşumunu ötelemektedir. Üst kapak çıkartıldığında ise patlama yaşandığı görülmüştür. Kapakların karkas yapıyı da bir arada tutma etkisi önem arz etmektedir. Termal kaçak mekanizmasının kırılması eylemi 8 s'de tek tüp kullanılarak gerçekleşmiştir. Yangın sonrası soğutma çalışması yine aynı tüp kullanılarak devam etmiştir. Söndürme etkisi Şekil 3.63'de verilmiştir.



Şekil 3.63. Soğutma etkisi ile batarya sıcaklığında düşüş

İnorganik tabanlı söndürme maddesi soğutma amacıyla uygulanmaya devam ettiğinde sıcaklığı hızlıca 250℃'den 27 sn içinde 100 ℃ mertebesine indirmiştir.

3.4.2. Termal Kaçak Mekanizmasının Makine Öğrenmesi İle Modellenmesi Deneyleri

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte algılama teknolojilerindeki yenilikler, dedektörler ve sensörlerin kullanımına yeni bir boyut kazandırmaktadır. Dedektörler ve sensörler, bilimsel araştırmalardan günlük teknolojik uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılan temel bileşenlerdir. Geliştirilen sistemlerde, algılama teknolojilerine getirilen yeni yaklaşım, dedektörler ve sensörlerin entegrasyonu ile gerçekleştirilmektedir (Barmpoutis ve diğ., 2020). Dedektörler ve sensörler, çevresel değişiklikleri hassasiyetle

algılayarak veri toplama ve analiz süreçlerinde kritik roller üstlenirler. Dedektör genellikle belirli bir fiziksel veya kimyasal özelliği tespit etmek için optimize edilir ve sadece bu spesifik amaçla kullanılır (Gu ve diğ., 2023). Sensörler ise daha genel amaçlıdır ve çevredeki değişiklikleri algılamak, ölçmek veya izlemek için kullanılır (Javaid ve diğ., 2021).

Sensörler tarafından toplanan çevresel ham veriler, yapay zeka algoritmaları ile işlenerek anlamlı bilgiye dönüştürülmekte ve bu sayede gerçek zamanlı karar destek sistemleri oluşturulmaktadır. Entegrasyon, veri toplama ve analiz süreçlerinin hızını ve doğruluğunu artırarak, daha verimli ve güvenilir sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Furda ve Vlacic, 2010).

Makine öğrenmesi, Li-ion pillerde termal kaçak tahmini ve yönetimi konusunda önemli bir taşıt haline gelmiştir. Araştırmalar, pilin sıcaklık, voltaj ve akım gibi verilerini toplayarak çalışma rutin değerlerinin dışında bir durumu tespiti ve öngörücü modeller geliştirmekte yoğunlaşmaktadır. Örneğin, derin öğrenme teknikleri, pil verilerinin karmaşık ilişkilerini modelleyerek termal kaçak durumuna sebep olabilecek anormalliklerin yüksek doğrulukla tahmin edebileceği çalışılmıştır (Li ve diğ., 2022). Ayrıca, ML modelleri incelenerek hangi modellerin SOC ve SOH analizinde daha yararlı olabileceği araştırılmış ve bunu kullanarak BMS in daha sağlıklı işletilebileceği, gelecekte yapılacak çalışmalarda ise batarya termal yönetimi ve dolayısıyla termal kaçak riskinin artışını öngörmek için kullanılabileceği belirtilmiştir (Shan ve diğ., 2024).

3.4.2.1. Deney Sırası

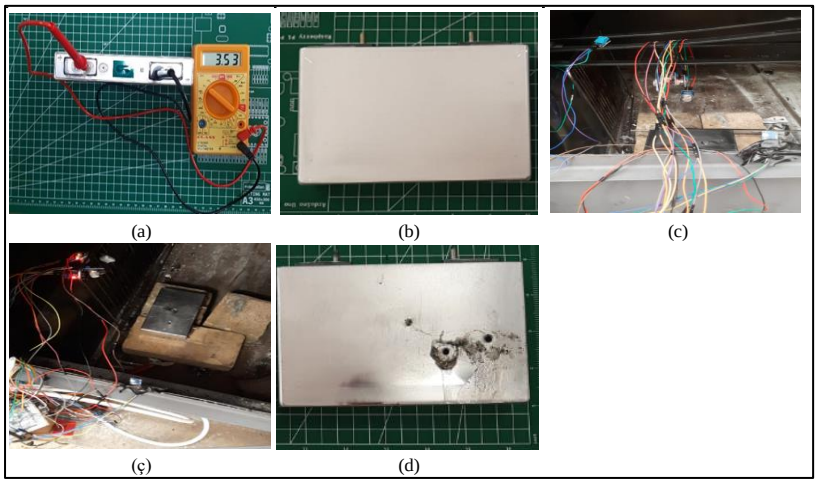
Deneyde, gerçek boyutlu bir EV araca ait bataryanın 7 adet hücresi kullanılmıştır. Özel olarak tasarlanmış metal fırında yürütülen deneyler, dikkatlice belirlenmiş ve sistematik bir prosedüre uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu prosedür, batarya hücresi üzerinde yapılan deneylerde metodolojik bir yaklaşımı ve deney çeşitliliğini sağlamayı hedefler. Deneyin başında pilin başlangıç gerilimi ölçülmüştür, Şekil 3.64 (a)'da gösterildiği üzere değer 3,53 V olarak kaydedilmiştir. Prosedür kapsamında, batarya hücresi üzerinde gerçekleştirilen deneyler, mekanik darbenin termal kaçak mekanizmasına etkisini sistematik bir şekilde verileri toplamak amacıyla planlanmıştır. Bu adımlar, bir EV aracın herhangi bir koşulda (şarj esnasında, mekanik darbe sonrası, aşırı sıcak altında kalması)

zorlama ile yangın koşulları parametrelerinin toplanması için kritik öneme sahiptir. Deneyde mekanik etki çivi darbesi ile (nail penetrasyon) ile gerçekleştirilmiştir, çivi darbesi öncesi pil Şekil 3.64 (b) ve çivi darbesi sonrası pil Şekil 3.64 (d)'de verilmiştir. Deneyler, belirli parametreler altında kontrol edilen ortamlarda yürütülerek, sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği maksimize edilmiştir. Aşağıda Tablo 3.18'de deney prosedürü maddeler halinde verilmiştir.

Tablo 3.18. Deney prosedüründe adımları

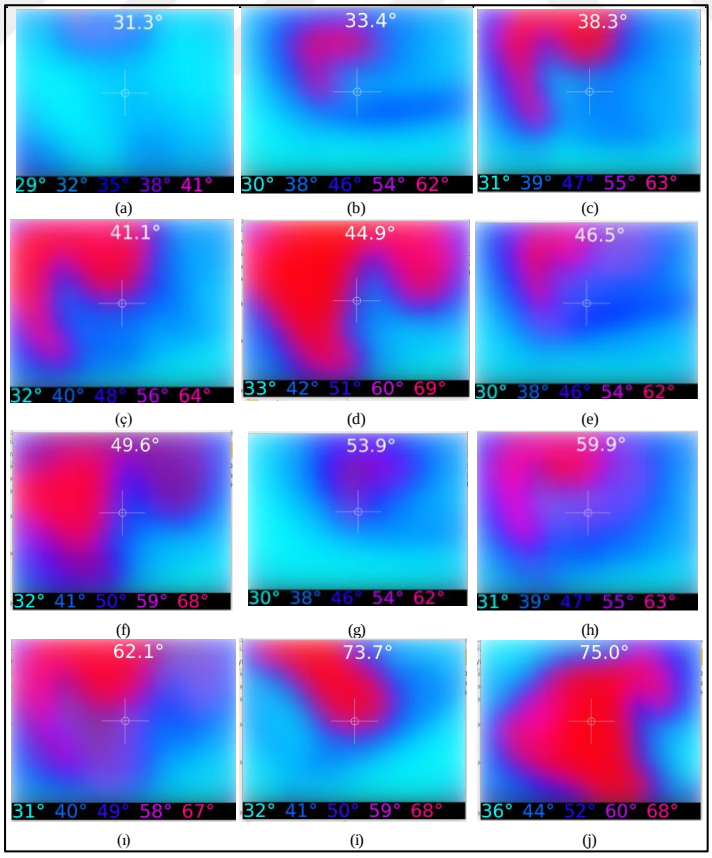
Adım Sıra No	*İş Adımında Yapılan İşlem*
1	Pil geriliminin ölçülerek kayıt edilmesi
2	Arduino ve Raspberry sistemlerini aktif edilmesi,
3	Pilin delinmesi (mekanik etki)
4	Raspberry termal kamera ve IR kamera görüntü aktarımının gözlemlenmesi
5	Kamera görüntülerinin Google Drive klasörüne aktarımının kontrol edilmesi
6	Merkez bilgisayarda Matlab arayüzününün çalıştırılması
7	Verilerin Matlab arayüzüne aktarımının kontrol edilmesi
8	Raporlama ekranının çalıştırılması
9	Raporlanan verilerden ilgili bir verinin seçilmesi
10	İlgili verinin görüntü işleme resimlerinin kontrol edilmesi
11	Raporlanan verilerin histogram ve korelasyon çizimlerinin incelenmesi
12	40 dakika – 60 dakika arası verilerin aktarılmasının sağlanması
13	Pano enerjisinin kapatılması
14	Arduino ve Raspberry sistemlerinin pasif edilmesi
15	Deneyin sonlandırılması
16	Bir sonraki deney için sistemin soğumasının beklenmesi (en az 2 saat)

Deneyler sırasında verilerin toplanması için Arduino Mega mikrodenetleyici ve Raspberry Pi 4 mini bilgisayar kullanılmıştır. Arduino Mega, deney fırını üzerine sabitlenmiş ve içeri uzatılan kablolar ile ortam sıcaklığı, nem, hava kalitesine etki eden karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarının ölçümleri yapılmıştır. Sensörlerin fırın ortamı içinde yerleşimi Şekil 3.64 (c)'de gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı ve nemi DHT22 modülü ile, gaz ölçümleri ise MQ135 ve MQ4 modülleri ile gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj değerleri PZEM-004T modülü ile okunmuştur. Arduino Mega'nın kablosuz bağlantı kurması için ESP-8266 modülü kullanılmıştır.



Şekil 3.64. Deneyin gerçekleştirilmesi aşamaları

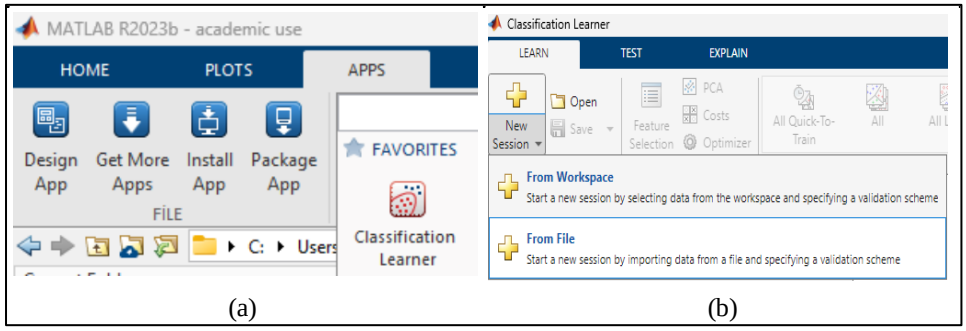
Raspberry Pi 4, fırın yanına yerleştirilmiş ve içeri uzatılan kablolar ile MLX90640 kızılötesi termal kamera sabitlenmiştir. Deney sırasında elde edilen termal görüntüler Şekil 3.65'de verilmiştir. Ayrıca, Raspberry Pi 4 ile dış ortam sıcaklık ve nem değerleri DHT22 modülü ile ölçülmüştür. Raspberry Pi 4, ethernet kartı üzerinden kablolu internet bağlantısı kurmuştur.



Şekil 3.65. Deney aşamalarında alınan termal görüntüler

3.4.2.2. Deneyin Verilerinin Makine Öğrenimi (ML) Metodu İle İşlenmesi

Elde edilen deney verilerinin analizi, bilimsel araştırmaların temel bir bileşenidir ve bu süreç, verilerin doğruluğu ve yorumlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, Matlab R2023b akademik versiyonu kullanılarak deney verilerinin nasıl işlendiği anlatılmaktadır. Matlab programının makine öğrenmesi bölümünde yer alan denetimli öğrenme yöntemlerine ait çeşitli sınıflandırma metotları kullanılarak deney verilerinin değerlendirilmesi ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, grafikler ve tablolar halinde görselleştirilmiştir. Bu görselleştirmeler, model performansını ve sınıflandırma sonuçlarını daha anlaşılır hale getirir. Uygulama süreci, aşağıda Şekil 3.66 (a)'da gösterildiği gibi Matlab uygulama sekmesinde yer alan sınıflandırma öğrenimi tuşuna basılmasıyla başlar. Şekil 3.66 (a)'da sağ alt köşesinde gösterilen sınıflandırma öğrenimi sekmesi, denetimli makine öğrenimi tekniklerini kullanarak verileri sınıflandırmak amacıyla modellerin eğitilmesini sağlar. Bu süreç, deney verileri kümesine ait sınıflandırılmış örnekleri içerir ve bu örnekler, algoritmaların belirlenmiş sınıflara ait tahmin yeteneklerini geliştirmesi için kullanılır. Sınıflandırma öğrenimi, karmaşık veri yapılarından anlamlı bilgiler çıkarılabilmesi için kritiktir ve modellerin kullanımı, çeşitli uygulama alanlarında verimliliği ve doğruluğu artırma potansiyeline sahiptir. Aşağıda Şekil 3.66 (b)'de, eğitim sürecinin başlaması için verilerin yüklenme aşaması gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.66. Deney verilerinin Matlab programına yüklenmesi

Bu süreç, ilgili Excel dosyasının bağlantı yolunun dosyadan okutulmasıyla başlatılmış ve ardından, Şekil 3.67'de gösterilen veri yükleme arayüzünde ilgili verilerin seçilmesiyle devam etmiştir.

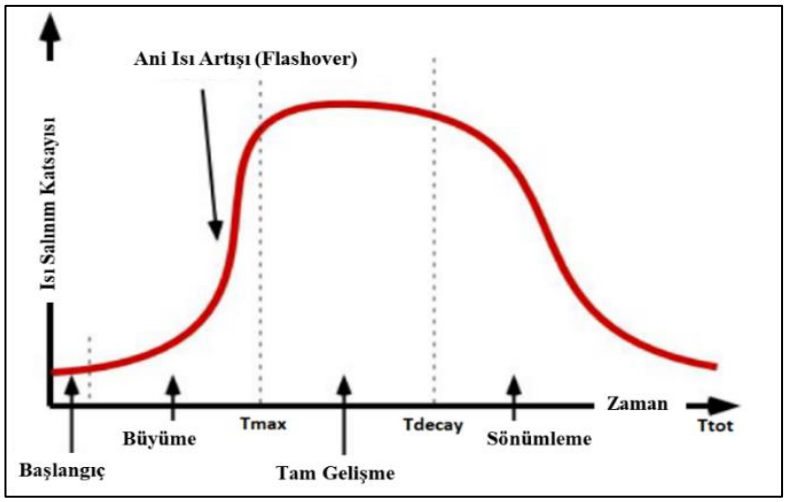
Zaman	MQ4	MQ135	MQ9	MQ7	DHT	İç ortam sıcaklık	İç ortam nem	Batarya Sıcaklık	Sınıflandırma
16:34:44.898	1	13	11	13	186	28	47	28	N
16:34:45.929	1	13	11	13	8	28	47	28	N
16:34:46.959	2	13	11	14	7	28	47	28	N
16:34:47.991	1	13	11	13	66	28	47	28	N
16:34:49.070	1	13	11	13	121	28	47	28	N
16:34:50.101	1	13	12	13	-12	28	47	28	N
16:34:51.133	2	13	11	14	-1	28	47	28	N
16:34:52.165	1	13	11	14	50	28	47	28	N
16:34:53.243	0	12	11	13	119	28	47	28	N
16:34:54.276	0	12	11	14	-2	28	47	28	N
16:34:55.307	1	12	11	14	-1	27	47	28	N
16:34:56.385	0	13	10	13	27	28	46	28	N
16:34:57.416	1	12	11	14	99	28	46	28	N
16:34:58.447	1	13	11	14	35	28	46	28	N

Şekil 3.67. Veri seçimi yapılması ve içe aktarım ekranı

Şekil 3.67'da gösterilen ekran veri seçiminin yapılabildiği ekrandır. Bu ekranda, ilgili Excel dosyasındaki tüm veriler açılır ve kullanıcı tarafından gerekli olanlar seçilir. Bu çalışmaya ait deneylerde oluşturulan veriler, batarya hücresi sıcaklık, Arduino_nem, CO, CO_2, dis_ortam_sicaklik ve raspberry_nem olarak özelliklere (başlık) ayrılmıştır. Kategorik seçim olarak arduino_durum uygulanmıştır. Diğerleri ise sayısal veri niteliğinde aktarılmıştır. Toplam 1900 veri satırı aktarılmıştır. Algoritmalar, her bir girdi için bir çıktı sınıfı üretecek şekilde öğrenirken, öğrenme modelinin doğruluğu çapraz doğrulama gibi yöntemlerle değerlendirilir. Bu yöntem, modelin genel veri kümesi üzerindeki performansını objektif bir biçimde ölçmek için kullanılır. Eğitim süreci boyunca, özellik seçimi gibi çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanır, böylece modelin hem eğitim hem de yeni, görülmemiş veriler üzerinde maksimum performans göstermesi sağlanmıştır.

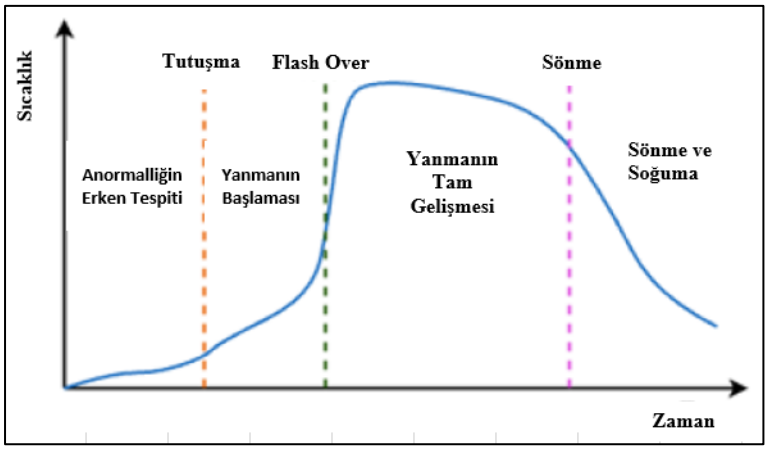
Deneyden alınan verilerin işlenmesi için Şekil 3.68'de gösterilen Li-ion pilin yanma grafiğinin ve yangının farklı evreleri ile birlikte ısı salınım miktarındaki değişiklikler anlaşılmalıdır. Grafiğin yatay ekseni (X Ekseni) zamanı temsil eder.

Bu, yangının farklı evreleri boyunca geçen süreyi gösterir. Pilin zorlanması hareketi (Termal, elektriksel veya mekanik darbe) ile başlar ve yangının tamamen söndüğü "Ttot" noktasına kadar devam eder. Grafikte her bir evre (başlangıç, büyüme, tam gelişme, sönümleme) zaman eksenindeki farklı bölümlerle temsil edilmektedir.



Şekil 3.68. Li-ion pilin yanma aşamaları

Dikey Eksen (Y ekseni) ısı (enerji) salınımını temsil eder, yangının farklı evrelerinde açığa çıkan enerji miktarını gösterir. Isı salınımı, yangının başlarında düşük başlar ve "Tam Gelişme" aşamasında en yüksek seviyeye (Tmax) ulaşır, ardından "Sönümleme" evresinde giderek azalmaktadır. Başlangıç evresinde, termal kaçak oluşumuna sebep unsur meydana gelmiş olup yangının yeni başladığı aşamayı temsil eder. Isı salınımı (enerji salınımı) düşük seviyededir. Dışarıdan fark edilmesi güç bir evredir. Büyüme evresinde yangın, hızlı bir şekilde büyümeye başlar. Isı salınımı hızla artar ve yangın enerjisini hızla yayar. Bu aşamada yangının şiddeti artar. Ani ısı artışı (Flashover) yangının kritik bir noktasıdır, ortamın sıcaklığının birden bire çok yüksek bir seviyeye çıkmasına neden olur ve tüm yanıcı maddelerin (elektrolit buharının, VOC) alev almasına yol açar. Bu noktadan sonra yangın tamamen kontrol dışına çıkar. Tam Gelişmiş evre ise yangının en yüksek seviyede olduğu evredir. Grafik üzerinde "Tmax" olarak işaretlenmiştir ve bu, maksimum ısı salınımını temsil eder. Bu aşamada yangının tüm enerjisi açığa çıkar. Sönümleme ise yangının enerjisi azalmaya başlaması ve ısı salınımında düşüş yaşanmasıdır. Bu evrede yangının sönmeye başlamaktadır. "Tdecay" noktası, yangının sönmeye başlamasını gösterir. Toplam Süre (Ttot) yangının başladığı andan tamamen sönene kadar geçen toplam süreyi temsil etmektedir. Bu grafik, yangın dinamiklerini anlamak için önemlidir; yangının hangi evrede olduğunu belirlemek, yangınla mücadelede doğru stratejiyi belirlemek için kritik rol oynamaktadır. Şekil 3.69'da Li-ion pilin yanma aşamaları gösterilmiştir (Alarifi ve diğ., 2016).



Şekil 3.69. Li-ion pilin yanma aşamaları

Bu çalışmada, makine öğrenimi (ML) kullanılarak elde edilen veriler N, S1, S2, S3 ve S4 olarak beş farklı sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar, bataryaların önleyici ve zarar azaltıcı bakımlarının etkinliğini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

N Bölgesi, normal bölge veya başlangıç bölgesidir. Bu bölge, pilin henüz yangın veya termal kaçak belirtileri göstermediği normal çalışma durumunu temsil eder. Bu durumda pilin sıcaklığı ve basıncı sabittir ve enerji salınımı düşük seviyededir. ML için bu aşama "normal" davranış paternini tanıyarak referans bir model oluşturması sağlanır. Anormal bir durum oluşmadığı için N bölgesi, sistemin güvenli durumda olduğunu gösterir.

S1 bölgesi, anormalliğin erken tespiti bölgesidir. Bu bölge, pildeki sıcaklık veya basınç gibi parametrelerde hafif bir artışın başladığı, fakat henüz kritik seviyeye ulaşmadığı bölgedir. Sıcaklık ve enerji salınımı artmaya başlar, ancak henüz patlayıcı bir aşamaya gelmemiştir. Makine öğrenmesi, bu anormal artışı tespit edebilir ve algoritma, pilin yanmaya başlayacağını öngörebilir. Bu durumda, erken uyarı sistemleri tetiklenebilir. Kestirimci bakım stratejilerinin uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

S2 bölgesi, termal kaçak başlangıcı bölgesidir. Bu bölgede, pilin zorlanmalar ve içinde gelişen tersinmez reaksiyonların termal kaçak mekanizmasının başlangıcı ve ani bir sıcaklık artışı yaşadığı bölgedir. Grafik üzerinde Flashover noktasına denk gelir. Sıcaklık ve enerji salınımı hızla artarak pilin kritik bir seviyeye ulaştığını gösterir. Pil, çevresine çok fazla ısı yayması meydana gelmeye başlamaktadır. Bu noktadan sonra ML önleyici bakış açısını kaybetmektedir ve bu nokta artık yangının kontrol altına alınması bir önceki

alana göre çok zorlaşmıştır. Önleyici bakışın bu bölge için avantajını kaybetmiş olması sebebiyle çalışmada değerlendirilmemiştir.

S3 bölgesi, termal kaçak mekanizmasının tam gelişimi bölgesidir. Bu bölge, yangının tam gelişmiş olduğu, enerji salınımının en yüksek seviyeye (Tmax) ulaştığı evredir. Grafik üzerinde ‘’tam gelişme’’alanı olarak işaretlenmiştir. Sıcaklık artışı doruk noktasına ulaşır ve pilin yanması en yüksek seviyeye ulaşır. ML bu aşamada sistemi "kurtarılamaz" olarak değerlendirebilir. Bu aşama, yangının söndürülmesinin en zor olduğu bölgedir. Bu sebeple çalışmada değerlendirilmemiştir.

S4 bölgesi, sönme ve soğuma bölgesidir. Bu bölge, yangının yavaşça sönmeye başladığı, enerji salınımının azaldığı sönümlenme evresine tekabül eder. Sıcaklık ve enerji azalmaya ve pilin yavaşça soğumaya ve yangın kontrol altına alınmaya başlamasına olanak sağlar. Bu bölge de çalışmada değerlendirilmemiştir.

3.4.2.3. Önleyici ve Zarar Azaltıcı Bakımın Rolü

S2, S3 ve S4 Sınıfları bataryanın daha ileri düzeyde termal kaçak durumlarını temsil eder. Ancak, bu sınıflar bataryanın önleyici bakım ve yanma öncesi durum tespitine odaklanmadığından, bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.

Önleyici bakım, bataryaların performansını izlemek ve potansiyel arızaları önceden tespit etmek için kullanılır. Bu çalışmada, ML algoritmaları kullanılarak N ve S1 sınıflarındaki verilerin analizi, bataryaların termal kaçak öncesi durumlarını belirlemekte kritik rol oynar. Önleyici bakım stratejileri, bu erken tespitleri kullanarak bataryaların güvenliğini artırabilir ve termal kaçak risklerini en aza indirebilir.

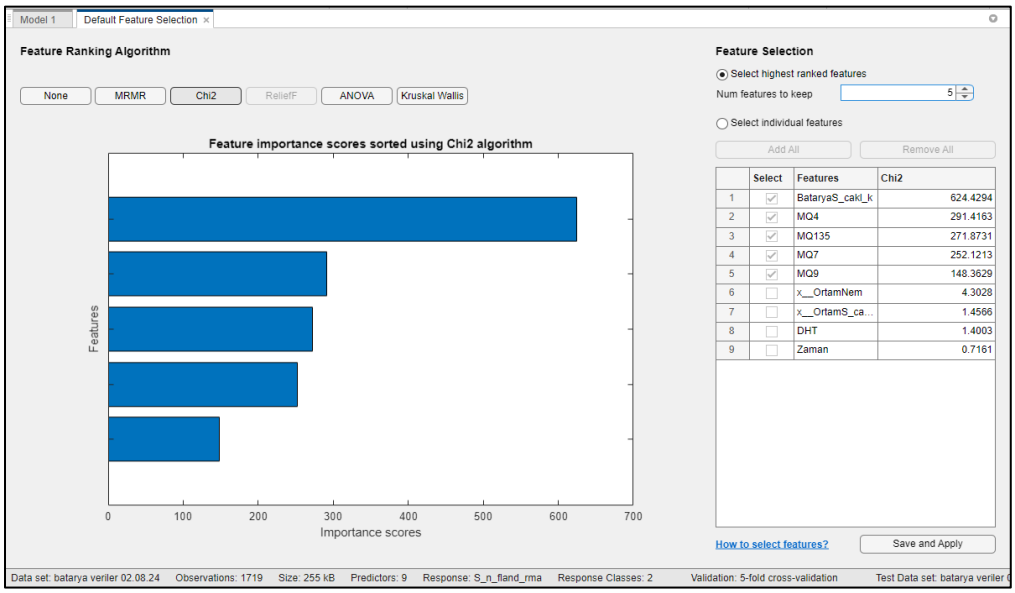
Zarar azaltıcı müdahele ise, batarya arızası meydana geldikten sonra devreye girecek hasarı en aza indirmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu çalışma, zarar azaltıcı bakımın etkinliğini doğrudan ele alınmamış ancak, N ve S1 sınıflarının analizi, zarar azaltıcı bakım stratejilerinin geliştirilmesi için de önemli veriler sunmaktadır. Bu doğrultuda, önleyici bakımın etkinliği, batarya arızalarının erken tespiti ve önlenmesinde anahtar bir rol oynar. N ve S1 sınıflarının derinlemesine analizi, bu bakım stratejilerinin optimize edilmesine ve batarya güvenliğinin sağlanmasına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

3.4.2.4. Deney Verilerinin Matlab Programı ile işlenmesi

Toplanan veriler denetimli öğrenmenin sınıflandırma metodu ile işlenmiştir. 5 katlı çapraz doğrulama metodu kullanılmıştır. Veri kümesi %90 öğrenme, %10 test için ayrılmıştır.

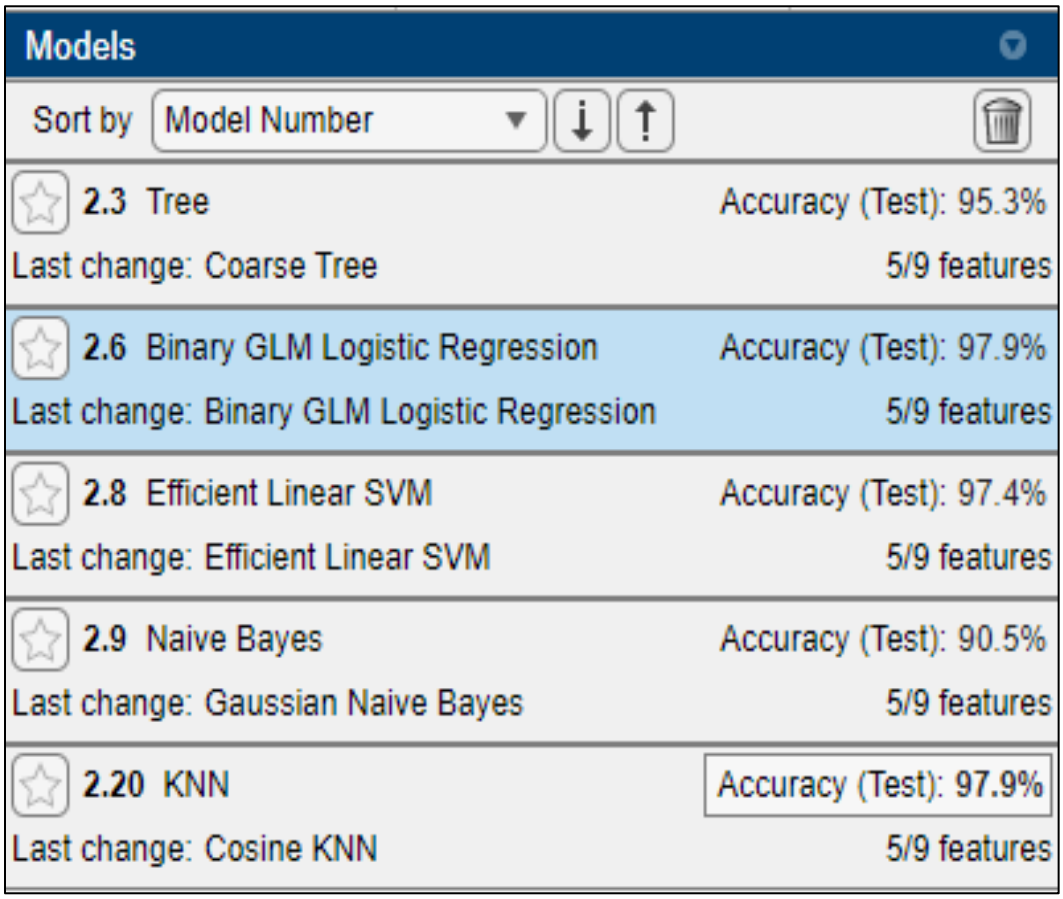
3.4.2.5. Ki Kare Testi

Ki kare testi ile 9 özellikten en ilgili 5 tanesi seçilmiştir. Çünkü diğerlerinin ilgililik seviyeleri çok düşüktür. Ki-Kare testi, iki veya daha fazla kategorik değişken arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Gözlemlenen frekansların beklenen frekanslarla karşılaştırılması yoluyla, bağımsızlık testi veya uyum testi şeklinde uygulanabilir. Bağımsızlık testi, iki değişkenin bağımsız olup olmadığını kontrol ederken, uyum testi tek bir değişkenin belirli bir dağılıma uyup uymadığını değerlendirir. Hesaplama, gözlemlenen ve beklenen frekanslar arasındaki farkların karesinin beklenen frekansa bölünmesiyle yapılır. Varsayımlar arasında bağımsız ve rastgele örnekleme ile her hücredeki beklenen frekansın 5 veya daha fazla olması yer alır. Sonuçlar, elde edilen p-değeri ile hipotezin anlamlılığını belirler; genellikle $p < 0,05$, istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir. Ki-Kare testi, sosyal bilimlerden pazarlama araştırmalarına kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.70'de gösterildiği üzere Ki-Kare üzerinden seçilen özellik seçimi yapılmıştır.



Şekil 3.70. Ki-Kare testinin seçilmiş beş yöntemi

37 farklı denetimli makine öğrenmesinden en verimli olan beş yöntem çıkarılmıştır. Bunlar Şekil 3.71'de verilmiştir.

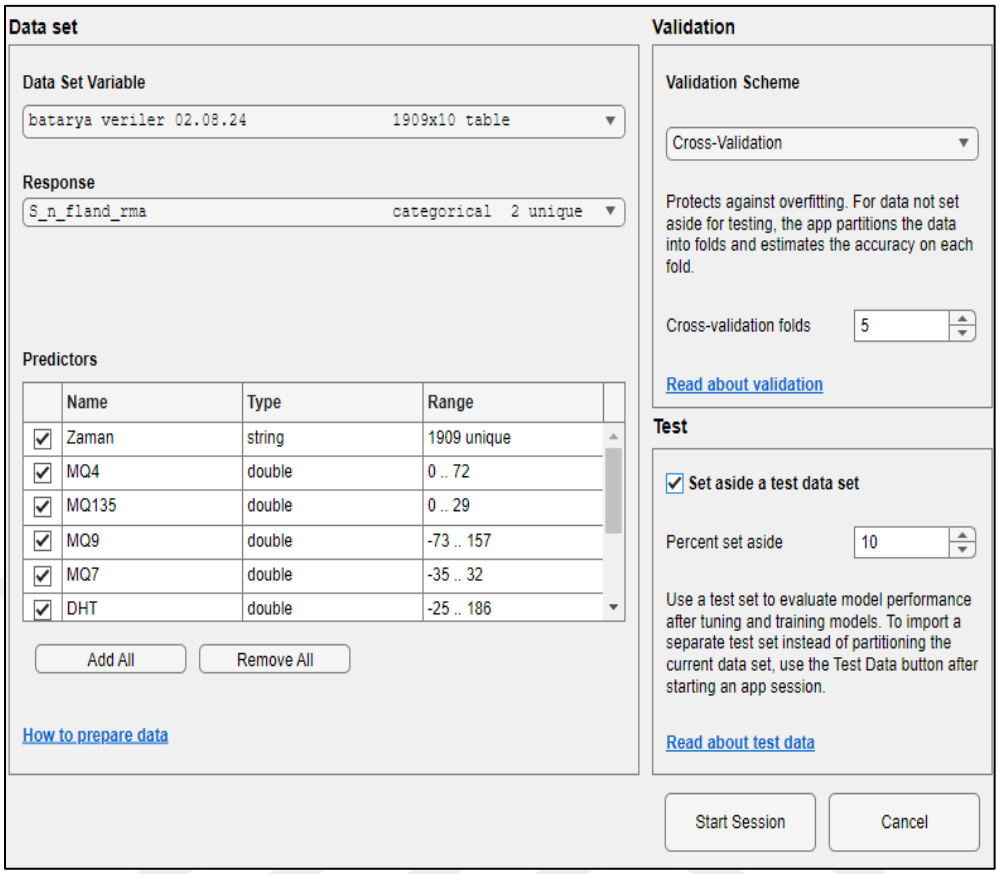


Şekil 3.71. Eğitim sürecinde kullanılan modeller

1. Karar Ağacı (Decision Tree) ait olan Coarse Tree modeli
2. Logistic Regression bir çeşidi olan Binary Logistic Regression
3. Linear Support Vector Machine (SVM) çeşidi olan Efficient Linear SVM
4. Gaussian Naive Bayes (GNB)
5. K-en yakın komşu (K nearest neighbor)

Aşağıdaki Şekil 3.72 Doğrulama tekniklerinin hangisinin kullanılacağının seçildiği ekranı göstermektedir. Bu çalışmada, 5 katlı çapraz doğrulama (5 k-fold cross-validation) yöntemi kullanılmıştır.

1900 veri satırından oluşan veri kümesi üzerinde yapılan bu seçim, veri kümesinin %90'ı modelin eğitimi, kalan %10 ise modelin performansının test edilmesi için ayrılmasını öngörmektedir.

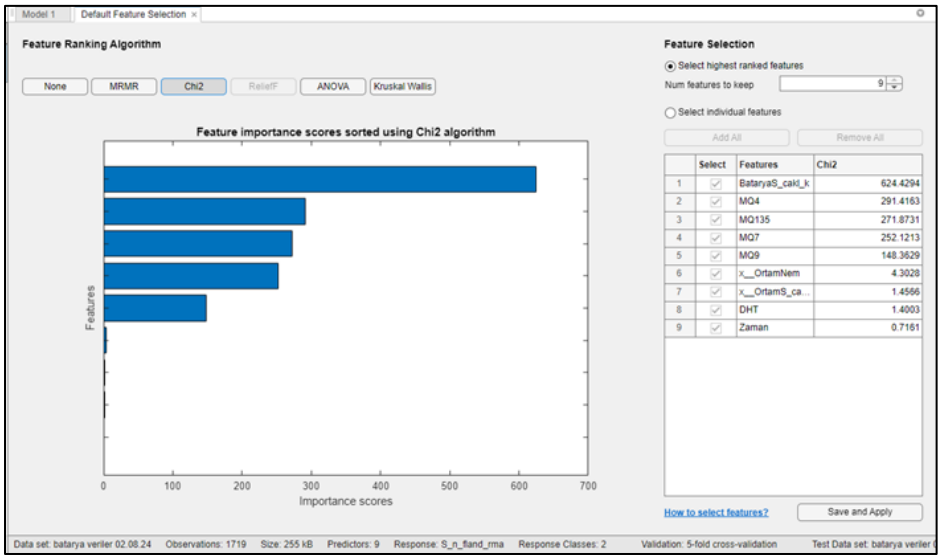


Şekil 3.72. Doğrulama tekniğinin seçim ekranı

Arduino mega ile eş zamanlı olarak Raspberry Pi çalıştırılmıştır. Termal kamera ile batarya sıcaklığı kayıt altına alınmış ayrıca kabin içi sıcaklık ve nem koşulları kayıt altına alınmıştır. Deneylerden toplam 600 temizlenmiş veri elde edilmiştir. Bu veriler Arduino mega verileri ile eşlenik hale getirilmiş, ara değerler için PYTHON programlama oluşturulmuştur.

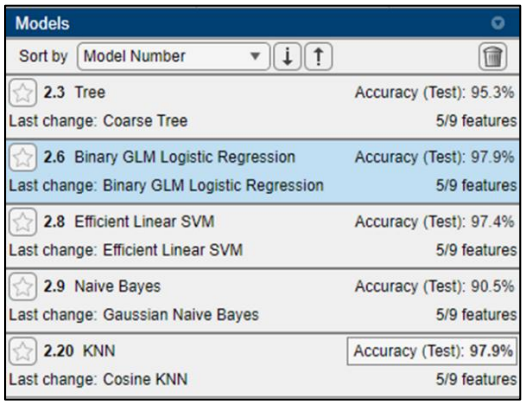
Çapraz doğrulama yöntemi, her bir alt veri kümesinin hem eğitim hem de test amacıyla kullanılmasını sağlayarak modelin genelleme yeteneğini daha etkin bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır.

Bu yöntem, modelin farklı veri alt kümeleri üzerindeki performansını test ederek aşırı öğrenme riskini minimize etmek için kullanılır. Aşağıdaki Şekil 3.73'de özellik seçimi ekranı gösterilmektedir. Bu ekranda, MaMi, Ki-Kare, RelifF, Varyans analizi (Anova), Kruskal Wallis istatistiksel analiz teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada Ki-Kare analizi tercih edilmiştir.



Şekil 3.73. Matlab istatiksel analiz yöntemi seçim ekranı

Ki-Kare analizi, mevcut dokuz özelliğin etkilerini en yüksekten en düşüğe doğru sıralayarak, her birinin model üzerindeki etkisini değerlendirmekte ve önceliklendirme sağlamaktadır. Sıralama şu şekilde gerçekleştirilmiştir: 1. CO, 2. CO_2, 3.Arduino nemi (yanma fırını ortam nemi), 4. dış ortam sıcaklığı, 5. raspberry nemi ve 6. Batarya sıcaklığı. Bu analiz sonucunda, öğrenim ve test süreçleri için yüksek öneme sahip olduğu değerlendirilen ilk beş özellik (CO, CO_2, batarya sıcaklığı, pilin ortam sıcaklığı, Arduino nemi) seçilmiştir. Bu özelliklerin seçimi, modelin performansını doğrudan etkileyen faktörlerin belirlenmesine olanak tanırken, aynı zamanda gereksiz veri gürültüsünün ve hesaplama yükünün azaltılmasına katkı sağlar. Bu süreç, modelin genel doğruluğunu ve tahmin kabiliyetini artırmak için kritiktir ve yapılan özellik seçimi, modelin veri kümesi üzerindeki genelleştirme yeteneğini güçlendirmeye yöneliktir. Aşağıda Şekil 3.74'de kullanılan modeller verilmiştir.



Şekil 3.74. Kullanılan modeller

37 farklı denetimli makine öğrenmesi yönteminden en verimli olan 5 tanesi seçilmiştir. Matlab, 10 ana başlık altında toplam 34 model sunmaktadır. Bu ana başlıklar şunlardır: KA, ayrımcı (discriminant) analizi, lojistik regresyon sınıflandırıcıları, naive bayes sınıflandırıcıları, destek vektör makinesi, verimli bir şekilde eğitilmiş doğrusal sınıflandırıcılar (efficiently trained linear classifiers), en yakın komşu sınıflandırıcıları (nearest neighbor classifiers), çekirdek yaklaşım sınıflandırıcıları (kernel approximation classifiers), topluluk sınıflandırıcıları (ensemble classifiers) ve sinir ağı sınıflandırıcıları (neural network classifiers). Bu çalışmada Matlab programında kullanılan ve Karar ağacı (Decision Tree) ait olan coarse tree modeli, Logistic regression bir çeşidi olan (Binary Logistic Regression), Linear support vector machine (SVM) çeşidi olan efficient linear SVM, Gaussian naive bayes (GNB), K-en yakın komşu (K nearest neighbor), modelleri seçilmiştir. Seçilen bu beş model eğitilmiştir. Performans değerlendirme yöntemleri, bir makine öğrenmesi modelinin performansını değerlendirmek için kullanılır. Sınıflama için en yaygın olarak kullanılan performans değerlendirme yöntemi ‘’doğruluk’’tur (validasyon). Doğruluk, Tablo 3.19’da gösterilen karışıklık matrisi (TP, FP, FN, TN) değerlerine göre hesaplanmaktadır.

Tablo 3.19. Karışıklık matrisi

	Gerçek pozitif	**Gerçek negatif**
Tahmin Edilen Pozitif	TP	FP
Tahmin Edilen Negatif	FN	TN

Doğruluk modeli tarafından yapılan tüm tahminler, içindeki doğru tahminlerin oranı ölçer ve Formül (3.1) ile hesaplanır. Formül 3.1’de belirtilen doğruluk, modelin doğru tahminlerinin (hem pozitif hem de negatif) toplam tahminlere oranı olarak hesaplanmaktadır.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{3.1}$$

3.4.2.6. Model Verileri

Karışıklık matrisi, bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir tablodur ve modelin gerçek sınıflara göre tahminlerini gösterir. Bu matris, modelin tahminlerinin doğruluk metriğini hesaplamak için kullanılır. Bu karışıklık

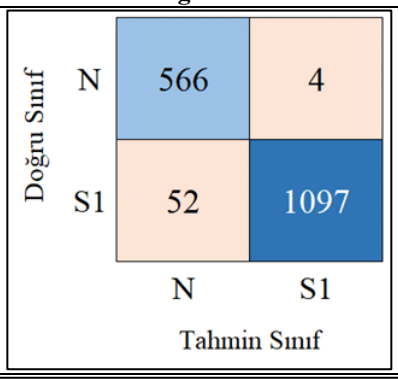
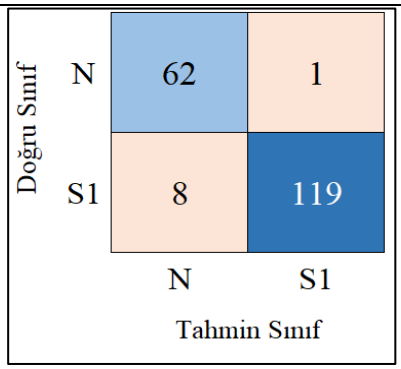
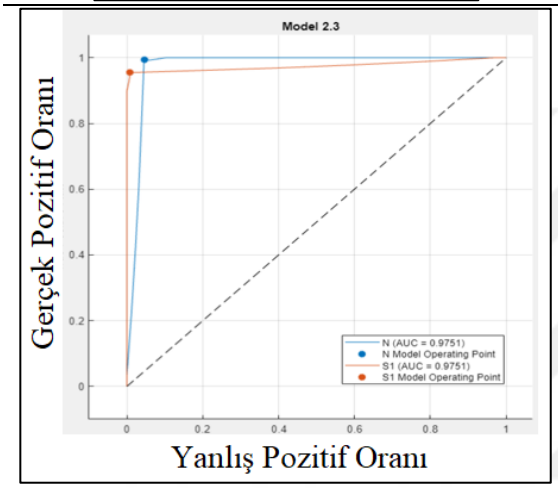
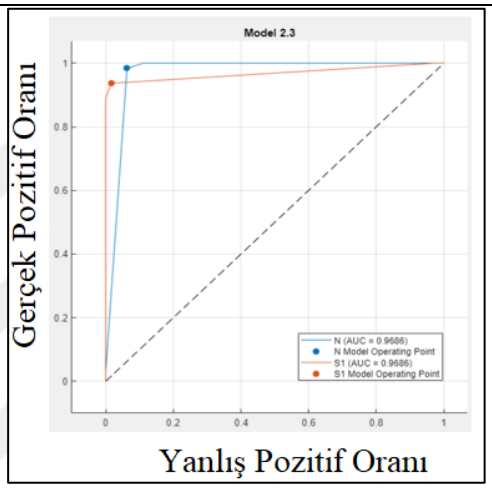
matrisleri, her bir modelin sınıfları ne kadar iyi ayırt ettiğini ve hatalı tahminlerin sıklığını göstermektedir. Bu sonuçlar, her bir modelin sınıflandırma kabiliyetini ve özellikle yanlış pozitif ile yanlış negatif tahmin oranlarını ortaya koymaktadır, bu da modellerin güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmede önemli bir göstergedir. Genel olarak, yanlış pozitif ve yanlış negatif değerlerin düşük olması, modelin verimliliğinin yüksek olduğunu gösterir. Alıcı işletim karakteristik eğrisi (ROC), sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmede kullanılan önemli bir taşıttır. Bu eğri, bir sınıflandırma modelinin çeşitli eşik değerlerindeki duyarlılık (hassasiyet veya gerçek pozitif oran) ve 1 - özgüllük (yanlış pozitif oran) değerlerini grafik üzerinde gösterir. Alıcı işletim karakteristik eğrisi, modelin tüm olası eşiklerdeki performansını görsel olarak sunar ve modelin sınıfları ayırt etme kabiliyetini değerlendirmek için kullanılır. AUC (Area Under the Curve) ROC eğrisinin altında kalan alan (AUC), bir testin genel başarısını tek bir değerle ifade etmektedir. AUC'nin değeri 0,5 ile 1,0 arasında değişir: AUC = 0,5: Test, tahmin edememektedir; rastgele tahmin etmektedir. AUC = 1,0: Test mükemmel tahmin etmektedir.

3.4.2.7. Makine Öğrenmesi ile Elde Edilen Modeller

Karar ağacı (decision tree) ait olan coarse tree modelinin performansı analiz edildiğinde hem eğitim hem de test verilerinde oldukça iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Eğitim verisinde model, 566 doğru negatif ve 1097 doğru pozitif tahmin gerçekleştirmiş, ancak 56 yanlış tahmin (4 yanlış pozitif, 52 yanlış negatif) de bulunmuştur. Test verisinde ise 62 doğru negatif ve 119 doğru pozitif tahminle toplamda sadece 9 hata (1 yanlış pozitif, 8 yanlış negatif) yapmıştır.

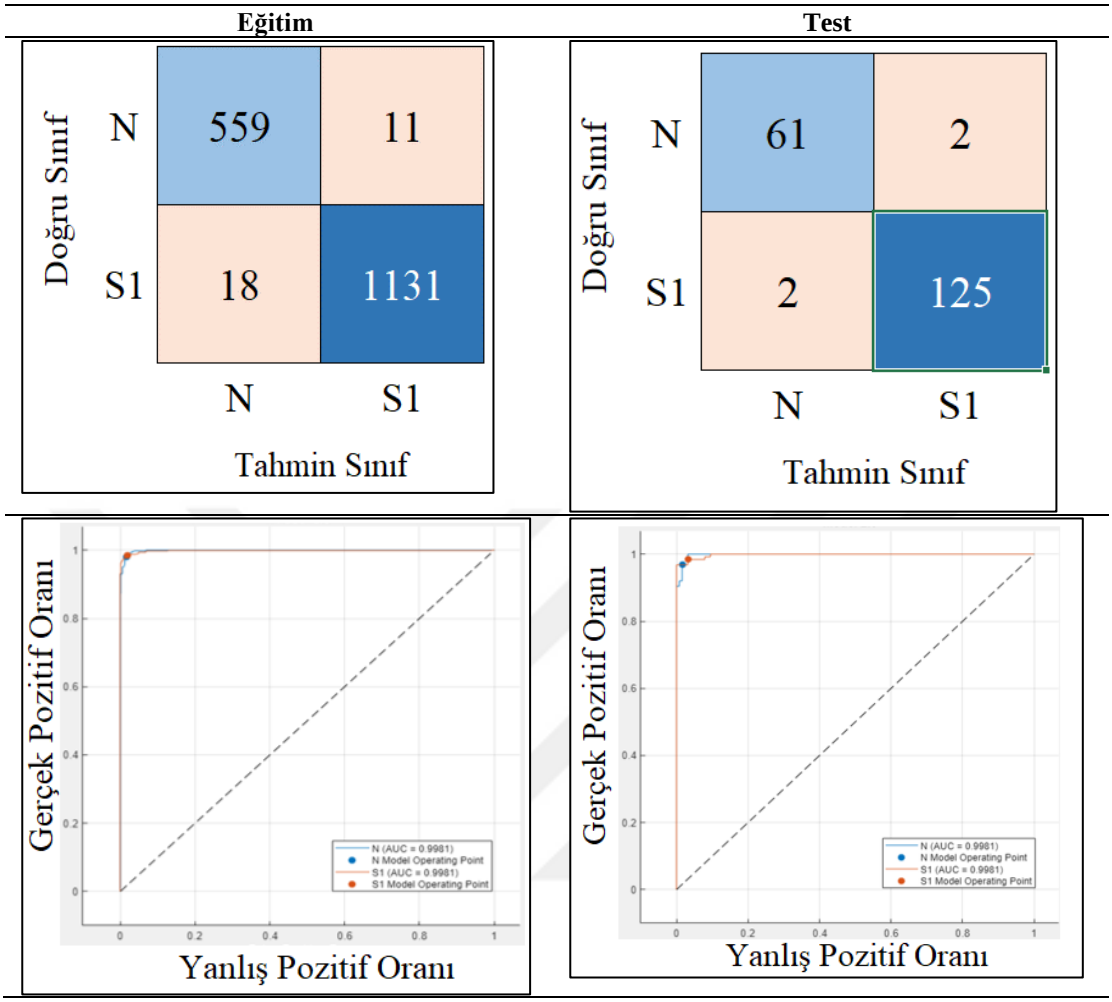
ROC eğrileri de bu başarıyı desteklemektedir; eğitim verisi için AUC skoru 0,979 ve test verisi için 0,986 elde edilmiştir, bu model her iki veri setinde de yüksek doğruluk oranına sahiptir. Bu sonuçlar, modelin genel olarak güvenilir ve doğru tahminler yapabildiğini göstermektedir. Eğitim ve test verileri arasında küçük bir fark olsa da, modelin genelleme yeteneği oldukça iyi ve gerçek dünya verilerinde de başarılı olabileceğini işaret etmektedir. Test setindeki hataların biraz daha fazla olması, modelin gerçek dünya verilerinde biraz daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tablo 3.20’de model için eğitim ve test sonuçları karışıklık matrisleri ve ROC eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.20. Karar ağacı modeli için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri

Eğitim	Test
	
	

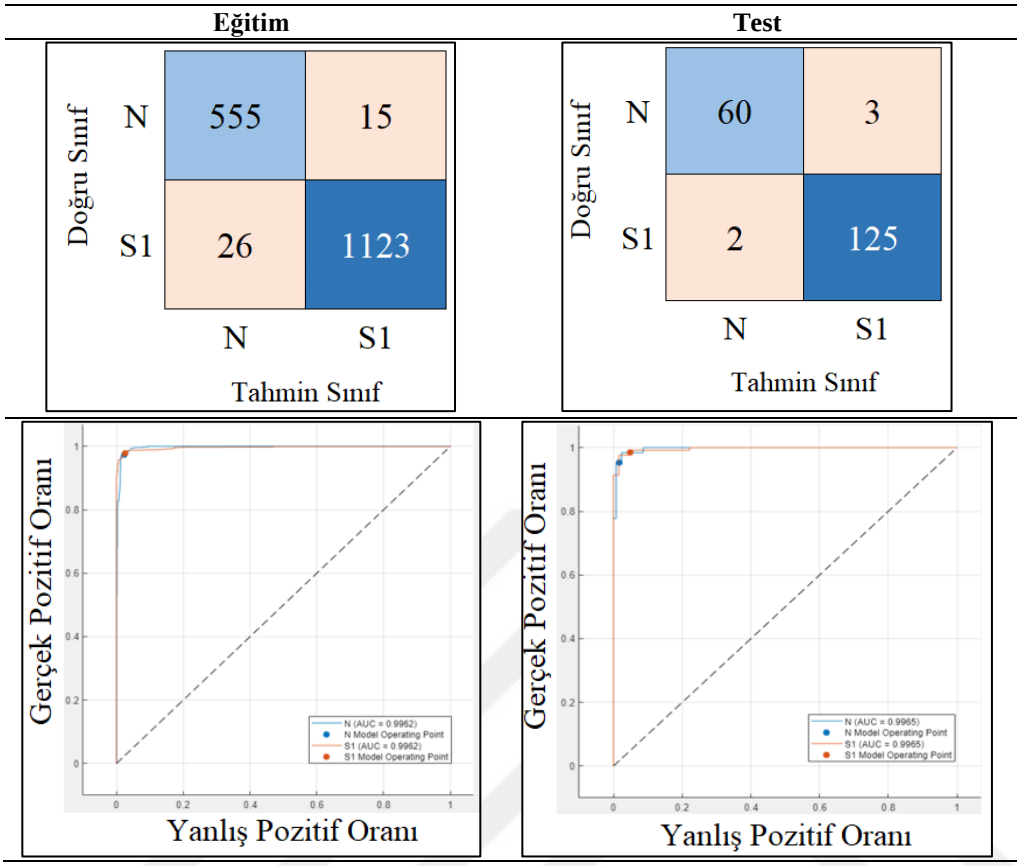
Logistic regression bir çeşidi olan Binary Logistic Regression makine öğrenimi modelinin performansını analiz edildiğinde, hem eğitim hem de test verilerinde oldukça başarılı olduğunu anlaşılmaktadır. Eğitim verisinde model, 559 doğru negatif ve 1131 doğru pozitif tahmin elde edilirken, 29 yanlış tahmin (11 yanlış pozitif, 18 yanlış negatif) değer elde edilmiştir. Test verisinde ise 61 doğru negatif ve 125 doğru pozitif tahminle toplamda sadece 4 hata (2 yanlış pozitif, 2 yanlış negatif) yapılmıştır. ROC eğrileri de bu başarıyı desteklemektedir; eğitim verisi için AUC skoru 0,991 ve test verisi için 0,996 elde edilmiştir. Bu değerler model için her iki veri setinde de neredeyse mükemmel performans göstermiştir. Bu sonuçlar, modelin yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu, özellikle test verisinde çok az hata yaptığını göstermektedir. Bu da modelin genelleme yeteneğinin oldukça iyi olduğunu ve gerçek dünya verilerinde de başarılı olabileceğini işaret etmektedir. Tablo 3.21'de model için eğitim ve test sonuçları karışıklık matrisleri ve ROC eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.21. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri



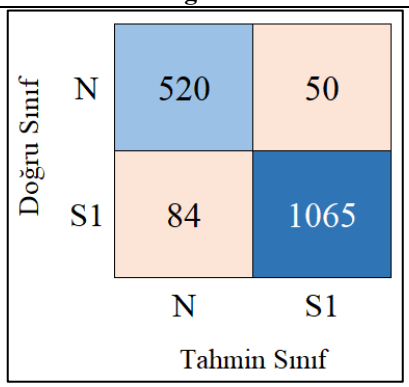
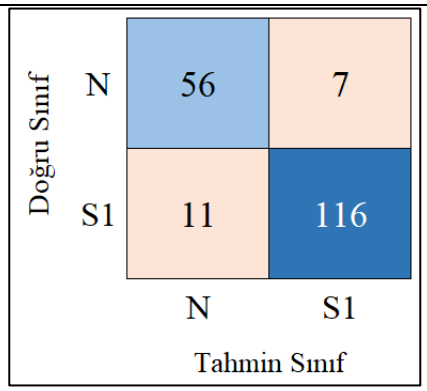
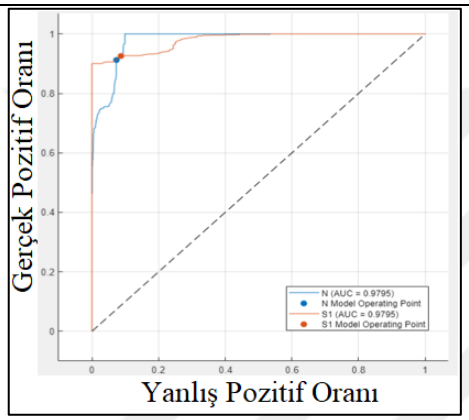
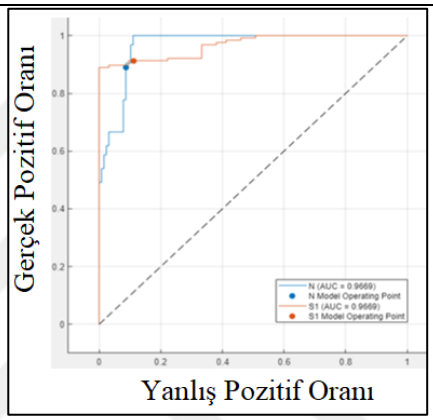
Linear support vector Machine (SVM) çeşidi olan Efficient Linear SVM makine öğrenimi modelinin performansını analiz edildiğinde, hem eğitim hem de test verilerinde oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Eğitim verisinde model, 555 doğru negatif ve 1123 doğru pozitif tahmin yapmış, ancak 41 yanlış tahminde (15 yanlış pozitif, 26 yanlış negatif) bulunmuştur. Test verisinde ise 60 doğru negatif ve 125 doğru pozitif tahminle toplamda sadece 5 hata (3 yanlış pozitif, 2 yanlış negatif) yapılmıştır. ROC eğrileri de bu başarıyı desteklemektedir; eğitim verisi için AUC skoru 0,989 ve test verisi için 0,996 elde edilmiştir. Model her iki veri setinde de neredeyse mükemmel performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, modelin yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu, özellikle test verisinde çok az hata yaptığını göstermektedir. Bu da modelin genelleme yeteneğinin oldukça iyi olduğu ve gerçek dünya verilerinde de başarılı olabileceği anlaşılmaktadır. Tablo 3.22'de model için eğitim ve test sonuçları karışıklık matrisleri ve ROC eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.22. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri



Gaussian Naive Bayes (GNB), Bu makine öğrenimi modelinin performansını analiz edildiğinde, eğitim ve test verilerinde genel olarak iyi bir performans sergilediğini görülmektedir. Eğitim verisinde model, 520 doğru negatif ve 1065 doğru pozitif tahmin gerçekleştirmiştir. Ancak model 134 yanlış tahmin (50 yanlış pozitif, 84 yanlış negatif) de bulunmuştur. Test verisinde ise 56 doğru negatif ve 116 doğru pozitif tahminle toplamda 18 hata (7 yanlış pozitif, 11 yanlış negatif) yapılmıştır. ROC eğrileri de bu başarıyı desteklemektedir; eğitim verisi için AUC skoru 0,971 ve test verisi için 0,973 yani model her iki veri setinde de yüksek doğruluk oranına sahiptir. Bu sonuçlar, modelin genel olarak güvenilir ve doğru tahminler yapabildiğini göstermekle birlikte eğitim verisinde yanlış tahminlerin sayısının biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, modelin eğitim verisinde biraz daha iyileştirme gerektirebileceğini işaret etmektedir. Tablo 3.23'de model için eğitim ve test sonuçları karışıklık matrisleri ve ROC eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.23. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri

Eğitim	Test
	
	

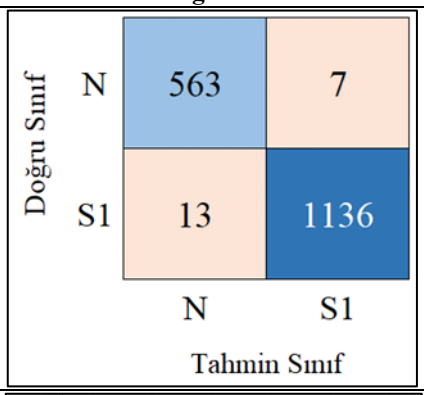
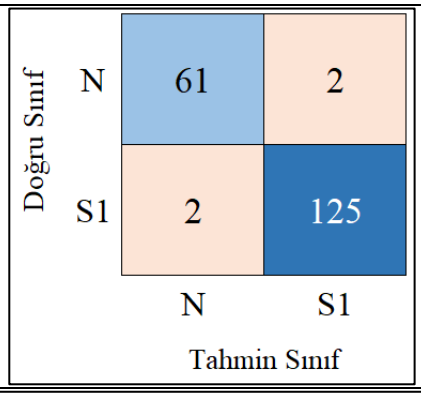
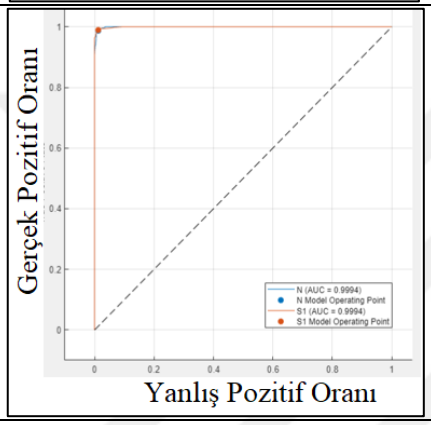
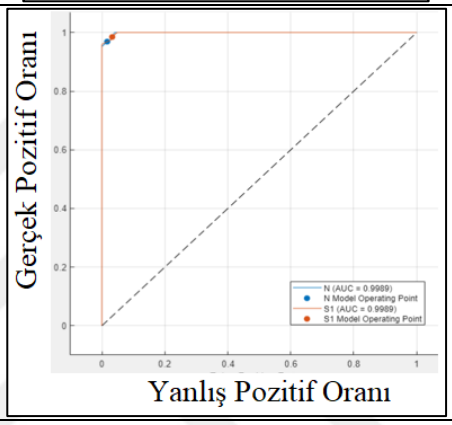
K-en yakın komşu (K nearest neighbor), makine öğrenimi modelinin performansı analiz edildiğinde, hem eğitim hem de test verilerinde oldukça başarılı olduğunu görülmektedir. Eğitim verisinde model, 563 doğru negatif ve 1136 doğru pozitif tahmin yaparak sadece 20 hata (7 yanlış pozitif, 13 yanlış negatif) yapmıştır.

Test verisinde ise 61 doğru negatif ve 125 doğru pozitif tahminle toplamda sadece 4 hata (2 yanlış pozitif, 2 yanlış negatif) yapmılmıştır.

ROC eğrileri de bu başarıyı desteklemektedir; eğitim verisi için AUC skoru 0,993 ve test verisi için 0,996 elde edilmiştir. Model her iki veri setinde de neredeyse mükemmel performans sergilemiştir.

Bu sonuçlar, modelin hem eğitim hem de test verilerinde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu göstermektedir. Tablo 3.24'de model için eğitim ve test sonuçları karışıklık matrisleri ve ROC eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.24. Model için karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri

Eğitim	Test
	
	

3.4.2.8. Modellerin Değerlendirilmesi

Çalışmada Li-ion bataryada meydana gelebilecek yangınların tespiti amacıyla Matlab R2023b akademik versiyonu kullanılarak çeşitli ML modelleri üzerinden deney verilerinin işlenmesi ve performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Denetimli öğrenme yöntemleri ve sınıflandırma tekniklerinin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, model performanslarının doğruluk, yanlış pozitif ve yanlış negatif tahmin oranları açısından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında 1900 satırdan oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Her bir algoritma, 5-katlı çapraz doğrulama yöntemiyle değerlendirilmiştir. Böylelikle Matlab programı kullanılarak toplam 5 farklı model eğitimi ve testi yapılmıştır. Yapılan bu eğitimler ve testler sonucunda her algoritma için sonuçlar elde edilmiştir. 5 modelin eğitim ve test sonuçlarını karşılaştırıldığında en verimli modelden en verimsiz modele göre sıralama Tablo 3.25'de gösterilmiştir.

Bu veriler, her bir modelin hem geliştirme (validasyon) aşamasında hem de bağımsız test veri kümesi üzerindeki performansını göstermektedir.

Tablo 3.25. Eğitim ve test sonuçlarıda en verimli modeller

Model Sıralama	Eğitim (%)	Test (%)
1.K-en yakın komşu (K nearest neighbor)	98,8	97,9
2.Binary GLM Logistic Regression	98,3	97,9
3.Efficient Linear SVM	97,6	97,4
4. Coarse Tree	96,7	95,3
5.Gaussian Naive Bayes (GNB)	92,2	90,5

K-en yakın komşu modeli eğitim sürecinde % 98,8 ve test sürecinde % 97,9 gibi yüksek bir doğruluk oranı elde etmiştir. İkinci iyi model olarak Binary GLM Logistic Regression modeli eğitim sürecindeki doğruluk oranı % 98,3 iken, test sürecinde % 97,9 olarak ölçülmüştür. Modelin K-en yakın komşu modelinin değerlerine yakın olması, Efficient Linear SVM modeli, validasyon aşamasında % 97,6 doğruluk oranı ile test edilmiş ve test sürecinde ise % 97,4 doğruluk oranına ulaşmıştır. Modelinin validasyon ve test aşamalarındaki benzer performansı, modelin kararlı ve güvenilir olduğunu işaret eder. Coarse Tree modeli eğitim sürecinde % 96,7 doğruluk oranına sahipken test aşamasında bu oran % 95,3 e düşmüştür. Gaussian Naive Bayes (GNB) eğitim sürecinde % 92,2 doğruluk oranına sahipken test aşamasında bu oran % 90,5 e düşmüştür.

Yukarıdaki analizlere dayanarak, Binary Logistic Regression ve K-Nearest Neighbor modelleri, en yüksek doğruluk ve güvenilirlik oranlarına sahip modeller olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Binary Logistic Regression modeli, test verisinde çok az hata yaparak neredeyse mükemmel bir performans sergilemiştir. Bu nedenle, önleyici bir yaklaşım ile en doğru sonuca ulaşmak için Binary Logistic Regression modelini tercih etmek mantıklı olacaktır. Sonuç olarak, bu analiz süreci, deney verilerini işleme ve ML modellerini değerlendirme konusunda güçlü bir metodoloji sunmaktadır. Yüksek doğruluk oranlarına sahip modeller, özellikle karmaşık veri yapılarını analiz etmede ve anlamlı bilgiler çıkarmada etkili olabilir. Bu çalışma, ileri analizler ve model geliştirmeler için sağlam bir temel oluşturmakta, ayrıca hangi modelin belirli bir veri kümesi veya problem tanımı için en uygun olduğunu belirlemede önemli ölçütler sağlamaktadır. Bu tür kapsamlı değerlendirmeler, ML uygulamalarının verimliliğini ve doğruluğunu artırmada kritik rol oynar. ML algoritmalarını kullanarak EV lerin bataryalarında kestirimci bakımı ön planda tutarak yangın riskini azaltmayı elde edilen bulguları sürekli izleyerek ve yorumlayarak erken uyarı sistemlerinin oluşturulmasında kullanılması potansiyeli taşımaktadır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Termal Kaçak Aşamaları ve Durdurulması Deneyleri

Temelde iki farklı söndürme sıvısının, yangın anında oluşan sıcaklık-zaman değişimleri açısından performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen veriler, yangın sürecinde sıcaklık artış eğilimini, en yüksek sıcaklığa ulaşma süresini ve ardından gerçekleşen soğuma davranışını değerlendirmeye olanak sağlamıştır.

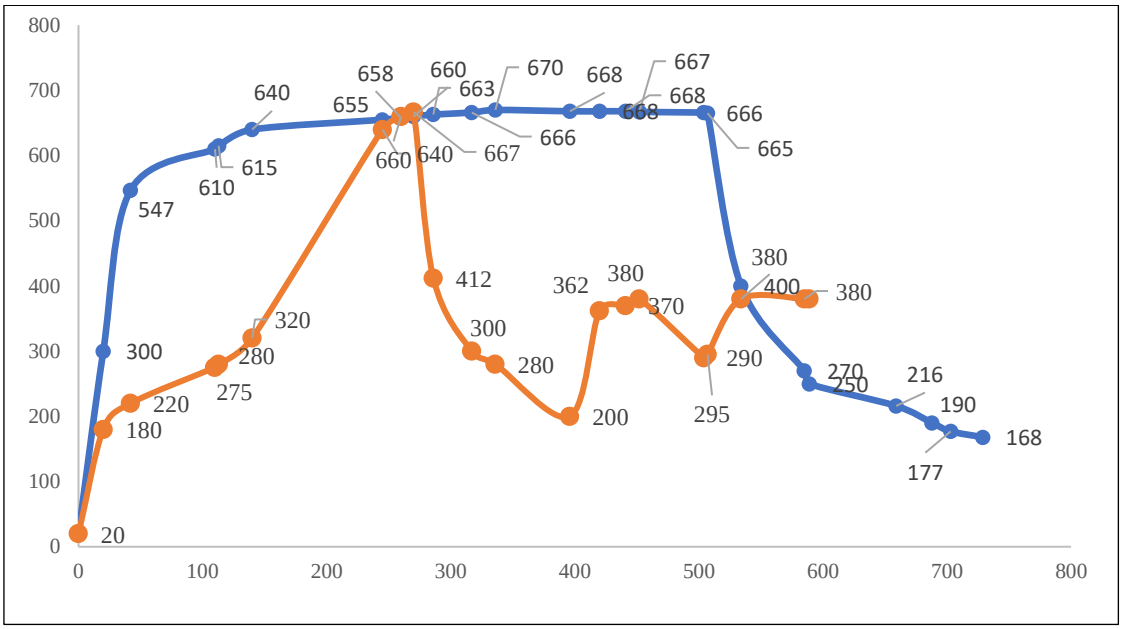
Organik söndürme sıvısının kullanıldığı deneyde sıcaklık, yangının başlamasından sonra hızlı şekilde artmış ve yaklaşık 336. s.' de 670 ℃ ulaşarak en yüksek seviyesine çıkmıştır. Bu aşamadan sonra sıcaklık kısa bir süre sabit kalmış, ardından ise yavaş ve kademeli bir şekilde düşmeye başlamıştır. Deneyin sonlandığı 729. s.' de sıcaklık 168 ℃ kadar gerilemiştir. Bu sonuç, organik sıvının yangını söndürmede geç etkili olduğunu ve batarya hücrelerinin yüksek sıcaklıkta daha uzun süre kaldığını göstermektedir. Bu durum, bataryanın yeniden alevlenme riskini artırabilecek bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir.

İnorganik söndürme sıvısının kullanıldığı diğer deneyde ise sıcaklık artışı daha erken sınırlanmış, yaklaşık 270. s.'de 667 ℃ ulaşılmıştır. Bu noktadan itibaren sıcaklık düşüşü daha erken başlamış ve 300 ile 400. s. arasında belirgin bir soğuma eğilimi gözlemlenmiştir. Deneyin 589. s.' de sonlandığı bu durumda sıcaklık hâlâ 380 ℃ civarındadır. Ölçüm süresinin daha kısa olması nedeniyle soğuma sürecinin tamamı izlenememiştir; ancak ilk müdahale etkisinin daha hızlı gerçekleştiği açıkça görülmektedir.

Elde edilen bu bulgulara göre, inorganik söndürme sıvısı, yangının ilk evresinde sıcaklık artışını daha kısa sürede bastırarak daha hızlı bir soğutma sağlamış ve ilk müdahale açısından daha etkili olmuştur. Buna karşılık organik söndürme sıvısı, yangını bastırmada gecikmeli bir etki göstererek bataryanın daha uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmasına neden olmuştur. Bu da yangın sonrası güvenlik açısından potansiyel risk oluşturabilir.

Sonuç olarak, her iki sıvının farklı avantajları bulunmakla birlikte, yangının hızla bastırılması ve sıcaklığın erken düşürülmesi açısından inorganik söndürme sıvısının daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. İki farklı deneyin karşılaştırma grafiği Şekil 4.1'de

kırmızı çizgi organik söndürme sıvısının etkisini, mavi çizgi ise inorganik söndürme sıvınının etkisini göstermektedir. Her iki deneyde de termal kaçak mekanizması esnasında sıcaklık aynı değerlere çıkmış, organik sıvı ile müdahaleye daha erken başlanmış ve 3 kez müdahale edilmesine rağmen sıcaklık değerinde termal kaçak mekanizmasını durdurmaya yetecek bir düşüm gözlenmemiştir. İnorganik sıvı ile daha geç yapılan müdahaleye rağmen sıcaklık düşümü daha keskin ve etkili olmuş, termal kaçak mekanizması baskılanarak söndürme işlemini başarıyla sonlandırmıştır.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan organik ve inorganik sıvıların termal kaçak durdurma performanlarının karşılaştırılması

4.1.1. Deney No: 1

1. Pil hücrelerinin dizilim yönü, termal kaçak mekanizmasının yayılma yönünü etkilemiştir.

2. Tek doğrultuda sıralanan hücreler, termal kaçak mekanizmasının başlangıcında birincil yayılma yönünü belirlemiştir. Ancak, ilerleyen aşamalarda termal kaçak mekanizması farklı yönlerde de yayılmıştır.

3. Isı kaynağına yakın olan ilk katman, termal kaçak mekanizmasının başladığı ve zincirleme bir reaksiyonla diğer katmanlara yayıldığı bölge olduğu belirlenmiştir.

4. Emniyet ventillerinin açılması, beyaz gaz çıkışı ve ardından alev oluşumunun başlangıcı kritik bir aşamadır. Bu, pil hücrelerinde iç basıncın artışıyla başlayan bir zincirleme reaksiyona işaret etmektedir.

5. Termal kaçak, sadece bir doğrultuda kalmayıp çeşitli yönlere yayılarak farklı hücrelerde şiddetlenmiştir.
6. İnorganik sıvı, termal kaçak mekanizmasını bastırmada etkili olmuş ve zincir reaksiyonunu kırmayı başarmıştır. Ancak, müdahale fasılalı olarak yapıldığı için sürekliliğin kesilmesi yangının yeniden şiddetlenmesine yol açmamış fakat müdahale süresini uzatmıştır.
7. Sıvının etkili kullanılabilmesi için sürekli ve kesintisiz uygulanması gerektiği belirtilmiştir.
8. Müdahale eden kişinin koruyucu ekipman kullanmaması, müdahale sürelerini sınırlamış ve etkinliği düşürmüştür.
9. Ara verilen sürede alev boyunda artış gözlenmemiştir, bu da inorganik sıvının geçici olarak da olsa termal kaçak zincirini kırma kabiliyetini göstermektedir.

4.1.2. Deney No: 2

1. Dik olarak sıralama, termal kaçak mekanizmasının başlamasını geciktirmiştir. Karışık sıralı pil grubunda termal kaçak 93. saniyede başlarken, dik sıralı pil grubunda bu süre 163. saniyeye uzamıştır.
2. Dik olarak sıralamada, ısının piller arasında eşit dağılmaması ve daha az temas yüzeyi, termal kaçak mekanizmasının tetiklenmesini yavaşlatmıştır.
3. Dik olarak sıralı pillerde, termal kaçak gaz ventilleri doğrultusunda gelişmiş, bu durum alevin yayılma yönünü de etkilemiştir.
4. Termal kaçak şiddetinin en güçlü olduğu bölge, ısı kaynağına yakın ve zincirleme reaksiyonun tetiklendiği noktada gözlemlenmiştir.
5. İnorganik tabanlı sıvı, zincir reaksiyonunu kırmada her iki deneyde de başarılı olmuştur.
6. Müdahale süresi, dizilim yönüne göre değişiklik göstermiştir: pillerin karışık sıralamada müdahale süresi 50 saniye olarak gerçekleşirken, pillerin dik sıralamada müdahale süresi: 9 saniye olarak gerçekleşmiştir. Bu fark, pillerin dik sıralamada ısının daha az yayılması ve pillerin eşit şekilde etkilenmemesiyle açıklanabilir. Alüminyum sacın ısıyı yayma etkisi, pillerin dik sıralı diziliminde termal kaçak başlangıcını geciktirmiştir. Ancak yangın sırasında sacın ısıyı çevreye ilettiği, termal kaçak mekanizmasının hızlanmasına katkıda bulunmamıştır.

7. Dik sıralı pillerin yerleştirildiği düzlem, yangının etkisinin daha az yayıldığı ve daha az sayıda pilin tamamen termal kaçak mekanizmasına girdiği bir yapı oluşturmuştur.

4.1.3. Deney No: 3

1. Sıcaklık 623°C'den başlayarak 663°C'ye ulaşmıştır (deney esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık).
2. İlk patlama 271. saniyede gerçekleşmiş, ardından modüllerde şişme ve gaz salınımı başlamıştır.
3. Şiddetli patlamalar sonucunda katot ve anot folyoları dışarı saçıldığı, bir modülün ise tamamen dağıldığı gözlemlenmiştir.
4. Hücre şişmesi ve gaz salınımı metal karkas yapıda deformasyona neden olarak termal kaçak sürecini hızlandırmıştır.
5. Modüller arası etkileşim, en ağır hasar 3. modülde yaşanmıştır, ancak diğer modüllerde termal kaçak oluşmamıştır.
6. 337. saniyede inorganik tabanlı sıvı uygulanmış, 20 saniyede termal kaçak tamamen bastırılmıştır.
7. İnorganik sıvı, termal kaçak zincir reaksiyonunu etkili bir şekilde kırmış ve hızlı müdahale imkânı sağlamıştır.
8. Hücrelerin şişmesi ve gaz salınımı, modül yapısını bozarak termal kaçak sürecini hızlandırdığı gözlemlenmiştir.
9. İnorganik söndürme maddesi, termal kaçak kontrolünde hızlı ve etkili bir çözüm olarak öne çıkmıştır.
10. Termal kaçak riskini azaltmak için modüllerin tasarımı ve yapısal dayanıklılığı güçlendirilmesi konusunda çalışılması önerilmektedir.

4.1.4. Deney No: 4

1.Daha önce inorganik sıvıyla söndürülmüş batarya modülleri tekrar tutuşturulmaya çalışılmıştır.
2. Deney 4'te, daha önce inorganik sıvıyla söndürülen bataryalar tekrar tutuşturulduğunda 7. saniyede ilk patlama gerçekleşmiştir. Önceki deneylere kıyasla, termal kaçak tekrar oluşmuş ancak tutuşma daha geç başlamış ve yangının şiddeti önceki deneylere göre daha

az yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, inorganik sıvının yangın kontrolündeki kalıcı etkisini göstermektedir.

3. Tutuşturma sonrası termal kaçak zincir reaksiyonu kaldığı yerden devam ettiği gözlemlenmiş ve VOC salınımı ile alev oluşumu gözlemlenmiştir.

4. Bu deneydeki patlamalar (7., 15. ve 24. saniyelerde) daha düşük şiddetli gelişmiş ve önceki deneylere kıyasla katot/anot folyolarının saçılması daha sınırlı olmuştur.

5. Önceki deneylerde gözlemlenen metal karkas deformasyonu oluşumu, bu deneyde hücre şişmesi ve gaz salınımının etkileri nedeniyle daha kontrollü kaldı.

6. İnorganik sıvı, 34. saniyede uygulandığında yangını sadece 10 saniye içinde (44. saniyede) tamamen söndürmüştür. Önceki deneylerle karşılaştırıldığında, yangın söndürme süresi daha kısa olmuştur. Termal kaçak zincir reaksiyonu daha etkili bir şekilde bastırıldı. Tekrar tutuşma riski, sıcaklığın düşürülme oranının etkisiyle azalmıştır.

7. Söndürme anında ölçülen başlangıç sıcaklığı 160°C olarak ölçüldüğünde 85. saniyede sıcaklık 100°C'ye kadar düşürülmüştür. Önceki deneylerde, sıcaklık kontrolü daha uzun sürmüş ve 100°C altına düşüş daha yavaş gerçekleşmiştir. Bu deneyde, daha hızlı bir soğutma sağlanmıştır, ancak sıcaklığın 100°C altında tutulamadığı durumda tekrar tutuşma riski tamamen ortadan kalkmamıştır. İnorganik sıvının yangını bastırma etkisi güçlü, ancak tekrar tutuşmayı önleme etkisi tam anlamıyla yetersiz olmuştur.

8. Önceki deneylerle karşılaştırıldığında, tekrar yanma süreci daha kontrollü ve geç başlamış, patlamaların şiddeti azalmıştır. Bu deneyde, patlamaların enerjik etkisi ve VOC salınımının alev oluşturma kapasitesi önceki deneylere göre azalmıştır. İnorganik sıvı, bataryanın termal reaksiyonlarını yavaşlatmada etkili olmuştur.

9. İnorganik sıvının hızlı soğutma yeteneği, termal kaçak sürecinin kontrolünde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak 100°C'nin altına inemeyen sıcaklık, sistemin uzun vadeli güvenliği için bir risk teşkil etmektedir.

10. Yangın kontrolü ve tekrar tutuşmayı önlemede daha iyi sonuçlar alınmıştır. İnorganik sıvının etkisi, termal kaçak zincir reaksiyonlarını kırmada ve yangını bastırmada başarılıdır. Ancak, tam güvenlik sağlamak için etkin soğutma stratejileri ve VOC yönetimi geliştirilmelidir.

4.1.5. Deney No: 5

1. Toplamda 11 patlama meydana gelmiş, patlamalar sırasında anot ve katot folyoları alüminyum hücre çeperinin yırtılması sonucu dışarı saçılmıştır. Patlama zinciri, önceki deneylere kıyasla daha enerjik ve ardışık gerçekleşmiştir (260. saniyede başlayan zincir, 311. saniyeye kadar devam etmiştir).
2. KKT ile müdahale aşaması 327. saniyede uygulanmış, ancak termal kaçak zincir reaksiyonunu kırmada etkisiz kaldığı gözlemlenmiştir. Termal kaçağın şiddetinde bir azalma olsa da alevler müdahale sonrasında eski haline dönmüştür. Uygulama sırasında bir patlama meydana gelmiş, termal kaçak kontrol edilememiştir.
3. CO_2 ile müdahale aşaması, 359. saniyede uygulamaya başlandı. 384. saniyede sonlandırılmasına rağmen termal kaçak devam ettiği gözlemlenmiştir. Termal kaçak davranışında herhangi bir olumlu değişiklik gözlemlenmemiştir. CO_2 müdahalesi sırasında da patlamalar devam etmiştir.
4. Köpük Söndürücü ile müdahale aşaması, 439. saniyede uygulamaya başlanmış ve 19 saniye içinde (458. saniyede) termal kaçak mekanizmasını tamamen bastırmıştır. Termal kaçak zincir reaksiyonunu kırmada ve yangını kontrol altına almada KKT, CO_2 ve köpük içinde en etkili yöntem köpük olmuştur. KKT ve CO_2 kullanımında, termal kaçak zincir reaksiyonunu kırmada etkisiz kalmış, yalnızca alev boyunda geçici bir azalma sağlamıştır. Müdahaleler sırasında dahi patlamalar devam etmiştir.
5. Köpük ile terma kaçak mekanizmasına müdahale sonucunda soğutma işlemi 494. saniyeye kadar devam etmiş ve sıcaklık 200℃'ye düşürülmüştür. Bu sıcaklık düşümü termal kaçak mekanizmasının tekrar başlaması için yetersiz kalmaktadır. Sıcaklığın 200℃ civarında kalması, uzun vadeli güvenlik için daha etkili bir soğutma stratejisine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

4.1.6. Deney No: 6

1. 1,5 m Yükseklikten beş ardışık düşme sonrasında bataryanın fiziksel durumunda kademeli deformasyonlar gözlemlenmiştir. İlk düşmelerde yalnızca hafif ezilmeler ve plastik kapakların yerinden çıkması gibi küçük hasarlar görülmüştür.
2. 2 m Yükseklikten beş ardışık sonrasında bataryanın fiziksel durumund, daha yüksek düşmelerde deformasyon seviyesi artmış, özellikle izolasyon malzemeleri kırılmaya ve batarya bloğu kaymaya başlamıştır. Son düşmede kısa devre nedeniyle yangın

oluşmuştur. Kısa devrenin oluşturduğı sıcaklık ileri devrede termal kaçak oluşumuna sebep vermesi muhtemeldir. Bataryanın dış koruma kapağının ezilmesi batarya pil ve modüllerinin delinmemesi halinde dahi pilin kutuplarına değmesi kısa devre oluşumuna etki etmektedir.

2. Düşme sonrası ölçülen iç sıcaklıklar genellikle 20-30 ℃ aralığında kalmıştır. 1,5 m düşme testinde maksimum sıcaklık 30,9 ℃, 2 m düşme testinde ise maksimum 33,0 ℃ olarak tespit edilmiştir. Batarya bloğu üzerinde gözlemlenen sıcaklık artışının termal kaçak başlatacak seviyeye ulaşmadığı belirlenmiştir.

3. Düşme sonrası hasarlar arasında plastik izolasyon parçalarının kırılması, batarya bloğunun yerinden çıkması ve kısa devre oluşumu yer almıştır. Kısa devre, metal üst kapağın batarya hücreleriyle temas etmesi sonucu meydana gelmiştir. İzolasyon malzemesinin yetersizliği ve batarya bileşenlerinin mekanik bütünlüğünün azalması, termal kaçak riskini artırmıştır.

4. Metal üst kapağın yerine iletken olmayan malzemeler (ör. plastik veya kompozit) kullanılması durumunda kısa devre riski azaltılabilir. Batarya taşıma süreçlerinde ek koruma önlemleri alınması gereklidir.

5. Düşme yükseklikleri ve sayıları arttıkça batarya hücrelerinin fiziksel bütünlüğü bozulmakta, bu da termal kaçak riskini artırmaktadır. Üretim tesislerinde, özellikle batarya taşımaları sırasında düşme senaryolarına karşı önlemler (batarya taşıma kasalarının sağlamlaştırılması, yüksekten düşme olasılıklarını azaltan sistemlerin tasarlanması) gibi önlemler alınmalıdır.

6. Bu deney bulguları, elektrikli taşıt üretiminde batarya yönetiminin optimize edilmesi ve güvenlik önlemlerinin artırılmasına katkı sağlayabilir.

4.1.7. Deney No:7

1. Hızlandırıcı ateşlenmesinden itibaren sıcaklık artışı gözlemlenmiştir (110. saniyede bataryada 275 ℃) ve 235. saniyede termal kaçak oluşumu başlamıştır. Termal kaçak nedeniyle alev hüzmeleri şiddetlenerek devam etmiş, bataryanın alt kapağı patlayarak hücrelerin bir kısmı yangın tavasına düşmüştür. Düşen hücreler de termal kaçak mekanizmasını sürdürerek yangının yayılmasına neden olmuştur.

2. 286. saniyeden itibaren organik tabanlı söndürme sıvısı içeren portatif cihazlarla termal kaçak mekanizmasının bastırılması için üç müdahale gerçekleştirilmiştir. Her müdahale

sırasında sıcaklık bir miktar düşürülmüş, ancak termal kaçak mekanizması tekrar aktive olmuştur.

3. 649. saniyede batarya üst kapağı patlamış ve hücrelerin bir kısmı termal kaçak sürecini bağımsız olarak sürdürmüştür. Toplamda 804. saniyeye kadar yangın ve patlamalar devam etmiştir.

4. Termal kaçak sırasında oluşan basınç artışı, bataryanın alt ve üst kapaklarının patlamasına neden olmuştur. Kısa devre kaynaklı patlamalar ve alev hüzmeleri, yanma süresince etkili olmuştur.

5. Organik tabanlı sıvı kullanılarak yapılan müdahaleler, sıcaklığı geçici olarak azaltmış ancak termal kaçak mekanizmasını tamamen durduramamıştır. Etkin bir ısı azaltımı, yangının yayılmasını önlemede kritik bir faktör olarak belirlenmiştir.

6. Bazı hücrelerin şişmesine rağmen patlamadığı, ancak kısa devrelerin batarya gövdesini eriterek hücrelerin düşmesine yol açtığı tespit edilmiştir.

7. Termal kaçak başlamadan önce etkin ısı azaltımı sağlanmalıdır. Bunun için hızlı soğutma veya termal izolasyon sistemleri entegre edilebilir. Organik tabanlı sıvılar yerine, termal kaçak reaksiyonlarını baskılayabilen alternatif söndürme maddeleri test edilmelidir.

8. Kısa devrelerin etkilerini minimize edebilecek, basınca dayanıklı batarya tasarımları geliştirilmelidir.

4.1.8. Deney No: 8

1. SOC Seviyesinin Etkisi: Batarya %88 SOC seviyesindeyken, termal kaçak oluşumu öncesinde kısa devreye bağlı patlama ve kıvılcımların sıklıkla gözlemlendiği belirtilmiştir. Yüksek SOC seviyeleri, termal kaçak mekanizmasının başlamasında daha büyük bir risk teşkil etmektedir.

2. Hücrelerin metal yüzeylere izolasyonsuz teması, kısa devreye neden olmuş ve kısa devre sonucu oluşan elektrik arkı ile delinmeler gözlemlenmiştir. Bu delinmeler hem gaz hem de alev çıkışlarına yol açarak yangının şiddetlenmesine neden olmuştur.

3. İnorganik Bazlı Söndürme Maddesi: Tek bir tüp ile termal kaçak mekanizmasına etkin müdahale sağlanmış, termal kaçak mekanizmasının durdurulması ve sıcaklığın hızlı şekilde düşürülmesi başarılmıştır. Gaz tahliyesi ve alev çıkışı da bu maddenin uygulanmasıyla kontrol altına alınmıştır.

4. İnorganik madde uygulandıktan sonra, sıcaklığın 91 saniyede 102 ℃′ye düşmesi, bu maddenin termal enerjiyi uzaklaştırma ve termal kaçak reaksiyon mekanizmasını bastırma kapasitesini göstermektedir.
5. Deney sırasında ve sonrasında yapılan gözlemler, batarya izolasyon kapaklarının erimesi, hücrelerin şişmesi ve metal yüzeylerin delinmesi gibi hasarların, yangın sırasında müdahaleyi zorlaştırdığını ortaya koymaktadır.
6. Kısa devre kaynaklı kıvılcımlar, basınçlı gaz çıkışları ve ardışık patlamaların zincir reaksiyon olarak birbirini tetiklediği belirtilmiştir. Müdahale için kullanılan malzemelerin, bu zincir reaksiyonun kırılmasında kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir.
7. EV üretim tesislerinde, batarya yangınlarına hızlı ve etkili bir şekilde müdahale edebilmek için inorganik tabanlı söndürme maddelerinin kullanılması önerilmektedir.
8. Batarya hücreleri ve metal gövde arasındaki izolasyon malzemelerinin daha dayanıklı hale getirilmesi, kısa devre riskini azaltabileceği kanaati oluşmuştur.
9. Termal kaçak mekanizmasını önlemek veya yavaşlatmak için hücre bazlı veya modül bazlı soğutma sistemlerinin entegre edilmesi, yangın riskini azaltabilir.

4.1.9. Deney No: 9

1. Bataryanın doluluk oranı (%SOC) % 88 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, bataryanın normal operasyon koşullarında olduğunu ve deneyin standart çalışma ortamını temsil ettiğini göstermektedir.
2. Yangın sürecinde, 38. saniyede, bataryanın plastik aksamlarının eriyerek damlamaya başladığı tespit edilmiştir. 146. saniyede, ilk kısa devre kaynaklı patlama sesi duyulmuş, ardından 211. saniyede patlamaların ardışık şekilde arttığı gözlemlenmiştir.
215. saniyede, termal kaçak mekanizmasının başlamasından önce söndürme eylemine karar verilmiş ve müdahale başlamıştır.
3. İnorganik tabanlı söndürme sıvısı kullanılarak, alevlerin yayılma doğrultusu kontrol altına alınmıştır. 269. saniyede söndürme başarıyla tamamlanmış, ancak duman çıkışı 379. saniyeye kadar devam etmiştir.
4. Yangın sonrası sıcaklık ölçümlerinde batarya sıcaklığının 50 saniye içinde 75 ℃′ye indirildiği tespit edilmiştir.
5. Kıvılcımların görüldüğü anda hızlı müdahale edilmesi, daha büyük patlamaların önüne geçmiştir. Termal kaçak mekanizmasının başlangıcı, kısa devre kaynaklı patlamalarla

ilişkilendirilmiştir. İnorganik söndürme sıvısı, erken müdahaleyle hem kaçak mekanizmasını engellemiş hem de bataryanın alevlenmesini kontrol altına almıştır.

6. Söndürme maddesi, bataryanın sıcaklığını hızlı şekilde düşürmüştür. Bu özellik, yangının tekrar alevlenme riskini azaltarak güvenliğin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

7. Kısa devre kaynaklı kıvılcımlar ve patlamalar, termal kaçak öncesi süreçte önemli bir sinyal olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgu, erken tespit sistemlerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

8. İnorganik tabanlı söndürme maddesi, hem alevleri bastırma hem de gaz çıkışını kontrol etme açısından etkili bulunmuştur. Ayrıca hızlı soğutma etkisi, yangın sonrası güvenliği artırmıştır.

9. İnorganik sıvının termal kaçak mekanizması başlamadan müdahale edildiğinde etkin bir şekilde oluşumu engellediğinden, EV üretim tesislerinde, kısa devre kaynaklı kıvılcımları algılayabilen erken uyarı sistemleri kurulmalıdır. Inorganik maddenin hızlı uygulanabilirliği sağlanmalıdır.

4.1.10. Deney No:10

1. Termal kaçak, batarya içindeki sıcaklık artışının kontrolsüz bir şekilde devam etmesi ve bunun sonucunda basınçlı gaz salınımı ve yanma olaylarının oluşması olarak gözlemlenmiştir.

2. Deneyde, termal kaçak mekanizmasının başlamasından önce beyaz gaz salınımı ve kısa devre kaynaklı kıvılcımlar tespit edilmiştir. Bu, termal kaçak öncesi belirtilerin açık bir göstergesidir. Termal kaçak, bataryanın iki ucundan da gaz ve alev çıkışıyla şiddetlenmiş ve yanma süresi oldukça uzun sürmüştür.

3. Termal kaçak sırasında sıcaklık 445°C'e kadar yükselmiş ve ani sıcaklık dalgalanmaları gözlemlenmiştir.

4. İnorganik tabanlı söndürücünün uygulanmasıyla sıcaklık hızla düşürülmüş; 7 saniye içinde 220 °C 'den 160 °C 'ye, 937. saniyede ise 51°C 'e kadar soğuma gerçekleşmiştir.

5. İnorganik tabanlı söndürme sıvısı, termal kaçak mekanizmasının gecikmesine katkı sağlamış ve bataryayı etkin bir şekilde soğutmuştur. Batarya yüzeyine tatbik edilen sıvı, termal kaçak mekanizmasının yeniden başlamasını belirgin bir süre geciktirmiştir.

6. İnorganik tabanlı sıvının, hızlı bir soğutma etkisi yaratmak ve termal kaçak mekanizmasını geciktirmek gibi iki ana avantaj sağladığı görülmüştür. Ancak, sıvının tamamen termal kaçak mekanizmasını engelleyemediği gözlemlenmiştir.
Söndürme işlemi ardından bataryanın termal kaçak riskine karşı uzun süre izlenmesi gerekmektedir. Bu izleme süresi, yangının yeniden başlamasını önlemek için kritik öneme sahiptir.
7.Yangın sonrası bataryanın sıcaklığı hızlı bir şekilde azaltılmalıdır. İnorganik tabanlı sıvılar, bu amaç için etkili bir çözüm sunabilir. Sıvının etkisinin hızlı olduğu ve termal kaçak süresini geciktirdiği göz önünde bulundurularak yangın müdahalelerinde kullanımı teşvik edilmelidir. İnorganik tabanlı söndürme maddelerinin, hem soğutma hem de yanmayı geciktirme özelliklerinden dolayı bu tür yangınlarda kullanılması önemlidir. Bununla birlikte, farklı batarya kimyalarına uygun söndürme maddeleri üzerine araştırmalar artırılmalıdır.
8. Kablo boşlukları ve birleşim noktalarının gaz ve alev çıkışına izin verdiği görülmüştür. Bu alanların daha güvenli bir şekilde tasarlanması, termal kaçak sırasında yayılan gazların kontrol edilmesini kolaylaştırabilir.
9. Termal kaçak sürecindeki bataryalar için özel müdahale protokolleri geliştirilmelidir. Bu protokoller, yangın şiddetinin azaltılması ve termal kaçak mekanizmasının etkili bir şekilde bastırılmasını içermelidir. Söndürme işlemi sırasında kullanılan maddelerin tekrar tutuşmayı engelleyici özellikleri değerlendirilmelidir.

4.1.11. Deney No: 11

1.Deneydeki bataryanın SOC seviyesinin % 94,5 gibi yüksek bir değer olduğu tespit edilmiştir. Bu, bataryanın yüksek enerjili bir durumda test edildiğini gösterir.
2. Kısa devre sonrası sıcaklık artışı gözlemlenmesine rağmen (96 °C en yüksek), termal kaçak mekanizmasının başlamadığı belirtilmiştir. Bu durum, PHEV bataryalarının kısa devreye karşı dayanıklılığını göstermektedir.
3. Kısa devrenin gerçekleştiği modülde sıcaklık 96 °C'e çıkarken, orta modülde 75 °C ve dış modülde 60 °C'ye kadar yükselmiştir. Bu, ısı transferi mekanizmasının kısa devrenin etkilerini diğer modüllere taşıdığını göstermektedir.

4. Sıcaklık 1370. saniye boyunca yükselmeyerek sabit kalmıştır. Bu durum, bataryanın iç enerji kapasitesinin termal kaçak mekanizmasını tetiklemeye yetmediğine işaret etmektedir.
5. Deney boyunca gaz çıkışı, duman, yanma veya mekanik deformasyon (örneğin, hücre şişmesi) gözlemlenmemiştir. Bu, bataryanın yapısal bütünlüğünün korunduğunu ve kısa devrenin sınırlı etkiler yarattığını göstermektedir.
6. Deneyde BMS (Battery Management System) ve sigortaların devre dışı bırakılması, bataryanın kendini koruma mekanizmalarının etkisini göz ardı etmeyi sağlamıştır. Bu, bataryanın yalnızca iç enerjisinin etkileriyle incelenmesine olanak tanımıştır.
7. Kısa devreye rağmen, termal kaçak mekanizmasının tetiklenmesi için yeterli sıcaklık seviyesine ulaşılmamıştır. Bu, PHEV bataryalarının termal kaçak mekanizmasının oluşumunu geciktirebilecek bir tasarım anlayışına sahip olduğunu gösterebilir.
8. Deney sonuçları, PHEV bataryalarının termal kaçak mekanizmasına girmesi için daha büyük bir enerji girdisine veya farklı dış etkilerin (örneğin, mekanik hasar, aşırı şarj, yüksek sıcaklık ortamı) varlığına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Kısa devre sonrası 96 °C en fazla sıcaklık seviyesine ulaşılması, bataryanın iç yapısının termal kaçak eşiğini henüz aşmadığını kanıtlamaktadır.
9. PHEV bataryaları, hibrit taşıtlar (HV) ile tam elektrikli taşıtlar (BV) arasında bir enerji kapasitesine sahiptir. Bu, bataryanın güvenlik sınırlarının incelenmesinde ideal bir test platformu sunmuştur.
10. Deney sırasında modüller arası ısı transferi gözlemlenmiştir. Isı yayılımını sınırlamak için batarya modülleri arasında daha etkili termal izolasyon sistemleri kullanılabilir.

4.1.12. Deney No: 12

Yangın gelişimi, 50. saniyede plastik parçaların erime sesleri, ardından 91. saniyede bataryadan beyaz duman çıkışı başlamıştır. 761. saniyede ilk patlama meydana gelmiş ve 15 patlama gözlemlenmiştir. Patlamalar sırasında, özellikle anot ve katot folyoları taşıyan yapı ciddi şekilde zarar görmüştür.

Batarya üst kapağı kompozit alt kapak ise metaldir. Üst kapağın çıkarılmasından sonra patlamaların yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, kapakların bataryanın mekanik bütünlüğünü ve hücrelerin bir arada tutulmasını sağladığını göstermektedir.

Kapakların varlığı, patlama ve yangın sürecini geciktirmiştir. Kapakların yangının yayılma hızını kontrol etmede olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Termal kaçak mekanizması 887. saniyede inorganik tabanlı söndürme sıvısı kullanılarak bastırılmıştır. Söndürme sonrası soğutma aşamasında batarya yüzey sıcaklığı 250 ℃'den 100 ℃'*ye* 27 saniyede düşmüştür. Bu, söndürme maddesinin soğutma etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Yanma sonrası incelemede, dış modüllerde hasarın daha fazla olduğu, orta modülde hasarın nispeten az olduğu tespit edilmiştir. Modülleri bir arada tutan karkas yapının, kapakların varlığıyla güçlendiği ve patlama sonrası hücre dağılmasını önlediği belirlenmiştir.

6. Yangın sırasında termal kaçak mekanizması, seri patlamalarla kendini göstermiştir. Patlamalar sırasında batarya içindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle beyaz duman ve basınçlı gaz çıkışı meydana gelmiştir. Yangın ve patlama, termal kaçak mekanizmasının enerji yayılımını artıran temel göstergeler olmuştur.
7. İnorganik tabanlı söndürme maddesi, yangını bastırmada ve hızlı soğutmada etkili olmuştur. Bu madde, yangının kontrol altına alınması ve bataryanın yeniden alevlenmesini önlemede önemli bir rol oynamıştır.
8. Kapakların varlığı, yangın ve patlama süreçlerini öteleyerek kontrol edilebilir hale getirmiştir. Bu durum, üretim güvenliği ve yangın müdahalesi açısından kapak tasarımının önemini ortaya koymaktadır. Kapakların daha yüksek ısıya dayanıklı malzemelerden yapılması, yangın ve patlamalar sırasında hücrelerin daha uzun süre bir arada tutulmasını sağlayabilir.
Kapakların sızdırmazlık özellikleri artırılarak duman ve gaz çıkışının kontrol edilmesi sağlanabilir.
9. Patlamalar, hücrelerin mekanik deformasyonu ve gaz sıkışması sonucunda meydana gelmiştir. Hücre yüzeyindeki alüminyum yapıların yırtılması, yangının şiddetini artıran faktörlerden biri olmuştur.
10. İnorganik tabanlı söndürme maddesi, özellikle üretim tesislerinde birincil söndürme maddesi olarak kullanılabilir. Soğutma etkisinin hızlı olması nedeniyle bu tür söndürme maddeleri, tekrar alevlenme riskini minimuma indirebilir.

11. Bataryaların üretim sürecinde termal kaçak oluşum riskini minimuma indirmek için özel yangın algılama ve söndürme sistemleri geliştirilmelidir.

4.2. Termal Kaçağın Makine Öğrenmesi İle Modellenmesi Deneyleri

1.Toplanan Veriler: 1900 veri satırından oluşan bir veri kümesi kullanılmış. Veri kümesi, %90 eğitim ve %10 test olarak ayrılmıştır. Çapraz Doğrulama: 5-katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak model genelleme yeteneği değerlendirilmiştir. Ki-Kare Testi: Toplam 9 özelliğin analizi yapılmış, en ilgili 5 özellik seçilmiştir. 37 farklı denetimli öğrenme algoritması arasından performansı en yüksek 5 model seçilmiştir:

K-en Yakın Komşu (KNN), Binary Logistic Regression, Efficient Linear SVM, Coarse Tree, Gaussian Naive Bayes (GNB),

Doğruluk Ölçütü: Karışıklık matrisleri ve ROC eğrileri kullanılarak doğruluk, yanlış pozitif ve negatif tahmin oranları analiz edilmiştir. KNN: Eğitimde %98,8, testte %97,9 doğruluk, Binary Logistic Regression: Eğitimde %98,3, testte %97,9 doğruluk, Efficient Linear SVM: Eğitimde %97,6, testte %97,4 doğruluk, Coarse Tree: Eğitimde %96,7, testte %95,3 doğruluk, GNB: Eğitimde %92,2, testte %90,5 doğruluk, En İyi Modeller: KNN ve Binary Logistic Regression, en yüksek doğruluk oranlarıyla öne çıkmıştır.

Binary Logistic Regression, en doğru sonuçları vermesi nedeniyle erken uyarı sistemlerinde önerilen modeldir. Bu analiz süreci, bataryaların izlenmesinde ve kestirimci bakım sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir temel oluşturmuştur.

EV bataryaları için ML algoritmaları, yangın riskini azaltan ve erken müdahaleye olanak tanıyan sistemler geliştirme potansiyeline sahiptir.

Bu tür bir yaklaşım, elektrikli taşıtlar (EV) ve enerji depolama sistemlerinde güvenliği artırabilir. Özellikle erken uyarı sistemleri ile bataryaların sıcaklık, gaz emisyonları ve diğer kritik parametrelerini sürekli izleyerek risklerin azaltılması hedeflenmektedir.

5. ÖNERİLER

5.1. Termal Kaçak Öncesi Erken Belirtilerin Önemi

Termal kaçak mekanizması başlamadan önce kısa devre kaynaklı kıvılcımlar, sıcaklık artışı ve beyaz gaz salınımı gibi belirtilerin önemli sinyaller olduğu anlaşılmıştır. Bu sinyaller de, erken müdahale ve termal kaçak mekanizması oluşumuna karşı önleyici tedbirlerin alınması için kritik olduğu anlaşılmaktadır.

Bataryaların depolandığı alanlarda, batarya ve elektrikli taşıt üretim tesislerinde, elektrikli taşıtlarda, elektrikli taşıtların kapalı alanlardaki park yerlerinde erken uyarı sistemleri, bu belirtileri tespit edebilecek sensörlerle donatılmalıdır. Özellikle sıcaklık, gaz emisyonları ve kısa devre kaynaklı anomalilerin izlenmesi için uygun cihazlar kullanılmalıdır.

5.2. İnorganik Tabanlı Söndürme Maddelerinin Etkisi

İnorganik tabanlı söndürme maddeleri, yangını bastırmada ve bataryaları hızlı bir şekilde soğutmada oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sıvı aynı zamanda termal kaçak mekanizmasını geciktirme ve yangının tekrar alevlenmesini önleme konusunda avantaj sağladığı tespit edilmiştir. İnorganik tabanlı söndürme maddeleri, Li-ion üretim tesisleri ve enerji depolama sistemlerinde, elektrikli taşıtlarda birincil yangın söndürme aracı olarak kullanılması önerilmektedir. Araştırma NMC ve LCO tip Li-ion batarya ve pillerle gerçekleştirilmiş olup benzer çalışmaların diğer 4 tip Li-ion pil ve batarya ile özellikle de NCA ve LFP ile araştırma yapılması önerilmektedir.

5.3. Batarya Tasarımı ve Termal İzolasyon

EV Batarya modülleri arasında termal yalıtkan eksikliği, ısı yayılımını artırarak yangın riskini yükseltebilir. Modüller arası ısı transferini önlemek için yüksek performanslı termal yalıtkan materyalleri kullanılmalıdır.

Sıcaklığın artması ve pil ile modüllerin şişmesi metal batarya kapaklarına temas neticesinde kısa devre oluşumuna ve termal kaçak mekanizması oluşumuna yol açabilmektedir. Modül kapaklarının yalıtkan ve dayanıklı malzemelerden yapılması, yangın ve patlamaların etkilerini sınırlamada faydalıdır.

5.4. Makine Öğrenmesi ile Erken Uyarı Sistemleri

Makine öğrenmesi algoritmaları, termal kaçak mekanizmasını modellemek ve tahmin etmek için etkili bir çözüm sunmaktadır. Binary Logistic Regression ve KNN modelleri, yüksek doğruluk oranlarıyla erken uyarı sistemleri için uygundur. EV bataryalarında kullanılan erken uyarı sistemlerinde makine öğrenmesi tabanlı modeller (özellikle Binary Logistic Regression) uygulanmalıdır.

5.5. Batarya Yönetim Sistemlerinin (BMS) Geliştirilmesi

Bataryaların yapısal bütünlüğünü koruması ve termal kaçak eşiğine ulaşmaması için BMS önemli bir rol oynamaktadır. BMS, kısa devre, aşırı şarj ve sıcaklık artışı, gaz miktarındaki anlık değişimler gibi durumları gerçek zamanlı izlemeli ve bu durumlara müdahale edebilmelidir.

5.6. EV Bataryaları Üzerinde Termal Kaçak Önleme Çalışması

EV taşıtlarda batarya içine yerleştirilen CO ve CO_2 sensörleri ile gaz oluşum durumu sürekli izlenmesinin sağlanmalıdır.

Bu izlemeden elde edilen sonuçlar BMS üzerinde konumlandırılacak ML modellerinden en başarılı sonuç veren Binary Logistic Regression ve KNN modelleri ile değerlendirilmelidir.

Batarya içine, termal kaçak mekanizması oluşumunda zincir reaksiyonu kırabilen ve sıcaklığı hızlıca kritik sıcaklık seviyesi altına indirdiği deneysel yollarda tespit edilen inorganik sıvı basınçlı tüpler vasıtasıyla konumlandırılmalıdır.

Anormallik sürekli ölçülen CO ve CO_2 gaz değişimlerinin ML modeli sayesinde tespit edildiğinde BMS devreye girerek batarya içinde konumlandırılmış inorganik sıvıyı batarya içine püskürtülmesi önerilmektedir.

5.7. Entegre, Akıllı ve Proaktif Güvenlik Yaklaşımı

Bu tez sonucunda, Li-ion bataryaların termal kaçak kaynaklı yangınlarında, pasif değil, aktif ve akıllı güvenlik önlemlerinin hayati önem taşıdığını ortaya koymuştur. Bu

bağlamda, bir sonraki adım olarak elektrikli araç (EV) batarya güvenliğinde çok katmanlı, bütünleşmiş ve proaktif bir stratejinin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu strateji üç ana eksende şekillenmelidir:

5.7.1. Akıllı Erken Uyarı ve Müdahale Sistemlerinin Geliştirilmesi

Termal kaçak başlamadan önce gözlenen kıvılcım, sıcaklık artışı ve gaz salımı gibi ön sinyallerin tespiti, yangınların önlenmesinde kritik bir eşiktir. Bu bağlamda, elektrikli araçların bataryalarının içine yerleştirilecek sensör destekli erken uyarı sistemleri, yalnızca izleme değil, anomali tespiti sonrası otomatik müdahale kabiliyeti de kazanmalıdır. Özellikle sıcaklık, CO/CO_2 ve gaz kompozisyonundaki değişimleri tespit eden sensörlerin, Binary Logistic Regression ve KNN gibi yüksek doğruluklu makine öğrenmesi modelleri ile entegre edilmesi gerekmektedir.

5.7.2. Aktif Yangın Bastırma Entegrasyonu ile BMS'nin Dönüştürülmesi

Geleneksel Batarya Yönetim Sistemlerinin (BMS) ötesine geçilerek, BMS'nin gerçek zamanlı veri analizi yapan ve yalnızca durum izlemeyen, aynı zamanda otonom müdahalede bulunabilen bir karar destek sistemine dönüştürülmesi gereklidir. Bu sistem, sensörlerden gelen veriler doğrultusunda batarya içinde yer alan basınçlı tüpler aracılığıyla yangın önleyici inorganik sıvıyı otomatik olarak püskürtebilmelidir. Bu sıvı yalnızca yangını bastırmakla kalmamakta, termal kaçak zincirini de kırarak yeniden alevlenme ihtimalini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Sonuç olarak, batarya yangınlarını önlemede ve söndürmede tekil önlemler artık yeterli değildir. Bu çalışma göstermektedir ki, sensör teknolojileri, yapay zeka algoritmaları, yangın bastırıcı materyaller ve tasarım mühendisliği birleşimiyle oluşturulmuş, entegre ve akıllı güvenlik mimarisi, elektrikli araçların güvenliği için bir sonraki kaçınılmaz adımdır.

KAYNAKLAR

Aamir, M., Namoun, A., Munir, S., Aljohani, N., Alanazi, M. H., Alsahafi, Y., Alotibi, F. (2024). Brain Tumor Detection and Classification Using an Optimized Convolutional Neural Network. *Diagnostics, 14*(16), 1714. https://doi.org/10.3390/diagnostics14161714

Abhila, B., Delphin Periyanayagi, M., Koushika, M., Joseph, M. N., Dhanalakshmi, R. (2021). Spam Detection System Using Supervised ML. *In 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSCAN53069.2021.9526421

Abraham, D. P., Roth, E. P., Kostecki, R., McCarthy, K., MacLaren, S., Doughty, D. H. (2006). Diagnostic Examination of Thermally Abused High-Power Lithium-Ion Cells. *Journal of Power Sources, 161*(1), 648–657. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.088

Abraham, D. P., Spila, T., Furczon, M. M., Sammann, E. (2008). Evidence of Transition-Metal Accumulation on Aged Graphite Anodes by SIMS. *Electrochemical and Solid-State Letters, 11*(12), A226. https://doi.org/10.1149/1.2987680

Ahmad, G. N., Shafiullah, Fatima, H., Abbas, M., Rahman, O., Imdadullah, Alqahtani, M. S. (2022). Mixed Machine Learning Approach for Efficient Prediction of Human Heart Disease by Identifying the Numerical And Categorical Features. *Applied Sciences, 12*(15), 7449. https://doi.org/10.3390/app12157449

Akbulut, Y., Sengur, A., Guo, Y., Smarandache, F. (2017). NS-k-NN: Neutrosophic Set-Based K-Nearest Neighbors Classifier. *Symmetry, 9*(9), 179. https://doi.org/10.3390/sym9090179

Al-Hamadani, M. N. A., Fadhel, M. A., Alzubaidi, L., Harangi, B. (2024). Reinforcement Learning Algorithms and Applications in Healthcare and Robotics: a Comprehensive and Systematic Review. *Sensors, 24*(8), 2461. https://doi.org/10.3390/s24082461

Al-Naeem, M., Rahman, M. M. H., Banerjee, A., Sufian, A. (2023). Support Vector Machine-Based Energy Efficient Management of UAV Locations for Aerial Monitoring of Crops Over Large Agriculture Lands. *Sustainability, 15*, 6421. https://doi.org/10.3390/su15086421

Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences, 13*(10), 6016. https://doi.org/10.3390/app13106016

Alarifi, I. M., Al-Sulaiman, F. A., Rawa, M. (2016). Investigation of Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries. *Journal of Energy Storage, 8*, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.est.2016.04.008

Alghamdi, S. J. (2022). Classifying High Strength Concrete Mix Design Methods Using Decision Trees. *Materials, 15*(5), 1950. https://doi.org/10.3390/ma15051950

Alsharif, B., Altaher, A. S., Altaher, A., Ilyas, M.,Alalwany, E. (2023). Deep Learning Technology to Recognize American Sign Language Alphabet. *Sensors, 23*(18), 7970. https://doi.org/10.3390/s23187970

Andersson, A. S., Kalska, B., Häggström, L., Thomas, J. O. (2000). Lithium Extraction/Insertion in $LiFePO_4$: An X-Ray Diffraction and Mössbauer Spectroscopy Study. *Solid State Ionics, 130*(1–2), 41–52. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00311-8

Arlot, S., Celisse, A. (2010). A Survey of Cross-Validation Procedures for Model Selection. *Statistics Surveys, 4*, 40–79. https://doi.org/10.1214/09-SS054

Aşık S., (2013), Türk Otomobil Tarihinde Bir İlk: Devrim Arabası, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 337421.

Aurbach, D., Zaban, A., Ein-Eli, Y., Weissman, I., Chusid, O., Markovsky, B., Levi, M., Levi, E., Schechter, A., Granot, E. (1997). Recent Studies on the Correlation Between Surface Chemistry, Morphology, Three-Dimensional Structures and Performance of Li and Li-C Intercalation Anodes in Several Important Electrolyte Systems. *Journal of Power Sources, 68*, 91–98. https://doi.org/10.1016/s0378-7753(97)02575-5

Avgın, M., Yılmaz, A., Ünsal, M. (2014). Lityum İon Bataryaların Deşarj Durumu Davranışlarının Genetik İfade Programlama ile Kestirimi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17*(1), 10-15. https://doi.org/10.17780/ksujes.72825

Aydın, H. (2011). Lityum-İyon Polimer Pillerinde Kullanım Amaçlı Bor İçerikli Polimer Elektrolitlerin Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fatih Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 290251.

Babu Sanker, S., Baby, R. (2022). Phase Change Material Based Thermal Management of Lithium Ion Batteries: a Review on Thermal Performance of Various Thermal Conductivity Enhancers. *Journal of Energy Storage, 50*, 104606. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104606

Badamasi, Y. A. (2014). The Working Principle of an Arduino. *In 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)* (pp. 1-4). Abuja, Nigeria. https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578

Bai, J., Wang, Z., Gao, T., Bai, W., Wang, J. (2021). Effect of Mechanical Extrusion Force on Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries Caused by Flat Heating. *Journal of Power Sources, 506*, 230305. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230305

Balcı, M. E., Kılıç, F., Karakaya, O., Dağlı, İ. (2020). Elektrikli Taşıtlar: Mekanik Güç Aktarma Yapıları, Elektrik Güç Sistemleri ve Şarj Yaklaşımları. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi, 3*(2), 176-201.

Banerjee, A., Ziv, B., Shilina, Y., Luski, S., Halalay, I. C., Aurbach, D. (2017a). Multifunctional Manganese Ions Trapping and Hydrofluoric Acid Scavenging Separator for Lithium Ion Batteries Based on poly(ethylene-alternate-maleic acid) dilithium salt. *Advanced Energy Materials, 7*(3), 1601556. https://doi.org/10.1002/aenm.201601556

Banerjee, A., Ziv, B., Luski, S., Aurbach, D., Halalay, I. C. (2017b). Increasing The Durability of Li-Ion Batteries by Means of Manganese Ion Trapping Materials With Nitrogen Functionalities. *Journal of Power Sources, 341*, 457–465. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.036

Bang, H. J., Joachin, H., Yang, H., Amine, K., Prakash, J. (2006). Contribution of the Structural Changes of $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ Cathodes on The Exothermic Reactions in Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society, 153*(4). https://doi.org/10.1149/1.2171828

Bárcenas, R., Gonzalez-Lima, M., Ortega, J., Quiroz, A. (2022). On Subsampling Procedures for Support Vector Machines. *Mathematics, 10*(20), 3776. https://doi.org/10.3390/math10203776

Barmpoutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., Grammalidis, N. (2020). A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors, 20*(22), 6442. https://doi.org/10.3390/s20226442

Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., Riu, D. (2013). A Review on Lithium-Ion Battery Ageing Mechanisms and Estimations for Automotive Applications. *Journal of Power Sources, 241*, 680–689. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040

Barros, W. K. P., Barbosa, M. T., Dias, L. A., Fernandes, M. A. C. (2022). Fully Parallel Proposal of Naive Bayes on FPGA. *Electronics, 11*(16), 2565. https://doi.org/10.3390/electronics11162565

Bak, S. M., Hu, E., Zhou, Y., Yu, X., Senanayake, S. D., Cho, S. J., Kim, K. B., Chung, K. Y., Yang, X. Q., Nam, K. W. (2014). Structural Changes and Thermal Stability of Charged $LiNi_xMn_yCo_zO_2$ Cathode Materials Studied by Combined in Situ Time-Resolved XRD and Mass Spectroscopy. *ACS Applied Materials & Interfaces, 6*(24), 22594–22601. https://doi.org/10.1021/am506712c

Bhatt, A. I., Best, A. S., Huang, J., Hollenkamp, A. F. (2010). Application of the N-propyl-N-methyl-pyrrolidinium bis(fluorosulfonyl)imide RTIL Containing Lithium bis(fluorosulfonyl)imide in Ionic Liquid Based Lithium Batteries. *Journal of The Electrochemical Society, 157*(1). https://doi.org/10.1149/1.3257978

Biçer, E. (2012), Lityum İyon Pillerde Yeni Organik Polimerler, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 328191.

Bilici B. (2017). Sn Esaslı Anotların Elektrokimyasal Yöntemlerle Üretilmesi Ve Lityum İyon Bataryalarda Kullanımlarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 467164.

Bingöl, K., Er Akan, A., Örmecioğlu, H. T., Er, A. (2020). Depreme Dayanıklı Mimari Tasarımda Yapay Zeka Uygulamaları: Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Yöntemi ile Düzensiz Taşıyıcı Sistem Tespiti. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35*(4), 2197-2209. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.647981

Bondarenko, V., Skurikhin, D., Wojciechowski, J. (2019). The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 114-125). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_10

Boloor, A. J. (2015). Arduino by Example: Design and Build Fantastic Projects and Devices Using the Arduino Platform (1st ed.). *Packt Publishing*.

Bostan E.A., (2019). Elektrikli Taşıtlardaki Lityum İyon Bataryalar İçin Şarj Durumu Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 596162.

Brand, M., Gläser, S., Geder, J., Menacher, S., Obpacher, S., Jossen, A., Quinger, D. (2016). Electrical Safety of Commercial Li-Ion Cells Based on NMC and NCA Technology Compared to LFP Technology. *World Electric Vehicle Journal, 6*, 572-580. https://doi.org/10.3390/wevj6030572

Buccolini, L., Ricci, A., Scavongelli, C., DeMaso-Gentile, G., Orcioni, S., Conti, M. (2016). Battery Management System (BMS) Simulation Environment for Electric Vehicles. *In 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 1-6). Florence, Italy. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555475

Cao, H., Xia, B., Xu, N., Zhang, C. (2004). Structural and Electrochemical Characteristics of Co And Al Co-Doped Lithium Nickelate Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Alloys and Compounds, 376*(1-2), 282-286. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.01.008

Ceylan, M., Sarıkurt, T., Balıkçı, A. (2013). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Lityum-İyon Bataryalar İçin Model Geliştirilmesi. *5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Kongresi*, 23-24, Kocaeli, Türkiye.

Chandrasekaran, R., Koh, M., Ozhawa, Y., Aoyoma, H., Nakajima, T. (2009). Electrochemical Cell Studies on Fluorinate Natural Graphite in Propylene Carbonate Electrolyte with Difluoromethyl Acetate (MFA) Additive for Low Temperature Lithium Battery Application. *Journal of Chemical Sciences, 121*, 339-346. https://doi.org/10.1007/s12039-009-0039-2

Chen, D., Ao, Y., Liu, S. (2020). Semi-Supervised Learning Method of U-Net Deep Learning Network for Blood Vessel Segmentation in Retinal Images. *Symmetry, 12*(7), 1067. https://doi.org/10.3390/sym12071067

Chen, D., Jiang, J., Kim, G., Yang, C., Pesaran, A. (2015). Comparison of Different Cooling Methods for Lithium-Ion Battery Cells. *Applied Thermal Engineering, 94*(2) https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015

Chen, H., Lin, Q., Xu, Q., Yang, Y., Shao, Z., Wang, Y. (2014.b). Plasma Activation and Atomic Layer Deposition of TiO_2 on Polypropylene Membranes For Improved Performances of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Membrane Science, 458*, 217-224. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.004

Chen, J., Wang, S., Cai, D., Wang, H. (2014.a). Porous SiO_2 as a Separator to Improve the Electrochemical Performance of Spinel $LiMn_2O_4$ Cathode. *Journal of Membrane Science, 449*, 169-175. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.08.028

Chen, M., Ouyang, D., Weng, J., Liu, J., Wang, J. (2019). Environmental Pressure Effects on Thermal Runaway and Fire Behaviors of Lithium-Ion Battery with Different Cathodes and State of Charge. *Process Safety and Environmental Protection, 130*, 250-256. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.023

Chen, M., Liu, J., He, Y., Yuen, R., Wang, J. (2017). Study of the Fire Hazards of Lithium-Ion Batteries at Different Pressures. *Applied Thermal Engineering, 125*, 1061-1074. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.131

Chen, W., Jiang, J., Wen, J. (2020). Thermal Runaway Induced by Dynamic Overcharge of Lithium-Ion Batteries Under Different Environmental Conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 146*, 855-863. https://doi.org/10.1007/s10973-020-10037-x

Chen, Z., Qin, Y., Amine, K. (2009). Redox Shuttles for Safer Lithium-Ion Batteries. *Electrochimica Acta, 54*(24), 5605-5613. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.05.017

Chun, S. J., Choi, E. S., Lee, E. H., Kim, J. H., Lee, S. Y., Lee, S. Y. (2012). Eco-Friendly Cellulose Nanofiber Paper-Derived Separator Membranes Featuring Tunable Nanoporous Network Channels for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry, 22*(32), 16618-16626. https://doi.org/10.1039/c2jm32415f

Chung, Y. S., Yoo, S. H., Kim, C. K. (2009). Enhancement of Meltdown Temperature of The Polyethylene Lithium-Ion Battery Separator Via Surface Coating With Polymers Having High Thermal Resistance. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 48*(9), 4346-4351. https://doi.org/10.1021/ie900096z

Cui, Y., Liu, J., Han, X., Sun, S., Cong, B. (2022). Full-Scale Experimental Study on Suppressing Lithium-Ion Battery Pack Fires from Electric Vehicles. *Fire Safety Journal, 129*. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103562

Dahn, J. R., Fuller, E. W., Obrovac, M., von Sacken, U. (1994). Thermal Stability of Li_xCoO_2, Li_xNiO_2 and λ-MnO_2 and Consequences for the Safety of Li-Ion Cells. *Solid State Ionics, 69*(3-4), 265-270. https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)90415-4

Dalgıç M., (2021), Elektrikli Otomobiller İle Gelecekteki Kullanıcı ve Tasarım Etkileşimi Üzerine Bir Metot Önerisi, Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 698047.

Davidsson, K., Karlsson, I., Leisner, P., Bobert, M., Blomqvist, P. (2010). Safety Test Methods for EV Batteries. *World Electric Vehicle Journal, 4*, 414-420. https://doi.org/10.3390/wevj4020414

Dhiman, H. S., Deb, D., Balas, V. E. (2020). *Supervised Machine Learning in Wind Forecasting and Ramp Event Prediction* (1st ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2019-0-03735-1

Doğrusöz M. (2014). Lityum İyon Piller İçin Nano Yapılı Katot Aktif Maddesinin Sentezlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 351972.

Dorsz, A., Lewandowski, M. (2022). Analysis of Fire Hazards Associated with The Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. *Energies, 15*(1), 11. https://doi.org/10.3390/en15010011

Doughty, D. H., Crafts, C. C. (2006). FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual For Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications. *SANDIA Report*, SAND2005-3123. https://doi.org/10.2172/889934

Duan, J., Tang, X., Dai, H., Yang, Y., Wu, W., Wei, X., Huang, Y. (2020). Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. *Electrochemical Energy Reviews, 3*(1-42). https://doi.org/10.1007/s41918-019-00060-4

Dubey, Y., Mange, P., Barapatre, Y., Sable, B., Palsodkar, P., Umate, R. (2023). Unlocking Precision Medicine for Prognosis of Chronic Kidney Disease Using Machine Learning. *Diagnostics, 13*, 3151. https://doi.org/10.3390/diagnostics13193151

Ekici M.B. (2022). Yüksek Enerji Yoğunluklu Lityum İyon Pil Elektrotlarının Hadde Parametrelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 774303.

Elia, G. A., Ulissi, U., Jeong, S., Passerini, S., Hassoun, J. (2016). Exceptional Long-Life Performance of Lithium-Ion Batteries Using Ionic Liquid-Based Electrolytes. *Energy & Environmental Science, 10*, 3210-3220. https://doi.org/10.1039/C6EE01295G

Eltouny, K., Gomaa, M., Liang, X. (2023). Unsupervised Learning Methods for Data-Driven Vibration-Based Structural Health Monitoring: A Review. *Sensors, 23*(6), 3290. https://doi.org/10.3390/s23063290

Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., Thrun, S. (2017). Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks. *Nature, 542*(7639), 115-118. https://doi.org/10.1038/nature21056

Fahad Mon, B., Wasfi, A., Hayajneh, M., Slim, A., Abu Ali, N. (2023). Reinforcement Learning in Education: A Literature Review. *Informatics, 10*(3), 74. https://doi.org/10.3390/informatics10030074

Fang, M., Zhou, J., Fei, H., Yang, K., He, R. (2022). Porous-Material-Based Composite Phase Change Materials for A Lithium-Ion Battery Thermal Management System. *Energy Fuels*. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c04444

Farhadpour, S., Warner, T. A., Maxwell, A. E. (2024). Selecting and Interpreting Multiclass Loss and Accuracy Assessment Metrics for Classifications with Class Imbalance: Guidance And Best Practices. *Remote Sens, 16*, 533. https://doi.org/10.3390/rs16030533

Feng, X., Fang, M., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wang, H., Zhang, M. (2014). Thermal Runaway Features Of Large Format Prismatic Lithium Ion Battery Using Extended Volume Accelerating Rate Calorimetry. *Journal of Power Sources, 255*, 294-301. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.005

Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., He, X. (2018). Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review. *Energy Storage Materials, 10*, 246-267. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013

Fernandes, Y., Bry, A., de Persis, S. (2018). Identification and Quantification of Gases Emitted During Abuse Tests by Overcharge of a Commercial Li-Ion Battery. *Journal of Power Sources, 389*, 106-119. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.034

Fernicola, A., Croce, F., Scrosati, B., Watanabe, T., Ohno, H. (2007). LiTFSI-BEPyTFSI as an Improved Ionic Liquid Electrolyte for Rechargeable Lithium Batteries. *Journal of Power Sources, 174*(1), 342-348. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.013

Ferrari, S., Quartarone, E., Mustarelli, P., Magistris, A., Protti, S., Lazzoroni, S., Fagnoni, M., Albini, A. (2009). A Binary Ionic Liquid System Composed of N-methoxyethyl-N-methylpyrrolidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)-imide and lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide: A New Promising Electrolyte for Lithium Batteries. *Journal of Power Sources, 194*(1), 45-50. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.013

Finegan, D. P., Darcy, E., Keyser, M., Tjaden, B., Heenan, T. M. M., Jervis, R., Bailey, J. J., Vo, N. T., Magdysyuk, O. V., Drakopoulos, M., Di Michiel, M., Rack, A., Hinds, G., Brett, D. J. L., Shearing, P. R. (2018). Thermal Runaway: Identifying the Cause of Rupture of Li-Ion Batteries During Thermal Runaway. *Advanced Science, 5*(1), 1870003. https://doi.org/10.1002/advs.201870003

Fischer, T., Krauss, C. (2018). Deep Learning with Long Short-Term Memory Networks for Financial Market Predictions. *European Journal of Operational Research, 270*(2), 654-669. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.054

Forgez, C., Do, D. V., Friedrich, G., Morcrette, M., Delacourt, C. (2010). Thermal Modeling of a Cylindrical $LiFePO_4$/Graphite Lithium-Ion Battery. *Journal of Power Sources, 195*(9), 2961-2968. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.105

Furda, A., Vlacic, L. (2010). Real-Time Decision Making for Autonomous City Vehicles. *Journal of Robotics and Mechatronics, 22*(6), 694-701. https://doi.org/10.20965/jrm.2010.p0694

Gabbar, H. A., Othman, A. M., Abdussami, M. R. (2021). Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. *Technologies, 9*(28). https://doi.org/10.3390/technologies9020028

García, S., Ramírez-Gallego, S., Luengo, J., Benítez, J. M., Herrera, F. (2016). Big Data Preprocessing: Methods and Prospects. *Big Data Analytics, 1*(9). https://doi.org/10.1186/s41044-016-0014-0

Gerlich, M. (2023). Perceptions and Acceptance of Artificial Intelligence: a Multi-Dimensional Study. *Social Sciences, 12*(9), 502. https://doi.org/10.3390/socsci12090502

Ghannoum, A., Nieva, P., Yu, A., Khajepour, A. (2017). Development of Embedded Fiber-Optic Evanescent Wave Sensors for Optical Characterization of Graphite Anodes in Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces, 9*(47), 41284-41290. https://doi.org/10.1021/acsami.7b13464

Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., Gamble, G. (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies, 13*, 5117. https://doi.org/10.3390/en13195117

Gnanaraj, J. S., Zinigrad, E., Asraf, L., Sprecher, M., Gottlieb, H. E., Geissler, W., Schmidt, M., Aurbach, D. (2003). On the Use of $LiPF_3(CF_2CF_3)_3$ (LiFAP) Solutions for Li-Ion Batteries: Electrochemical and Thermal Studies. *Electrochemistry Communications*, *5*(11), 946-951. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2003.08.020

Golubkov, A. W., Fuchs, D. (2014). Thermal Runaway: Causes and Consequences on Cell Level. In A. Thaler & D. Watzenig (Eds.), Automotive Battery Technology. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02523-0_3

Golubkov, A. W., Scheikl, S., Planteu, R., Voitic, G., Wiltsche, H., Stangl, C., Fauler, G., Thaler, A., Hacker, V. (2015). Thermal Runaway of Commercial 18650 Li-Ion Batteries with LFP and NCA Cathodes – Impact of State of Charge and Overcharge. *The Royal Society of Chemistry*. https://doi.org/10.1039/C5RA05897J

Gandoman, F. H., El-Shahat, A., Alaas, Z. M., Ali, Z. M., Berecibar, M., Abdel Aleem, S. H. E. (2022). Understanding Voltage Behavior of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Applications. *Batteries*, *8*(10), 130. https://doi.org/10.3390/batteries8100130

Gong, W., Wei, S., Ruan, S., Shen, C. (2019). Electrospun Coaxial PPESK/PVDF Fibrous Membranes with Thermal Shutdown Property Used for Lithium-Ion Batteries. *Materials Letters*, *244*, 126-129. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.009

Gori, M., Betti, A., Melacci, S. (2023). Machine Learning: A Constraint-Based Approach. *Elsevier*. https://doi.org/10.1016/C2020-0-03158-0

Göktepe, H. (2009), Lityum İyon Pillerde Katot Aktif Madde Olarak Kullanılan $LiFePO_4$ Bileşiğinin Karbon Kaplama ve Metal Katkılama ile Elektrokimyasal Performansının Arttırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 246139.

Gu, I.-M., Yeon, Y.-M., Ryu, D.-S., Kim, S.-H. (2023). Optimization of Smoke-Detector Installation Location Based on Effect of Fan Equipment Inside Distribution Panel on Fire Detection Performance. *Fire*, *6*(2), 49. https://doi.org/10.3390/fire6020049

Guo, D., Sun, L., Zhang, X., Xiao, P., Liu, Y., Tao, F. (2018). The Causes of Fire and Explosion of Lithium Ion Battery for Energy Storage. *In 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 1-5). Beijing, China. https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582017

Guo, R., Lu, L., Ouyang, M., Feng, X. (2016). Mechanism of the Entire Overdischarge Process and Overdischarge-Induced Internal Short Circuit in Lithium-Ion Batteries. *Scientific Reports*, *6*, 30248. https://doi.org/10.1038/srep30248

Güney E., (2023). Suda Çözünen Polifosfazen Esaslı Kompozit İletken Polimerlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Lityum İyon Bataryalarda Bağlayıcı Olarak Kullanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 805775.

Han, H. B., Zhou, S. S., Zhang, D. J., Feng, S. W., Li, L. F., Liu, K., Feng, W. F., Nie, J., Li, H., Huang, X. J., Armand, M., Zhou, Z. B. (2011). Lithium bis(fluorosulfonyl)imide (LiFSI) as Conducting Salt For Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Ion Batteries: Physicochemical and Electrochemical Properties. *Journal of Power Sources, 196*(7), 3623-3632. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.040

Hao, H., Cheng, X., Liu, Z., Zhao, F. (2017). China's Traction Battery Technology Roadmap: Targets, Impacts And Concerns. *Energy Policy, 108*, 355-358. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.011

Haregewoin, A. M., Wotango, A. S., Hwang, B. J. (2016). Electrolyte Additives for Lithium Ion Battery Electrodes: Progress and Perspectives. *Energy & Environmental Science, 6*, 1955-1988. https://doi.org/10.1039/c6ee00123h

He, M., Zhang, X., Jiang, K., Wang, J., Wang, Y. (2015). Pure Inorganic Separator for Lithium Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces, 7*, 738-742. https://doi.org/10.1021/am507145h

Heiskanen, S. K., Kim, J., Lucht, B. L. (2019). Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries. *Joule, 3*(10), 2322-2333. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.018

Herreyre, S., Huchet, O., Barusseau, S., Perton, F., Bodet, J. M., Biensan, Ph. (2001). New Li-Ion Electrolytes for Low Temperature Applications. *Journal of Power Sources, 97-98*, 576-580. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00670-X

Hendricks, C., Williard, N., Mathew, S., Pecht, M. (2015). A Failure Modes, Mechanisms, and Effects Analysis (FMMEA) of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 297*, 113-120. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.100

Hirani, R., Noruzi, K., Khuram, H., Hussaini, A. S., Aifuwa, E. I., Ely, K. E., Lewis, J. M., Gabr, A. E., Smiley, A., Tiwari, R. K., Etienne, M. (2024). Artificial Intelligence and Healthcare: A Journey Through History, Present Innovations, and Future Possibilities. *Life, 14*(5), 557. https://doi.org/10.3390/life14050557

Hu, S., Lin, S., Tu, Y., Hu, J., Wu, Y., Liu, G., Li, F., Yu, F., Jiang, T. (2016). Novel Aramid Nanofiber-Coated Polypropylene Separators for Lithium Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A, 4*, 3513-3526. https://doi.org/10.1039/c5ta08694a

Huang, J. Y., Liu, X. J., Kang, X. L., Yu, Z. X., Xu, T. T., Qiu, W. H. (2009). Study on γ-butyrolactone for LiBOB-Based Electrolytes. *Journal of Power Sources, 189*(1), 458-461. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.088

Huang, Z., Liu, J., Zhai, H., Wang, Q. (2021). Experimental Investigation on the Characteristics of Thermal Runaway and Its Propagation of Large-Format Lithium Ion Batteries Under Overcharging and Overheating Conditions. *Energy, 233*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121103

Hwang, S., Kim, S. M., Bak, S. M., Cho, B. W., Chung, K. Y., Lee, J. Y., Chang, W., Stach, E. A. (2014). Investigating Local Degradation and Thermal Stability of Charged Nickel-Based Cathode Materials Through Real-Time Electron Microscopy. *ACS Applied Materials & Interfaces, 6*(17), 15140-15147. https://doi.org/10.1021/am503278f

Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., Andersson, P. (2023). Analysis of Combustion Gases from Large-Scale Electric Vehicle Fire Tests. *Fire Safety Journal, 139*. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103829

Iclodean, C., Varga, B., Burnette, N., Cimerdean, D., Jurchiș, B. (2017). Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 252*, 012058. https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012058

Ihara, M., Hang, B. T., Sato, K., Egashira, M., Okada, S., Yamaki, J. I. (2003). Properties of Carbon Anodes and Thermal Stability in $LiPF_6$/Methyl Difluoroacetate Electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society, 150*(11). https://doi.org/10.1149/1.1614269

Iriyama, Y., Yokoyama, M., Yada, C., Jeong, S. K., Yamada, I., Abe, T., Inaba, M., Ogumi, Z. (2004). Preparation of $LiFePO_4$ Thin Films by Pulsed Laser Deposition and Their Electrochemical Properties. *Electrochemical and Solid-State Letters, 7*(10). https://doi.org/10.1149/1.1795052

Javaid, M., Haleem, A., Rab, S., Singh, R., Suman, R. (2021). Sensors for Daily Life: A Review. *Sensors International, 2*, 100121. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100121

Jeon, K. S., Nirmala, R., Navamathavan, R., Kim, K. J., Chae, S. H., Kim, T. W., Kim, H. Y., Park, S. J. (2014). The Study of Efficiency of Al_2O_3 Drop Coated Electrospun Meta-Aramid Nanofibers as Separating Membrane in Lithium-Ion Secondary Batteries. *Materials Letters, 132*, 384-388. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.117

Jiang, J., Dahn, J.R., (2004.a). ARC Studies of the Thermal Stability of Three Different Cathode Materials: $LiCoO_2$; $Li[Ni_{0.1}Co_{0.8}Mn_{0.1}]O_2$; and $LiFePO_4$, in $LiPF_6$ and LiBoB EC/DEC Electrolytes, *Electrochemistry Communications, Volume 6*, Issue 1, Pages 39-43, https://doi.org/10.1016/j.elecom.2003.10.011

Jiang, J., Dahn, J.R., (2004.b). Effects of Solvents and Salts on the Thermal Stability of LiC_6, *Electrochimica Acta, Volume 49*, Issue 26, Pages 4599-4604, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.014

Jiang, J., Ruan, H., Sun, B., Zhang, W., Gao, W., Wang, L., Zhang, L. (2016). A Reduced Low-Temperature Electro-Thermal Coupled Model For Lithium-Ion Batteries. *Applied Energy, 177,* 804-816. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.153

Jianwu, W., Yan, Y., Chunhua, C., (2012). A Review on Lithium-Ion Batteries Safety Issues: Existing Problems and Possible Solutions, *Materials Express, Volume 2*, Number 3, pp. 197-212(16), https://doi.org/10.1166/mex.2012.1075

Jin, C., Sun, Y., Wang, H., Zheng, Y., Wang, S., Rui, X., Xu, C., Feng, X., Wang, H., Ouyang, M. (2022). Heating Power and Heating Energy Effect on the Thermal Runaway Propagation Characteristics of Lithium-Ion Battery Module: Experiments And Modeling. *Applied Energy, 312*, 118760. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118760

Johnson, B. A., Jozdani, S. E. (2020). Confusion Matrices Help Prevent Reader Confusion: Reply to Bechtel, B., Et Al. A Weighted Accuracy Measure For Land Cover Mapping: Comment On Johnson Et Al. Local Climate Zone (LCZ) Map Accuracy Assessments Should Account For Land Cover Physical Characteristics That Affect The Local Thermal Environment. *Remote Sensing, 12*(11), 1771. https://doi.org/10.3390/rs12111771

Kaba M.Y. (2023). Hava Akış Yönlendirici Kanatların Kullanımının Prizmatik Lityum-İyon Batarya Sıcaklığı Üzerine Etkisinin Farklı Çalışma Şartlarında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, 802981.

Kalhoff, J., Eshetu, G. G., Bresser, D., Passerini, S. (2015). Safer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries: State of the Art and Perspectives. *Chemsuschem, 8*(13), 2154-2175. https://doi.org/10.1002/cssc.201500284

Kang, S. (2021). K-Nearest Neighbor Learning with Graph Neural Networks. *Mathematics, 9*(8), 830. https://doi.org/10.3390/math9080830

Kawamura, T., Kimura, A., Egashira, M., Okada, S., Yamaki, J. I. (2002). Thermal Stability of Alkyl Carbonate Mixed-Solvent Electrolytes for Lithium Ion Cells. *Journal of Power Sources, 104*(2), 260-264. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00960-0

Kaymaz, H., Hançar, Y. (2021). Elektrikli Taşıt Batarya Yönetim Sistemleri için Hücre Eşitleme Yöntemleri. *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications, 4*(1), 59. https://doi.org/10.51513/jitsa.897126

Keogh, E., Mueen, A. (2017). Curse of Dimensionality. In C. Sammut & G. I. Webb (Eds.), *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_192

Kerem, A. (2014). Elektrikli Taşıt Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5*(1), 1-13.

Khan, F. H., Pasha, M. A., Masud, S. (2021). Advancements in Microprocessor Architecture for Ubiquitous AI, an Overview on History, Evolution, and Upcoming Challenges in AI Implementation. *Micromachines, 12*(6), 665. https://doi.org/10.3390/mi12060665

Kim, G. H., Pesaran, A., Spotnitz, R. (2007). A Three-Dimensional Thermal Abuse Model for Lithium-Ion Cells. *Journal of Power Sources, 170*(2), 476-489. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.018

Kim, S., Hwang, H., Oh, K., Shin, J. (2024). A Machine-Learning-Based Failure Mode Classification Model for Reinforced Concrete Columns Using Simple Structural Information. *Applied Sciences, 14*(3), 1243. https://doi.org/10.3390/app14031243

Kim, S. Y., Hong, J., Palmore, G. T. R. (2012). Polypyrrole Decorated Cellulose for Energy Storage Applications. *Synthetic Metals, 162*(15-16), 1478-1481. https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2012.06.003

Kim, T., Ono, L. K., Qi, Y. (2023). Understanding the Active Formation of a Cathode–Electrolyte Interphase (CEI) Layer with Energy Level Band Bending for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A, 11*, 221-231. https://doi.org/10.1039/d2ta07565b

Ko, J. M., Min, B. G., Kim, D. W., Ryu, K. S., Kim, K. M., Lee, Y. G., Chang, S. H. (2004). Thin-Film Type Li-Ion Battery, Using a Polyethylene Separator Grafted with Glycidyl Methacrylate. *Electrochimica Acta, 50*(2-3), 367-370. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.127

Kober, J., Bagnell, J. A., Peters, J. (2013). Reinforcement Learning in Robotics: A Survey. *The International Journal of Robotics Research, 32*(11), 1238-1274. https://doi.org/10.1177/0278364913495721

Kohavi, R. (1995). A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. *In Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence* - Volume 2 (pp. 1137–1143). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

Kondaveeti, H. K., Kumaravelu, N. K., Vanambathina, S. D., Mathe, S. E., Vappangi, S. (2021). A Systematic Literature Review on Prototyping with Arduino: Applications, Challenges, Advantages, and Limitations. *Computer Science Review, 40*, 100364. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364

Korepp, C., Kern, W., Lanzer, E. A., Raimann, P. R., Besenhard, J. O., Yang, M., Möller, K. C., Shieh, D. T., Winter, M. (2007). 4-Bromobenzyl Isocyanate Versus Benzyl Isocyanate: New Film-Forming Electrolyte Additives and Overcharge Protection Additives for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 174*(2), 637-642. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.142

Krishnamurthi, R., Kumar, A., Gopinathan, D., Nayyar, A., Qureshi, B. (2020). An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques. *Sensors, 20*(21), 6076. https://doi.org/10.3390/s20216076

Kriston, A., Pfrang, A., Döring, H., Fritsch, B., Ruiz, V., Adanouj, I., Kosmidou, T., Ungeheuer, J., Boon-Brett, L. (2017). External Short Circuit Performance of Graphite-$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ and Graphite-$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ Cells at Different External Resistances. *Journal of Power Sources, 361*, 170-181. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.06.056

Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Communications of the ACM, 60*(6), 84-90. https://doi.org/10.1145/3065386

Krol, L. F., Beneventi, D., Alloin, F., Chaussy, D. (2015). Microfibrillated Cellulose-SiO_2 Composite Nanopapers Produced by Spray Deposition. *Journal of Materials Science, 50*, 4095-4103. https://doi.org/10.1007/s10853-015-8965-5

Kufel, J., Bargieł-Łączek, K., Kocot, S., Koźlik, M., Bartnikowska, W., Janik, M., Czogalik, Ł., Dudek, P., Magiera, M., Lis, A., Paszkiewicz, I., Nawrat, Z., Cebula, M., Gruszczyńska, K. (2023). What is Machine Learning, Artificial Neural Networks and Deep Learning? Examples of Practical Applications in Medicine. *Diagnostics, 13*(15), 2582. https://doi.org/10.3390/diagnostics13152582

Küçükdeveci, N. (2018). Şarj Edilebilir Nikel-Metal Hidrür (Ni-MH) Pillerinde Kullanılan Hidrojen Depolama Alaşımlarındaki Son Gelişmeler. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 7*(2), 454-472. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.431673

Larsson, F. (2017.a). Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation. *Doctoral dissertation*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. ISBN: 978-91-7597-612-9.

Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., Mellander, B. E. (2014.b). Characteristics of Lithium-Ion Batteries During Fire Tests. *Journal of Power Sources, 271*, 414-420. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027

Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Mellander, B. E. (2017.b). Toxic Fluoride Gas Emissions from Lithium-Ion Battery Fires. *Scientific Reports, 7*, Article number: 10018. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z

Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B. E. (2016.a). Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests. *Batteries, 2*(9). https://doi.org/10.3390/batteries2020009

Larsson, F., Mellander, B. E. (2014.a). Abuse by External Heating, Overcharge and Short Circuiting of Commercial Lithium-Ion Battery Cells. *Journal of the Electrochemical Society, 161*(10), A1611-A1617. https://doi.org/10.1149/2.0311410jes

Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Mellander, B. E. (2016.b). Gas Emissions from Lithium-Ion Battery Cells Undergoing Abuse from External Fire. *In Fourth International Conference on Fire in Vehicles*, Baltimore, USA.

Larush-Asraf, L., Biton, M., Teller, H., Zinigrad, E., Aurbach, D. (2007). On the Electrochemical and Thermal Behavior of Lithium Bis(Oxalato)Borate (LIBOB) Solutions. *Journal of Power Sources, 174*(2), 400-407. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.171

Lee, C. Y., Chuang, S. M., Lee, S. J., Hung, I. M., Hsieh, C. T., Chang, Y. M., Huang, Y. P. (2015). Flexible Micro Sensor for in Situ Monitoring Temperature and Voltage of Coin Cells. *Sensors and Actuators A: Physical, 232*, 214–222. https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.06.004

Lee, J., Lee, C. L., Park, K., Kim, I. D. (2014). Synthesis of an Al_2O_3-Coated Polyimide Nanofiber Mat and Its Electrochemical Characteristics as a Separator for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 248*, 1211-1217. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.056

Lee, Y., Lee, H., Lee, T., Ryou, M. H., Lee, Y. M. (2015). Synergistic Thermal Stabilization of Ceramic/Co-Polyimide Coated Polypropylene Separators for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 294*, 537-544. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.06.106

Lee, C. Y., Lee, S. J., Hung, Y. M., Hsieh, C. T., Chang, Y. M., Huang, Y. T., Lin, L. T. (2017). Integrated Microsensor for Real-Time Microscopic Monitoring of Local Temperature, Voltage and Current Inside Lithium-Ion Battery. *Sensors and Actuators A: Physical, 253*, 59–68. https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.10.011

Lee, J. Y., Lee, Y. M., Bhattacharya, B., Nho, Y. C., Park, J. K. (2009). Separator Grafted with Siloxane by Electron Beam Irradiation for Lithium Secondary Batteries. *Electrochimica Acta, 54*(18), 4312-4315. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.02.088

Lee, H. H., Wang, Y. Y., Wan, C. C., Yang, M. H., Wu, H. C., Shieh, D. T. (2005). The Function of Vinylene Carbonate as a Thermal Additive to Electrolyte in Lithium Batteries. *Journal of Applied Electrochemistry, 35*, 615–623. https://doi.org/10.1007/s10800-005-2700-x

Lee, J. R., Won, J. H., Kim, J. H., Kim, K. J., Lee, S. Y. (2012). Evaporation-Induced Self-Assembled Silica Colloidal Particle-Assisted Nanoporous Structural Evolution of Poly(Ethylene Terephthalate) Nonwoven Composite Separators for High-Safety/High-Rate Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 216*, 42-47. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.052

Lee, Y. M., Nam, K. M., Hwang, E. H., Kwon, Y. G., Kang, D. H., Kim, S. S., Song, S. W. (2014). Interfacial Origin of Performance Improvement and Fade for 4.6 V $LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$ Battery Cathodes. *Journal of Physical Chemistry C, 118*(20), 10631–10639. https://doi.org/10.1021/jp501670g

Leising, R. A., Palazzo, M. J., Takeuchi, E. S., Takeuchi, K. J. (2001). Abuse Testing of Lithium-Ion Batteries: Characterization of the Overcharge Reaction of $LiCoO_2$/Graphite Cells. *Journal of The Electrochemical Society, 148*(8), A838. https://dx.doi.org/10.1149/1.1379740

Lewandowski, A., Świderska-Mocek, A. (2009). Ionic Liquids as Electrolytes for Li-Ion Batteries: an Overview of Electrochemical Studies. *Journal of Power Sources, 194*(2), 601-609. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.089

Levchik, S. V., Weil, E. D. (2006). A Review of Recent Progress in Phosphorus-Based Flame Retardants. *Journal of Fire Sciences, 24*(5), 345-364. https://doi.org/10.1177/0734904106068426

Li, D., Liu, P., Zhang, Z., Zhang, L., Deng, J., Wang, Z., Dorrell, D. G., Li, W., Sauer, D. U. (2022). Battery Thermal Runaway Fault Prognosis in Electric Vehicles Based on Abnormal Heat Generation and Deep Learning Algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics, 37*(7), 8513-8525. https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3150026

Li, H., Zhou, D., Zhang, M., Liu, B., Zhang, C. (2022). Multi-Field Interpretation of Internal Short Circuit and Thermal Runaway Behaviour for Lithium-Ion Batteries Under Mechanical Abuse. *Journal of Energy, 263*(Part E), 126027. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126027

Li, H. F., Gao, J. K., Zhang, S. L. (2008). Effect of Overdischarge on Swelling and Recharge Performance of Lithium-Ion Cells. *Chinese Journal of Chemistry, 26*(9), 1585–1588. https://doi.org/10.1002/cjoc.200890286

Li, S. L., Xia, L., Zhang, H. Y., Ai, X. P., Yang, H. X., Cao, Y. L. (2011). A Poly(3-Decyl Thiophene)-Modified Separator with Self-Actuating Overcharge Protection Mechanism for $LiFePO_4$-Based Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources, 196*(16), 7021-7024. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.111

Li, X., Wang, Z. (2018). A Novel Fault Diagnosis Method for Lithium-Ion Battery Packs of Electric Vehicles. *Measurement, 116*, 402–411. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.034

Li, X., Xie, Z., Liu, W., Ge, W., Wang, H., Qu, M. (2015). Effects of Fluorine Doping on Structure, Surface Chemistry, and Electrochemical Performance of $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ *Electrochimica Acta, 174*, 1122-1130. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.099

Li, Z., Huang, J., Liaw, B. Y., Metzler, V., Zhang, J. (2014.a). A Review of Lithium Deposition in Lithium-Ion and Lithium Metal Secondary Batteries. *Journal of Power Sources, 254*, 168–182. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.099

Li, Z., Pauric, A. D., Goward, G. R., Fuller, T. J., Ziegelbauer, J. M., Balogh, M. P., Halalay, I. C. (2014.b). Manganese Sequestration and Improved High-Temperature Cycling of Li-Ion Batteries by Polymeric Aza-15-Crown-5. *Journal of Power Sources, 272*, 1134-1141. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.073

Liang, C., Kong, F., Longo, R. C., KC, S., Kim, J.-S., Jeon, S., Choi, S., Cho, K. (2016). Unraveling the Origin of Instability in Ni-Rich $LiNi_{1-2x}Co_xMn_xO_2$ (NCM) Cathode Materials. *The Journal of Physical Chemistry C, 120*(12), 6383-6393. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b00369

Linden, D., Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J. A. W. M., van Ginneken, B., Sánchez, C. I. (2017). A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis. *Medical Image Analysis, 42*, 60–88. https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005

Liu, H., Wei, Z., He, W., Zhao, J. (2017). Thermal Issues About Li-Ion Batteries and Recent Progress in Battery Thermal Management Systems: a Review. *Energy Conversion and Management, 150*, 304-330. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016

Liu, H., Yu, L. (2005). Toward Integrating Feature Selection Algorithms for Classification and Clustering. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 17*(4), 491-502. https://doi.org/10.1109/TKDE.2005.66

Liu, J., Huang, Z., Sun, J., Wang, Q. (2022). Heat Generation and Thermal Runaway of Lithium-Ion Battery Induced by Slight Overcharging Cycling. *Journal of Power Sources, 526*. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231136

Liu, J., Song, X., Zhou, L., Wang, S., Song, W., Liu, W., Long, H., Zhou, L., Wu, H., Feng, C., Guo, Z. (2018). Fluorinated Phosphazene Derivative - a Promising Electrolyte Additive for High Voltage Lithium Ion Batteries: from Electrochemical Performance to Corrosion Mechanism. *Nano Energy, 46*, 404-414. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.029

Liu, Y., Duan, Q., Xu, J., Li, H., Sun, J., Wang, Q. (2020). Experimental Study on a Novel Safety Strategy of Lithium-Ion Battery Integrating Fire Suppression and Rapid Cooling. *Journal of Energy Storage, 28*. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101185

Love, C. T., Baturina, O. A., Swider-Lyons, K. E. (2015). Observation of Lithium Dendrites at Ambient Temperature and Below. *ECS Electrochemistry Letters, 4*, A24-A27. https://doi.org/10.1149/2.0041502eel.

Lökçü, E. (2024). AB_2O_4 Spinel Tipi Yüksek-Entropili Oksitlerin Sentezi ve Elektrokimyasal Performansları. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science), 11*(1), 86-92. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1249131

Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., Ouyang, M. (2012). A Review on the Key Issues for Lithium-Ion Battery Management in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources, 226*(3):272–288. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060

Lv, X., Li, H., Zhang, Z., Chang, H., Jiang, L., Liu, H. (2012). UV Grafting Modification of Polyethylene Separator for Li-Ion Battery. *Physics Procedia, 25*, 227-232. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.076

Lyu, S., Li, N., Sun, L., Jiao, S., Chen, H., Song, W. L. (2022). Rapid Operando Gas Monitor for Commercial Lithium Ion Batteries: Gas Evolution and Relation with Electrode Materials. *Journal of Energy Chemistry, 72*, 14-25. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.04.010

MacNeil, D. D., Dahn, J. R. (2001). The Reaction of Charged Cathodes with Nonaqueous Solvents and Electrolytes: I. $Li_{0.5}CoO_2$. *Journal of The Electrochemical Society, 148*(11). https://doi.org/10.1149/1.1407245

Mai, L., Yan, M., Zhao, Y. (2017). Track Batteries Degrading In Real Time. *Nature, 546*, 469–470. https://doi.org/10.1038/546469a

Maleki, H., Deng, G., Anani, A., Howard, J. (1999). Thermal Stability Studies of Li-Ion Cells and Components. *Journal of The Electrochemical Society, 146*(9), 3224-3229. https://doi.org/10.1149/1.1392458

Manthiram, A. (2020). A Reflection on Lithium-Ion Battery Cathode Chemistry. *Nature Communications, 11*. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0

Markoulidakis, I., Rallis, I., Georgoulas, I., Kopsiaftis, G., Doulamis, A., Doulamis, N. (2021). Multiclass Confusion Matrix Reduction Method and Its Application on Net Promoter Score Classification Problem. *Technologies, 9*(4), 81. https://doi.org/10.3390/technologies9040081

McHugh, M. L. (2013). The Chi-Square Test of Independence. *Biochemia Medica, 23*(2), 143-149. https://doi.org/10.11613/BM.2013.018

McMillan, R., Slegr, H., Shu, Z. X., Wang, W. (1999). Fluoroethylene Carbonate Electrolyte and Its Use in Lithium Ion Batteries with Graphite Anodes. *Journal of Power Sources, 81–82*, 20-26. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00201-8

McRoberts, M. (2013). Beginning Arduino, *Apress.* https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5017-3

Men, X., Yue, Y., Sun, Z., Han, S., Pan, L., Chen, X., Wang, X. (2022). Site Class Effects on Stump and Coarse Root Biomass Models of Larix Olgensis in Northeastern China. *Forests*, *13*(8), 1259. https://doi.org/10.3390/f13081259

Meng, X., Yang, K., Zhang, M., Gao, F., Liu, Y., Duan, Q., Wang, Q. (2020). Experimental Study on Combustion Behavior and Fire Extinguishing of Lithium Iron Phosphate Battery. *Journal of Energy Storage, 30*. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101532

Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A., Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies, 12*(6), 1074. https://doi.org/10.3390/en12061074

Michaelides, E. (2018). Energy, the Environment, and Sustainability. *CRC Press.* https://doi.org/10.1201/b22169

Moghaddam, S. M. H. (2018). Designing Battery Thermal Management Systems (BTMS) for Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules Using CFD. Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Energy Technology: TRITA-ITM-EX 2018:636, SE-100 44 STOCKHOLM.

Moralı, U., Erol, S. (2020). Electrochemical Impedance Analysis of 18650 Lithium-Ion and 6HR61 Nickel-Metal Hydride Rechargeable Batteries. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35*(1), 297-309. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.463280

Moumouzias, G., Ritzoulis, G., Siapkas, D., Terzidis, D. (2003). Comparative Study of $LiBF_4$, $LiAsF_6$, $LiPF_6$, and $LiClO_4$ as Electrolytes in Propylene Carbonate-Diethyl Carbonate Solutions for $Li/LiMn_2O_4$ Cells. *Journal of Power Sources, 122*(1), 57-66. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00348-3

Mun, J., Yim, T., Jurng, S., Park, J. H., Lee, S. Y., Ryu, J. H., Kim, Y. G., Oh, S. M. (2011). The Feasibility of a Pyrrolidinium-Based Ionic Liquid Solvent for Non-Graphitic Carbon Electrodes. *Electrochemistry Communications, 13*(11), 1256-1259. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.08.030

Mutyala, M. S. K., Zhao, J., Li, J., Pan, H., Yuan, C., Li, X. (2014). In-Situ Temperature Measurement in Lithium Ion Battery by Transferable Flexible Thin Film Thermocouples. *Journal of Power Sources, 260*, 43-49. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.004

Muratoğlu Y. (2017). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Lityum İyon Pillerin Şarj Durumlarının Kokusuz Kalman Filtresi ile Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 465192.

Mühendis V. (2019). Li - İon Pillerin Farklı Kullanım Koşullarında Performanslarının Ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 616913.

Myung, S. T., Maglia, F., Park, K. J., Yoon, C. S., Lamp, P., Kim, S. J., Sun, Y. K. (2017). Nickel-Rich Layered Cathode Materials for Automotive Lithium-Ion Batteries: Achievements And Perspectives. *ACS Energy Letters, 2,* 196–223. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00594

Nam, T. H., Shim, E. G., Kim, J. G., Kim, H. S., Moon, S. I. (2008). Diphenyloctyl Phosphate and Tris (2,2,2-Trifluoroethyl) Phosphite as Flame-Retardant Additives for Li-Ion Cell Electrolytes at Elevated Temperature. *Journal of Power Sources, 180*(1), 561-567. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.061

Ng, A. Y. (2004). Feature Selection, L_1 vs. L_2 Regularization, and Rotational Invariance. *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning (ICML)*. https://doi.org/10.1145/1015330.1015435

Nho, Y. C., Sohn, J. Y., Shin, J., Park, J. S., Lim, Y. M., Kang, P. H. (2017). Preparation of Nanocomposite γ-Al_2O_3/Polyethylene Separator Crosslinked by Electron Beam Irradiation for Lithium Secondary Battery. *Radiation Physics and Chemistry, 132*, 65-70. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.12.002

Nilsson, N. J. (1998). *Artificial Intelligence: A New Synthesis*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2009-0-27773-7

Nishi, Y. (2001). Lithium Ion Secondary Batteries; Past 10 Years and the Future. *Journal of Power Sources, 100*(1-2), 101-106. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00887-4

Novais, S., Nascimento, M., Grande, L., Dominigues, M. F., Antunes, P., Alberto, N., Leitão, C., Oliveira, R., Koch, S., Kim, G. T., Passerini, S., Pinto, J. (2016). Internal and External Temperature Monitoring of a Li-Ion Battery with Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors, 16,* 1394. https://doi.org/10.3390/s16091394

Ohsaki, T., Kishi, T., Kuboki, T., Takami, N., Shimura, N., Sato, Y., Sekino, M., Satoh, A. (2005). Overcharge Reaction of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 146*(1-2), 97-100. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.105

Okuoka, S., Ogasawara, Y., Suga, Y., Hibino, M., Kudo, T., Ono, H., Yonehara, K., Sumida, Y., Yamada, Y., Yamada, A., Oshima, M., Tochigi, E., Shibata, N., Ikuhara, Y., Mizuno, N. (2014). A New Sealed Lithium-Peroxide Battery with a Co-Doped Li_2O Cathode in a Superconcentrated Lithium Bis(Fluorosulfonyl)Amide Electrolyte. *Scientific Reports, 4*(1), 5684. https://doi.org/10.1038/srep05684

Olaniran, O. R., Alzahrani, A. R. R., Alzahrani, M. R. (2024). Eigenvalue Distributions in Random Confusion Matrices: Applications to Machine Learning Evaluation. *Mathematics, 12*(10), 1425. https://doi.org/10.3390/math12101425

Orendorf, C. J. (2012). The Role of Separators in Lithium-Ion Cell Safety. *The Electrochemical Society Interface, 21*(2). https://doi.org/10.1149/2.f07122if

Orsini, F., du Pasquier, A., Beaudoin, B., Tarascon, J. M., Trentin, M., Langenhuizen, N., De Beer, E., Notten, P. (1998). In Situ Scanning Electron Microscopy (SEM) Observation of Interfaces Within Plastic Lithium Batteries. *Journal of Power Sources, 76*(1), 19-29. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00128-1

Ota, H., Sakata, Y., Inoue, A., Yamaguchi, S. (2004). Analysis of Vinylene Carbonate Derived SEI Layers on Graphite Anode. *Journal of The Electrochemical Society, 151*(10). https://doi.org/10.1149/1.1785795

Ouyang, M., Ren, D., Lu, L., Li, J., Feng, X., Han, X., Liu, G. (2015). Overcharge-Induced Capacity Fading Analysis for Large Format Lithium-Ion Batteries with $Li_yNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$+$Li_yMn_2O_4$ Composite Cathode. *Journal of Power Sources, 279*, 626-635. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.051

Örnek A. (2013). Lityum-İyon Pillerde Nano Yapılı Lifepo4/C Ve Limxfe1-Xpo4/C Katot Materyallerin Sentezi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 351913.

Özcan, Ö., Karadag, T., Altuğ, M., Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science, 8*, 276-298.

Park, S., Jung, D. (2013). Battery Cell Arrangement and Heat Transfer Fluid Effects on the Parasitic Power Consumption and the Cell Temperature Distribution in a Hybrid Electric Vehicle. *Journal of Power Sources, 227*, 191-198. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.039

Păvăloaia, V.-D., Necula, S.-C. (2023). Artificial Intelligence as a Disruptive Technology A Systematic Literature Review. *Electronics, 12*(5), 1102. https://doi.org/10.3390/electronics12051102

Peng, K., Wang, B., Li, Y., Ji, C. (2015). Magnetron Sputtering Deposition of TiO_2 Particles on Polypropylene Separators for Lithium-Ion Batteries. *RSC Advances, 5*, 81468-81473. https://doi.org/10.1039/c5ra18171b

Peng, Y., Zhou, X., Hu, Y., Ju, X., Liao, B., Yang, L. (2019). A New Exploration of the Fire Behaviors of Large Format Lithium-Ion Battery. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139*, 1243–1254. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08459-3

Peramunage, D., Abraham, K. M. (1998). Preparation and Electrochemical Characterization of Overlithiated Spinel $LiMn_2O_4$. *Journal of The Electrochemical Society, 145*(4), 1131. https://doi.org/10.1149/1.1838428

Pinson, M. B., Bazant, M. Z. (2012). Theory of SEI Formation in Rechargeable Batteries: Capacity Fade, Accelerated Aging and Lifetime Prediction. *Journal of The Electrochemical Society, 160*(2). https://doi.org/10.1149/2.044302jes

Pirouz, B., Pirouz, B. (2023). Multi-Objective Models for Sparse Optimization in Linear Support Vector Machine Classification. *Mathematics, 11*(17), 3721. https://doi.org/10.3390/math11173721

Purdum, J. (2012). *Beginning C for Arduino: Learn C programming for the Arduino* (1st ed., 242 pages). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-4777-7

Qin, Y., Chen, Z., Liu, J., Amine, K. (2009). Lithium Tetrafluoro Oxalato Phosphate as Electrolyte Additive for Lithium-Ion Cells. *Electrochemical and Solid-State Letters, 13*(2). https://doi.org/10.1149/1.3261738

Rafique, S. H., Abdallah, A., Musa, N. S., Murugan, T. (2024). Machine Learning and Deep Learning Techniques for Internet of Things Network Anomaly Detection—Current Research Trends. *Sensors, 24*(6), 1968. https://doi.org/10.3390/s24061968

Rahman S. (2021). Niobium and Sodium Doped $Li_4Ti_5O_{12}$ as a High Rate Anode Material For Lithium Ion Batteries. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri 674626.

Raja, M., Angulakshmi, N., Thomas, S., Kumar, T. P., Stephan, A. M. (2014). Thin, Flexible and Thermally Stable Ceramic Membranes as Separator for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Membrane Science, 471*, 103-109. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.07.058

Rajula, H. S. R., Verlato, G., Manchia, M., Antonucci, N., Fanos, V. (2020). Comparison of Conventional Statistical Methods with Machine Learning in Medicine: Diagnosis, Drug Development, and Treatment. *Medicina, 56*(9), 455. https://doi.org/10.3390/medicina56090455

Ramezan, C. A., Warner, T. A., Maxwell, A. E., Price, B. S. (2021). Effects of Training Set Size on Supervised Machine-Learning Land-Cover Classification of Large-Area High-Resolution Remotely Sensed Data. *Remote Sensing, 13*(3), 368. https://doi.org/10.3390/rs13030368

Ren, D., Feng, X., Lu, L., Oyuyang, M., Zheng, S., Li, J., He, X. (2017). An Electrochemical-Thermal Coupled Overcharge to Thermal Runaway Model for Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources, 364*, 328-340. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.035

Roh, S. C., Song, K. W., Kim, C. K. (2011). Effects of Nonsolvent Molecular Structure And Its Content on the Formation of the Macroporous Polyarylate Layer Coated Onto the Polyethylene Separator. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 50*(22), 12596–12605. https://doi.org/10.1021/ie201716m

Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M., Mikołajewski, D. (2023). An Artificial Intelligence Approach for Improving Maintenance to Supervise Machine Failures and Support Their Repair. *Applied Sciences, 13*(8), 4971. https://doi.org/10.3390/app13084971

Roy, S., Meena, T., Lim, S.-J. (2022). Demystifying Supervised Learning in Healthcare 4.0: A New Reality of Transforming Diagnostic Medicine. *Diagnostics, 12*(10), 2549. https://doi.org/10.3390/diagnostics12102549

Röder, P., Baba, N., Friedrich, K. A., Wiemhöfer, H. D. (2013). Impact of Delithiated Li_0FePO_4 on the Decomposition of $LiPF_6$-Based Electrolyte Studied by Accelerating Rate Calorimetry. *Journal of Power Sources, 236*, 151-157. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.044

Russoa, P., Barib, C. D., Mazzaroc, M., Rosac, A. D., Morriellod, I. (2018). Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-Ion Battery. *Chemical Engineering Transactions, 67*, 727-732. https://doi.org/10.3303/CET1867122

Saadatfar, H., Khosravi, S., Joloudari, J. H., Mosavi, A., Shamshirband, S. (2020). A New K-Nearest Neighbors Classifier for Big Data Based on Efficient Data Pruning. *Mathematics, 8*(2), 286. https://doi.org/10.3390/math8020286

Sabiri, B., Khtira, A., El Asri, B., Rhanoui, M. (2024). Investigating Contrastive Pair Learning's Frontiers in Supervised, Semisupervised, and Self-Supervised Learning. *Journal of Imaging, 10*(8), 196. https://doi.org/10.3390/jimaging10080196

Said, O. A., Stoliarov, I. S. (2021). Analysis of Effectiveness of Suppression of Lithium Ion Battery Fires with a Clean Agent. *Fire Safety Journal, 121*. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103296

Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities, 4*(1), 372-404. https://doi.org/10.3390/smartcities4010022

Santhanagopalan, S., Ramadass, P., Zhang, J. (2009). Analysis of Internal Short-Circuit in a Lithium Ion Cell. *Journal of Power Sources, 194*(1), 550-557. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.05.002

Schaeben, H. (2014). Targeting: Logistic Regression, Special Cases and Extensions. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 3*(4), 1387-1411. https://doi.org/10.3390/ijgi3041387

Schmidt, M., Heider, U., Kuehner, A., Oesten, R., Jungnitz, M., Ignat'ev, N., Sartori, P. (2001). Lithium Fluoroalkylphosphates: a New Class of Conducting Salts for Electrolytes for High Energy Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 97–98*, 557-560. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00640-1

Scrosati, B. (2011). History of Lithium Batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry, 15*, 1623–1630. https://doi.org/10.1007/s10008-011-1386-8

Senyshyn, A., Mühlbauer, M. J., Dolotko, O., Ehrenberg, H. (2015). Low-Temperature Performance of Li-Ion Batteries: The Behavior of Lithiated Graphite. *Journal of Power Sources, 282*, 235-240. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.008

Shan, C., Chin, C., Mohan, V., Zhang, C. (2024). Review of Various Machine Learning Approaches for Predicting Parameters of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Batteries, 10*(6), 181. https://doi.org/10.3390/batteries10060181

Sharifani, K., Amini, M. (2023). Machine Learning and Deep Learning: A Review of Methods and Applications. *World Information Technology and Engineering Journal Volume 10*, Issue 07, 3897–3904.

Sharma, N., Peterson, V. K. (2012). Overcharging A Lithium-Ion Battery: Effect on the Li_xC_6 Negative Electrode Determined by In Situ Neutron Diffraction. *Journal of Power Sources, 244*, 695-701. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.019

Sharma, P., Chung, W. T., Akoush, B., Ihme, M. (2023). A Review of Physics-Informed Machine Learning in Fluid Mechanics. *Energies, 16*(5), 2343. https://doi.org/10.3390/en16052343

Shi, C., Zhang, P., Huang, S., He, X., Yang, P., Wu, D., Sun, D., Zhao, J. (2015). Functional Separator Consisted of Polyimide Nonwoven Fabrics and Polyethylene Coating Layer for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 298*, 158-165. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.08.008

Shim, E. G., Nam, T. H., Kim, J. G., Kim, H. S., Moon, S. I. (2007). Electrochemical Performance of Lithium-Ion Batteries with Triphenylphosphate as a Flame-Retardant Additive. *Journal of Power Sources, 172*(2), 919-924. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.088

Shu, J., Shui, M., Xu, D., Wang, D., Ren, Y., Gao, S. (2012). A Comparative Study of Overdischarge Behaviors of Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry, 16*, 819–824. https://doi.org/10.1007/s10008-011-1484-7

Shu, J., Shui, M., Huang, F., Ren, Y., Wang, Q., Xu, D., Hou, L. (2010). A New Look at Lithium Cobalt Oxide in a Broad Voltage Range for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Physical Chemistry C, 114*(7), 3323–3328. https://doi.org/10.1021/jp911994b

Sloop, S. E., Kerr, J. B., Kinoshita, K. (2003). The Role of Li-Ion Battery Electrolyte Reactivity in Performance Decline and Self-Discharge. *Journal of Power Sources, 119–121,* 330-337. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00149-6

Sloop, S. E., Pugh, J. K., Wang, S., Kerr, J. B., Kinoshita, K. (2001). Chemical Reactivity of PF_5 and $LiPF_6$ in Ethylene Carbonate/dimethyl Carbonate Solutions. *Electrochemical and Solid-State Letters, 4*(4). https://doi.org/10.1149/1.1353158

Smart, M. C., Ratnakumar, B. V., Whitcanack, L. D., Chin, K. B., Surampudi, S., Croft, H., Tice, D., Staniewicz, R. (2003). Improved Low-Temperature Performance of Lithium-Ion Cells with Quaternary Carbonate-Based Electrolytes. *Journal of Power Sources, 119–121,* 349-358. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00154-X

Spotnitz, R., Franklin, J. (2003). Abuse Behavior of High-Power, Lithium-Ion Cells. *Journal of Power Sources, 113*(1), 81-100. https://doi.org/10.1016/s0378-7753(02)00488-3

Spotte-Smith, E. W. C., Kam, R. L., Barter, D., Xie, X., Hou, T., Dwaraknath, S., Blau, S. M., Persson, K. A. (2022). Toward a Mechanistic Model of Solid−Electrolyte Interphase Formation and Evolution in Lithium-Ion Batteries. *ACS Energy Letters, 7*(4), 1446-1453. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c00517

Srinivasan, R., Carkhuff, B. G., Butler, M. H., Baisden, A. C. (2011). Instantaneous Measurement of the Internal Temperature in Lithium-Ion Rechargeable Cells. *Electrochimica Acta, 56*(17), 6198-6204. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.136

Srinivasan, R., Demirev, P. A., Carkhuff, B. G. (2018). Rapid Monitoring of Impedance Phase Shifts In Lithium-Ion Batteries for Hazard Prevention. *Journal of Power Sources, 405,* 30-36. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.014

Sommer, L. W., Kiesel, P., Ganguli, A., Lochbaum, A., Saha, B., Schwartz, J., Bae, C.-J., Alamgir, M., Raghavan, A. (2015). Fast and Slow Ion Diffusion Processes in Lithium Ion Pouch Cells During Cycling Observed with Fiber Optic Strain Sensors. *Journal of Power Sources, 296,* 46-52. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.025

Song, L., Zheng, Y., Xiao, Z., Wang, C., Long, T. (2022). Review on Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *Journal of Electronic Materials, 51*(1), 30–46. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09281-0

Solmaz, H., Kocakulak, T. (2020). Determination of Lithium Ion Battery Characteristics for Hybrid Vehicle Models. *International Journal of Automotive Science And Technology, 4*(4), 264-271. https://doi.org/10.30939/ijastech..723043

Sonkavde, G., Dharrao, D. S., Bongale, A. M., Deokate, S. T., Doreswamy, D., Bhat, S. K. (2023). Forecasting Stock Market Prices Using Machine Learning and Deep Learning Models: A Systematic Review, Performance Analysis and Discussion of Implications. *International Journal of Financial Studies, 11*(3), 94. https://doi.org/10.3390/ijfs11030094

Sönmez A., (2023). Kullanılmış Lityum İyon Pillerdeki Metalik Değerlerin Mekanokimyasal Yöntemle Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 805761

Sun, J., Li, J., Zhou, T., Yang, K., Wei, S., Tang, N., Dang, N., Li, H., Qiu, X., Chen, L. (2016). Toxicity, a Serious Concern of Thermal Runaway from Commercial Li-Ion Battery. *Nano Energy, 27*, 313-319. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031

Sun, H., Zhang, L., Duan, Q., Wang, S., Sun, S., Sun, J., Wang, Q. (2022). Experimental Study on Suppressing Thermal Runaway Propagation of Lithium-Ion Batteries in Confined Space by Various Fire Extinguishing Agents. *Process Safety and Environmental Protection, 167*, 299–307. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.016

Suresh, P., Shukla, A., Munichandraiah, N. (2002). Temperature Dependence Studies of A.C. Impedance of Lithium-Ion Cells. *Journal of Applied Electrochemistry, 32*, 267–273. https://doi.org/10.1023/A:1015565404343

Sutton, R. S., Barto, A. G. (1998). Reinforcement Learning: An Introduction. *IEEE Transactions on Neural Networks, 9*(5), 1054-1054. https://doi.org/10.1109/TNN.1998.712192

Şahan, H. (2009), Lityum İyon Pillerde Katot Aktif Madde Olarak Kullanılan $LiMn_2O_4$ Bileşiğinin Elektrokimyasal Performansının Artırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 246094.

Talaei Khoei, T., Kaabouch, N. (2023). Machine Learning: Models, Challenges, And Research Directions. *Future Internet, 15*(10), 332. https://doi.org/10.3390/fi15100332

Tammewar, A., Chaudhari, N., Saini, B., Venkatesh, D., Dharahas, G., Vora, D., Patil, S., Kotecha, K., Alfarhood, S. (2023). Improving the Performance of Autonomous Driving Through Deep Reinforcement Learning. *Sustainability, 15*, 13799. https://doi.org/10.3390/su151813799

Tarascon, J. M., Armand, M. (2001). Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries. *Nature, 414*, 359-367. https://doi.org/10.1038/35104644

Taye, M. M. (2023). Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions. *Computers, 12*(5), 91. https://doi.org/10.3390/computers12050091

Tidblad, A. A. (2018). Regulatory Outlook on Electric Vehicle Safety. *In Fifth International Conference on Fires in Vehicles- FIVE*, Borås, Sweden.

Tobishima, S., Yamaki, J. (1999). A Consideration of Lithium Cell Safety. *Journal of Power Sources, 81-82*, 882-886. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00240-7

Trattnig, G., Leitgeb, W. (2014). Battery Modelling for Crash Safety Simulation. *In SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* (pp. 19-35). https://doi.org/10.1007/978-3-319-02523-0_2

Tu, W., Xia, P., Zheng, X., Ye, C., Xu, M., Li, W. (2017). Insight Into the Interaction Between Layered Lithium-Rich Oxide and Additive-Containing Electrolyte. *Journal of Power Sources, 341*, 348-356. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.012

URL-1, https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement, (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-2, https://www.iklimhaber.org/iea-2030da-satilan-10-otomobilden-6si-elektrikli-olacak/, (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-3, https://tr.euronews.com/2024/01/01/2030a-kadar-elektrikli-otomobil-sayisi-10-kat-artacak-satilan-10-aractan-6si-elektrikli-ol, (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-4, https://www.bbc.com/news/world-europe-66393507, (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-5, https://ctif.org/news/900-tonnes-lithium-batteries-fire-french-recycling-plant-north-toulouse, (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-6, https://otopark.com/2015/10/09/otomobil-tarihi/, (Erişim Tarihi: 22 Ocak 2025).

URL-7, https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/elektrikli-araclarda-akuler, (Erişim Tarihi: 22 Ocak 2025).

URL-8, https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/ , (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2024).

URL-9, https://dragonflyenergy.com/types-of-lithium-batteries-guide/?msclkid=0fba649dc07a11ec8aea2c921e996134, (Ziyaret Tarihi: 27 Eylül 2021).

URL-10, https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells, (Erişim Tarihi: 10 Ağustos 2022).

URL-11, https://m.pulsenews.co.kr/view.php?year=2022&no=20482, (Erişim Tarihi: 22 Kasım 2022).

URL-12, https://www.power-sonic.com/blog/how-to-connect-batteries-in-series-and-parallel/, Power-Sonic, "How to Connect Batteries in Series and Parallel", (Erişim Tarihi: 22 Kasım 2022).

URL-13, https://www.redwaybattery.com/tr/lithium-ion-battery-performance-how-series-vs-parallel-connections-impact-lifespan-and-efficiency/, (Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2025).

URL-14, https://www.valipod.com/post/how-series-and-parallel-cell-arrangements-shape-li-ion-battery-pack-dynamics, (Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2025).

URL-15, https://selian18650.com/blogs/battery-assembly-knowledge/the-influence-of-series-and-parallel-connection-of-lithium-batteries-on-the-performance-of-battery-packs, (Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2025).

URL-16, https://circuitdigest.com/article/tesla-model-s-battery-system-an-engineers-perspective, (Erişim Tarihi: 22 Kasım 2022).

URL-17, https://cmbatteries.com/tr/, (Ziyaret Tarihi: 01 Şubat 2024).

URL-18, https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub56852.pdf, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2024).

URL-19, https://unece.org/sites/default/files/2021-07/R0100r2am5e.pdf, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2024).

URL-20, https://prius-touring-club.com/librairie/mediatheque/pdf/toyota-prius-a123-car-fire-investigation-report-2008.pdf, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2024).

URL-21, https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/immersion-cooling-potential-alternative-to-traditional-battery-cooling/, (Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2022).

URL-22, https://cicenergigune.com/en/blog/battery-thermal-management-system-btms-electric-vehicle:, (Erişim Tarihi: 28 Temmuz 2022).

Uyumaz F. (2023), Lityum-İyon Piller için Poliüretan Esaslı Esnek Jel Polimer Elektrolit, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 810939.

Waite, J. H. (2008). Mussel Power. *Nature Materials, 7,* 8–9. https://doi.org/10.1038/nmat2087

Waldmann, T., Hogg, B. I., Wohlfahrt-Mehrens, M. (2018). Li Plating as Unwanted Side Reaction in Commercial Li-Ion Cells - A Review. *Journal of Power Sources, 384*, 107-124. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.063

Wang, H., Li, X., Li, F., Liu, X., Yang, S., Ma, J. (2020). Formation and Modification of Cathode Electrolyte Interphase: A Mini Review. *Electrochemistry Communications, 122*, 106870. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106870

Wang, H., Tang, A., Huang, K. (2011). Oxygen Evolution in Overcharged $Li_xNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ Electrode and Its Thermal Analysis Kinetics. *Chinese Journal of Chemistry, 29*(8), 1583–1588. https://doi.org/10.1002/cjoc.201180284

Wang, H., Xu, H., Zhang, Z., Wang, Q., Jin, C., Wu, C., Xu, C., Hao, J., Sun, L., Du, Z., Li, Y., Sun, J., Feng, X. (2022). Fire and Explosion Characteristics of Vent Gas from Lithium-Ion Batteries After Thermal Runaway: A Comparative Study. *eTransportation, 13*. https://doi.org/10.1016/j.etran.2022.100190

Wang, J., Hu, Z., Yin, X., Li, Y., Huo, H., Zhou, J., Li, L. (2015). Alumina/phenolphthalein polyetherketone Ceramic Composite Polypropylene Separator Film for Lithium Ion Power Batteries. *Electrochimica Acta, 159*, 61-65. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.01.208

Wang, J., Yang, J., He, J., Peng, D. (2024). Multi-Augmentation-Based Contrastive Learning for Semi-Supervised Learning. *Algorithms, 17*(3), 91. https://doi.org/10.3390/a17030091

Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., Chen, C. (2012). Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources, 208*, 210-224. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038

Wang, Q., Sun, J. (2007). Enhancing The Safety of Lithium Ion Batteries by 4-Isopropyl Phenyl Diphenyl Phosphate. *Materials Letters, 61*(16), 3338-3340. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.11.060

Wang, Q., Sun, J., Yao, X., Chen, C. (2006). Thermal Behavior of Lithiated Graphite with Electrolyte in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society, 153*(2). https://doi.org/10.1149/1.2139955

Wang, X., Yasukawa, E., Kasuya, S. (2001). Nonflammable Trimethyl Phosphate Solvent-Containing Electrolytes For Lithium-Ion Batteries: I. Fundamental Properties. *Journal of The Electrochemical Society, 148*(10). https://doi.org/10.1149/1.1397773

Wang, Y., Jiang, J., Dahn, J. R. (2007). The Reactivity of Delithiated $Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O_2$, $Li(Ni_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05})O_2$ or $LiCoO_2$ with Non-Aqueous Electrolyte. *Electrochemistry Communications, 9*(10), 2534-2540. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2007.07.033

Wang, Y., Gao, Q., Wang, G., Lu, P., Zhao, M., Bao, W. (2018). A Review on Research Status and Key Technologies of Battery Thermal Management and Its Enhanced Safety. *International Journal of Energy Research, 42*(13), 4008-4033. https://doi.org/10.1002/er.4158

Wang, Z., Xiang, H., Wang, L., Xia, R., Nie, S., Chen, C., Wang, H. (2018). A Paper-Supported Inorganic Composite Separator for High-Safety Lithium-Ion Batteries. *Journal of Membrane Science, 553*, 10-16. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.02.040

Wen, J., Yu, Y., Chen, C. (2012). A Review on Lithium-Ion Batteries Safety Issues: Existing Problems and Possible Solutions. *Materials Express, 2*. https://doi.org/10.1166/mex.2012.1075

Wenger, M., Waller, R., Lorentz, V. R. H., März, M., Herold, M. (2014). Investigation of Gas Sensing in Large Lithium-Ion Battery Systems for Early Fault Detection and Safety Improvement. *In IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,* October 29–November 1, 2014, IEEE, Dallas, TX, USA. https://doi.org/10.1109/iecon.2014.7049366

Wolska, M., Gorewoda, T., Roszak, M., Gajda, L. (2023). Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization. *Encyclopedia, 3*(4), 1537-1564. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110

Wu, F., Zhu, Q., Chen, R., Chen, N., Chen, Y., Li, L. (2015). Ionic Liquid Electrolytes with Protective Lithium Difluoro(Oxalate)Borate for High Voltage Lithium-Ion Batteries. *Nano Energy, 13*, 546-553. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.03.042

Wu, L., Nam, K. W., Wang, X., Zhou, Y., Zheng, J. C., Yang, X. Q., Zhu, Y. (2011). Structural Origin of Overcharge-İnduced Thermal Instability of Ni-Containing Layered-Cathodes for High-Energy-Density Lithium Batteries. *Chemistry of Materials, 23*(17), 3953–3960. https://doi.org/10.1021/cm201452q

Wu, M. S., Chiang, P. C. J., Lin, J. C. (2005). Electrochemical Investigations on Advanced Lithium-Ion Batteries by Three-Electrode Measurements. *Journal of The Electrochemical Society, 152*(1). https://doi.org/10.1149/1.1825385

Wu, X., Wang, Z., Li, X., Guo, H., Zhang, Y., Xiao, W. (2012). Effect of Lithium Difluoro(Oxalato)Borate and Heptamethyldisilazane with Different Concentrations on Cycling Performance of $LiMn_2O_4$. *Journal of Power Sources, 204*, 133-138. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.012

Wu, Y., Liu, X., Wang, L., Feng, X., Ren, D., Li, Y., Rui, X., Wang, Y., Han, X., Xu, G.-L., Wang, H., Lu, L., He, X., Amine, K., Ouyang, M. (2021). Development of Cathode-Electrolyte-Interphase for Safer Lithium Batteries. *Energy Storage Materials, 37*, 77-86. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.001

Xia, L., Xia, Y., Wang, C., Hu, H., Lee, S., Yu, Q., Chen, H., Liu, Z. (2015). 5 V-Class Electrolytes Based on Fluorinated Solvents for Li-Ion Batteries with Excellent Cyclability. *ChemElectroChem, 2*(11), 1707-1712. https://doi.org/10.1002/celc.201500286

Xia, Y., Wierzbicki, T., Sahraei, E., Zhang, X. (2014). Damage of Cells and Battery Packs Due to Ground Impact. *Journal of Power Sources, 267*, 78-97. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.078

Xiang, H., Chen, J., Li, Z., Wang, H. (2011). An Inorganic Membrane as a Separator for Lithium-Ion Battery. *Journal of Power Sources, 196*(20), 8651-8655. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.055

Xiang, H. F., Xu, H. Y., Wang, Z. Z., Chen, C. H. (2007). Dimethyl Methylphosphonate (DMMP) as an Efficient Flame Retardant Additive for the Lithium-Ion Battery *Electrolytes. Journal of Power Sources, 173*(1), 562-564. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.05.001

Xiang, Y., Li, J., Lei, J., Liu, D., Xie, Z., Qu, D., Li, K., Deng, T., Tang, H. (2016). Advanced Separators for Lithium-Ion and Lithium–Sulfur Batteries: A Review of Recent Progress. *Chemsuschem, 9*(21). https://doi.org/10.1002/cssc.201600943

Xiao, L., Ai, X., Cao, Y., Yang, H. (2004). Electrochemical Behavior of Biphenyl as Polymerizable Additive for Overcharge Protection of Lithium Ion Batteries. *Electrochimica Acta, 49*(24), 4189-4196. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.04.013

Xie, Y., Pongsakornsathien, N., Gardi, A., Sabatini, R. (2021). Explanation of Machine-Learning Solutions in Air-Traffic Management. *Aerospace, 8*(8), 224. https://doi.org/10.3390/aerospace8080224

Xu, M., Xiao, A., Li, W., Lucht, B. L. (2009). Investigation Of Lithium Tetrafuorooxalatophosphate as a Lithium-Ion Battery Electrolyte. *Electrochemical and Solid-State Letters, 12*(8). https://doi.org/10.1149/1.3134462

Xu, M., Zhou, L., Hao, L., Xing, L., Li, W., Lucht, B. L. (2011). Investigation And Application of lithium difluoro(oxalate)borate (LiDFOB) as Additive to Improve the Thermal Stability of Electrolyte for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 196*(16), 6794-6801. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.10.050

Xu, K. (2004). Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries. *Chemical Reviews, 104*(10), 4303–4418. https://doi.org/10.1021/cr030203g

Xu, K. (2014). Electrolytes and Interphases in Li-Ion Batteries and Beyond. *Chemical Reviews, 114*, 11503–11618. https://doi.org/10.1021/cr500003w

Xu, K., Ding, M. S., Zhang, S., Allen, J. L., Jow, T. R. (2002). An Attempt to Formulate Nonflammable Lithium Ion Electrolytes with Alkyl Phosphates and Phosphazenes. *Journal of The Electrochemical Society, 149*(5). https://doi.org/10.1149/1.1467946

Xu, Y., Liu, F., Guo, J., Li, M., & Han, B. (2022). Mechanical Properties and Thermal Runaway Study of Automotive Lithium-Ion Power Batteries. *Ionics, 28*, Article 43. https://doi.org/10.1007/s11581-021-04309-1

Valente, J., António, J., Mora, C., Jardim, S. (2023). Developments in Image Processing Using Deep Learning and Reinforcement Learning. *J. Imaging, 9*(10), 207. https://doi.org/10.3390/jimaging9100207

van Engelen, J. E., Hoos, H. H. (2020). A Survey on Semi-Supervised Learning. *Machine Learning, 109*(2), 373–440. https://doi.org/10.1007/s10994-019-05855-6

Vollmer, J. M., Curtiss, L. A., Vissers, D. R., Amine, K. (2003). Reduction Mechanisms of Ethylene, Propylene, and Vinylethylene Carbonates: a Quantum Chemical Study. *Journal of The Electrochemical Society, 151*(1). https://doi.org/10.1149/1.1633765

Vujović, V., Maksimović, M. (2014). Raspberry Pi as a Wireless Sensor Node: Performances and Constraints. *2014 37th International Convention On Information And Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1013-1018. https://doi.org/10.1109/MIPRO.2014.6859717

Yabuuchi, N., Ohzuku, T. (2003). Novel Lithium Insertion Material of $LiCo_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ for Advanced Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 119–121*, 171-174. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00173-3

Yang, J., Li, S., Wang, Z., Dong, H., Wang, J., Tang, S. (2020). Using Deep Learning to Detect Defects in Manufacturing: A Comprehensive Survey and Current Challenges. *Materials, 13*(24), 5755. https://doi.org/10.3390/ma13245755

Yang, Y. (2016). Temporal Data Mining Via Unsupervised Ensemble Learning. 1st ed. San Diego, CA, USA: *Elsevier Science*, 2016. Web. https://doi.org/10.1016/C2016-0-01428-6

Yang, Y., Wang, R., Shen, Z., Yu, Q., Xiong, R., Shen, W. (2023). Towards a Safer Lithium-Ion Batteries: a Critical Review on Cause, Characteristics, Warning and Disposal Strategy for Thermal Runaway. *Advances in Applied Energy, 11*. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100146

Yang, Z., Ren, J., Zhang, Z., Sun, Y., Zhang, C., Wang, M., Wang, L. (2023). A New Three-Way Incremental Naive Bayes Classifier. *Electronics, 12*(7), 1730. https://doi.org/10.3390/electronics12071730

Yamamoto, K., Tanaka, H., Sakaguchi, M., Shimada, S. (2003). Well-Defined Poly(Methyl Methacrylate) Grafted to Polyethylene with Reverse Atom Transfer Radical Polymerization Initiated by Peroxides. *Polymer, 44*(25), 7661-7669. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.10.006

Yim, T., Park, M. S., Woo, K., Kwon, H. K., Yoo, J. K., Jung, Y. S., Kim, K. J., Yu, J. S., Kim, Y. J. (2015). Self-Extinguishing Lithium Ion Batteries Based on Internally Embedded Fire-Extinguishing Microcapsules with Temperature-Responsiveness. *Nano Letters, 15*, 5059–5067. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01167

Yoon, W. S., Haas, O., Muhammad, S., Kim, H., Lee, W., Kim, D., Fischer, D. A., Jaye, C., Yang, X. Q., Balasubramanian, M., Nam, K. W. (2014). In Situ Soft XAS Study on Nickel-Based Layered Cathode Material at Elevated Temperatures: a Novel Approach to Study Thermal Stability. *Scientific Reports, 4*, 6827. https://doi.org/10.1038/srep06827

Yoshio, M., Brodd, R. J., Kozawa, A. (Eds.). (2009). Lithium-Ion Batteries: *Science and technologies* (1st ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-34445-4

Younesi, R., Veith, G. M., Johansson, P., Edström, K., Vegge, T. (2015). Lithium Salts for Advanced Lithium Batteries: Li–Metal, Li–O_2, and Li–S. *Energy & Environmental Science, 8*, 1905-1922. https://doi.org/10.1039/c5ee01215e

Young, T., Hazarika, D., Poria, S., Cambria, E. (2018). Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing [Review Article]. *IEEE Computational Intelligence Magazine, 13*(3), 55-75. https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2840738

Yu, D., Li, Y., Zhang, S., Dong, H., Han, G., Xian, X. (2019). Fire Extinguishing Test of Lithium-Ion Battery Case in Electric Bus. *Proceedings of the International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering*, 1-5. https://doi.org/10.1109/ICFSFPE48751.2019.9055837

Yuan, Q. F., Zhao, F., Wang, W., Zhao, Y., Liang, Z., Yan, D. (2015). Overcharge Failure Investigation of Lithium-Ion Batteries. *Electrochimica Acta, 178*, 682-688. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.147

Zeng, Y., Wu, K., Wang, D., Wang, Z., Chen, L. (2006). Overcharge Investigation of Lithium-Ion Polymer Batteries. *Journal of Power Sources, 160*(1), 1302–1307. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.009

Zhai, Y., Wang, N., Mao, X., Si, Y., Yu, J., Al-Deyab, S.S., El-Newehy, M., Ding, B., (2014). Sandwich-Structured PVdF/ PMIA/PVdF Nanofbrous Separators with Robust Mechanical Strength and Thermal Stability for Lithium Ion Batteries, *Journal of Materials Chemistry A, Issue 35*, 14511-14518, DOI https://doi.org/10.1039/C4TA02151G

Zhang, H., Cao, Y., Yang, H., Lu, S., Ai, X. (2013). Facile Preparation and Electrochemical Characterization of poly(4-methoxytriphenylamine)-Modified Separator as a Self-Activated Potential Switch for Lithium Ion Batteries. *Electrochimica Acta, 108,* 191–195. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.06.116

Zhang, H., Zhang, Y., Xu, T., John, A. E., Li, Y., Li, W., Zhu, B. (2016). Poly(m-phenylene isophthalamide) Separator for Improving the Heat Resistance and Power Density of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 329*, 8–16. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.036

Zhang, L., Jeong, D., Lee, S. (2021). Data Quality Management in the Internet of Things. *Sensors, 21*(17), 5834. https://doi.org/10.3390/s21175834

Zhang, L., Li, Y., Duan, Q., Chen, M., Xu, J., Zhao, C., Sun, J., Wang, Q. (2020). Experimental Study on the Synergistic Effect of Gas Extinguishing Agents and Water Mist on Suppressing Lithium-Ion Battery Fires. *Journal of Energy Storage, 32*, 101801. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101801

Zhang, L., Ma, Y., Cheng, X., Du, C., Guan, D., Cui, Y., Sun, S., Zuo, P., Gao, Y., Yin, G. (2015). Capacity Fading Mechanism During Long-Term Cycling of Over-Discharged $LiCoO_2$/Mesocarbon Microbeads Battery. *Journal of Power Sources, 293*, 1006–1015. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.06.040

Zhang, Y., Li, M., Han, S., Ren, Q., & Shi, J. (2019). Intelligent Identification for Rock-Mineral Microscopic Images Using Ensemble Machine Learning Algorithms. *Sensors, 19*(18), 3914. https://doi.org/10.3390/s19183914

Zhang, Y., Wang, Z., Xiang, H., Shi, P., Wang, H. (2016). A Thin Inorganic Composite Separator for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Membrane Science, 509*, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.047

Zhang, Z., Shao, J., Li, J., Wang, Y., Wang, Z. (2023). SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries Without Current Monitoring. *Batteries, 9*(9), 442. https://doi.org/10.3390/batteries9090442

Zhang, Z., Yang, J., Huang, W., Wang, H., Zhou, W., Li, Y., Li, Y., Xu, J., Huang, W., Chiu, W., Cui, Y. (2021). Cathode-Electrolyte Interphase in Lithium Batteries Revealed by Cryogenic Electron Microscopy. *Matter, 4*(1), 302-312. https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.10.021

Zhao, C., Zhang, B., Zheng, Y., Huang, S., Yan, T., Liu, X. (2020). Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review. *Energies, 13*(23), 6257. https://doi.org/10.3390/en13236257

Zhao, L., Watanabe, I., Doi, T., Okada, S., Yamaki, J. I. (2006). TG-MS Analysis of Solid Electrolyte Interphase (SEI) On Graphite Negative-Electrode in Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 161*(2), 1275-1280. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045

Zhao, M., Kariuki, S., Dewald, H. D., Lemke, F. R., Staniewicz, R. J., Plichta, E. J., Marsh, R. A. (2000). Electrochemical Stability of Copper in Lithium-Ion Battery Electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society, 147*(8). https://doi.org/10.1149/1.1393619

Zhao, R., Zhang, S., Liu, J., Gu, J. (2015). A Review of Thermal Performance Improving Methods of Lithium-Ion Battery: Electrode Modification and Thermal Management System. *Journal of Power Sources, 299*, 557–577. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.001

Zhao, W., Luo, G., Wang, C. Y. (2015). Modeling Internal Shorting Process in Large-Format Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society, 162*(10), A1352-A1364. https://doi.org/10.1149/2.1031507jes

Zheng, H., Sun, Q., Liu, G., Song, X., Battaglia, V. S. (2012). Correlation Between Dissolution Behavior and Electrochemical Cycling Performance for $LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_1/3O_2$-Based Cells. *Journal of Power Sources, 207*, 134-140. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.122

Zhou, S. K., Greenspan, H., & Shen, D. (Eds.). (2023). Deep learning for medical image analysis. *Academic Press*.

Zhou, X., Zhang, B., Chen, T. (2024). Study on the Evolution of Spatiotemporal Dynamics and Regional Differences in the Development of Digital Agriculture in China. *Sustainability, 16*(16), 6947. https://doi.org/10.3390/su16166947

Zhu, J., Sun, Z., Wei, X., Dai, H. (2017). Battery Internal Temperature Estimation for $LiFePO_4$ Battery Based on Impedance Phase Shift under Operating Conditions. *Energies, 10*(1), 60. https://doi.org/10.3390/en10010060

Zhu, J., Wierzbicki, T., Li, W. (2018). A Review of Safety-Focused Mechanical Modeling of Commercial Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 378*, 153-168. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.034

Zhu, P., Gastol, D., Marshall, J., Sommerville, R., Goodship, V., Kendrick, E. (2021). A Review of Current Collectors for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources, 485*. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229321

Zhu, X., Jiang, X., Ai, X., Yang, H., Cao, Y., (2015). A Highly Thermostable Ceramic-Grafted Microporous Polyethylene Separator for Safer Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces, 7*, 43, 24119–24126, https://doi.org/10.1021/acsami.5b07230

Zhu, X., Jiang, X., Ai, X., Yang, H., & Cao, Y. (2016). TiO_2 Ceramic-Grafted Polyethylene Separators for Enhanced Thermostability and Electrochemical Performance of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Membrane Science, 504*. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.12.059

Zinth, V., von Lüders, C., Hofmann, M., Hattendorff, J., Buchberger, I., Erhard, S., Kornmeier, J. R., Jossen, A., Gilles, R. (2014). Lithium Plating in Lithium-Ion Batteries at Sub-Ambient Temperatures Investigated by in Situ Neutron Diffraction. *Journal of Power Sources, 271*, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.168

Ziv, B., Levy, N., Borgel, V., Li, Z., Levi, M. D., Aurbach, D., Pauric, A. D., Goward, G. R., Fuller, T. J., Balogh, M. P., Halalay, I. C. (2014). Manganese Sequestration and Li-Ion Batteries Durability Enhancement by Polymeric 18-Crown-6 Ethers. *Journal of The Electrochemical Society, 161*(9). https://doi.org/10.1149/2.0091409jes

Zuo, X., Fan, C., Liu, J., Xiao, X., Wu, J., Nan, J. (2013). Lithium Tetrafluoroborate as an Electrolyte Additive to Improve the High Voltage Performance of Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society, 160*(8). https://doi.org/10.1149/2.066308jes

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çelik, C., Soyhan, H. S., & **Şenyürek, Ü.**, (2023). Prevention of Earthquake-Induced Fires in Businesses. *Journal of Fire and Civil Engineering, 12*(3), 45-60. https://doi.org/10.52702/fce.1262272

Çelik, C., Soyhan, H. S., & **Şenyürek, Ü.**, (2022). Battery Caused Fires in Electric Vehicles. *Fuels, Fire and Combustion in Engineering Journal, 10*(1), 21-27. https://doi.org/10.52702/fce.1054263

Çelik, C., Soyhan, H. S., & **Şenyürek, Ü.**, (2022). Elektrikli Taşıtların Lityum İyon Bataryalarında Termal Kaçak Mekanizması ve Isının Kontrol Altında Tutulması, *Proceedings of INCOS 2022*, 08-11 September 2022, Aydin-Turkiye.

Çelik, C., Soyhan, H. S., & **Şenyürek, Ü.,** (2024). Transition of Traditional Automotive Manufacturing to Electric Vehicle Production with Enhanced Fire Safety Measures, *Proceedings of INCOS 2024*, 19-21 September 2024, Bursa-Turkiye

Çelik, C., Pekşen, M.A., Soyhan, H.S., **Şenyürek, Ü.**, (2025). Fire Prevention Strategies in Electric Vehicle Batteries Using Machine Learning, *Journal Thermal Science,Vol.29*, pp.2955-2966, https://doi.org/10.2298/TSCI2504955S

ÖZGEÇMİŞ

1996–2000 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamlamıştır. 2000–2002 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Makine İmalatı ve Tasarımı alanında yüksek lisans eğitimini "Çelik Tel Çekme ve Çekme Sürecindeki Kapsamlı İçerik Hataları" konulu çalışmasıyla tamamlamıştır.

2005–2008 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü'nde İşletme Yönetimi (MBA) programını "Türk Otomotiv ve Tedarikçi Sektörünün Analizi" başlıklı teziyle bitirmiştir. 2008 yılında Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri lisans programına başlamış, bu programı 2015 yılında tamamlamıştır. 2009–2010 yılları arasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde düzenlenen "Doğal Afet Yönetimi ve Güvenli Şehirler" temalı sertifika programına katılım sağlamıştır. 2012–2013 yılları arasında Yeni Yüzyıl Üniversitesi Temel Tıp Bilimleri Enstitüsü'nde İş Sağlığı ve Güvenliği alanında yüksek lisans eğitimini "Mobbing ve Çalışanlar Üzerindeki Etkileri" başlıklı teziyle tamamlamıştır.

2020–2021 yılları arasında Sakarya Üniversitesi'nde Yangın ve Yanma alanında tezsiz yüksek lisans programını tamamlamıştır. 2015–2017 yılları arasında Atatürk Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi'nde Hukuk Ön Lisans eğitimini tamamlamış, 2022–2023 yılları arasında ise Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Fotoğrafçılık ve Kameramanlık programını bitirmiştir. Fotoğrafçılık, kişisel ilgi alanı olarak özel zamanlarında sürdürdüğü bir hobidir. Ayrıca 2022 yılında İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Tarih Lisans Programı'na kayıt yaptırmıştır.

2010 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine devam etmektedir. Doktora çalışmaları kapsamında, lityum-iyon bataryaların yangın güvenliği ve termal kaçak mekanizmaları üzerine deneysel ve teorik araştırmalar yürütmektedir.

2006 yılından bu yana bir otomobil üretim fabrikasında çalışmaktadır. Bu süreçte iş sağlığı ve güvenliği, ergonomi, acil durum yönetimi, yangın risk yönetimi, elektrikli araçlarda güvenli proseslerin oluşturulması ve risk temelli sistem kurulumları gibi çeşitli teknik ve yönetsel alanlarda faaliyet göstermektedir.