ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YANGIN VE YANGIN GÜVENLİĞİ

İpek CAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YANGIN VE YANGIN GÜVENLİĞİ

İpek CAN
0009-0002-6260-1250

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YANGIN VE YANGIN GÜVENLİĞİ

İpek CAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Fosil yakıtların kullanımındaki artışın küresel ısınmayı hızlandırdığı gerçeği göz önüne alınarak son yıllarda gelişmiş ve gelişmekte olan pek çok ülkenin enerji politikası, sıfır karbon odaklı bir hale getirilmektedir. Sıfır karbon hedefi doğrultusunda kullanıma sunulan elektrikli araçlarda termal (bataryanın aşırı ısınması), mekanik (kazalar, batarya hücrelerinde tırnak penetrasyonu sonucu sızıntı oluşumu) ve elektrik (aşırı şarj, kısa devre sorunları) kaynaklı problemler nedeniyle lityum-iyon batarya hücrelerinde termal kaçak meydana gelmektedir. Yanma koşullarının sağlanması durumunda yangın gerçekleşmektedir. Elektrikli aracın; garaj gibi kapalı bir ortamda veya trafikte, şarj istasyonu, tünel gibi diğer araçların ve yayaların güvenliğini tehlikeye atabilmesi muhtemel alanlarda bulunurken yangının meydana gelmesini önlenmek birincil amaçtır. Fakat çoğu zaman bu mümkün değildir. Bu nedenle, yangın söndürme ve soğutma sistemlerinin optimizasyon çalışmaları ve testleri yapılarak elektrikli araçlarda yangın güvenliği sağlanabilir. Bu kapsamda çalışmada, elektrikli araçlarda kaza sonrasında bataryada meydana gelen termal kaçak, termal kaçak sebepleri ve yangın güvenliği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, lityum iyon bataryalar, termal kaçak, yangın güvenliği, yangın söndürme, risk analizi
2025, vi + 124 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FIRE AND FIRE SAFETY IN ELECTRIC VEHICLES

İpek CAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Considering the fact that the increase in the use of fossil fuels accelerates global warming, in recent years, many developed and developing countries have adopted a zero-carbon energy policy. In electric vehicles that are offered with a zero-carbon target, thermal runaway occurs in lithium ion battery cells due to thermal (overheating), mechanical (crashes, nail penetrating) and electrical (overcharging, overdischarging, internal short circuits) abuse. If combustion conditions are provided, a fire occurs. The primary goal is to prevent a fire from occurring when an electric vehicle is in a closed environment such as a garage or in areas where it is likely to endanger the safety of other vehicles and pedestrians such as traffic, charging stations, tunnels. However, most of the time, this is not possible. Fire safety in electric vehicles can be provided by conducting optimization studies and tests of fire suppression and battery cooling. In this thesis, thermal runaway in the battery after an accident in electric vehicles, the causes of thermal runaway and fire safety have been investigated.

Key words: Electric vehicle, li-ion batteries, thermal runaway, fire safety, fire suppression, risk assessment
2025, vii + 124 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitim ve tez çalışmasının bütün aşamalarında desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Muhsin KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelebilmemde emeği geçen, tüm desteklerini esirgemeyen kıymetli ailem ve tüm öğretmenlerime teşekkürlerimi sunarım.

İpek CAN
16/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……vi
ABSTRACT.....vii
TEŞEKKÜR…… viii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….xii
ÇİZELGELER DİZİNİ…… xiii
1. GİRİŞ…...……..1
1.1. Tezin Kapsamı, Amacı, Katkısı ve Araştırma Sorusu……1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI……4
2.1. Batarya ve Çeşitleri……4
2.1.1. Kurşun Asit (Pb-Acid) Batarya……...4
2.1.2. Nikel Kadmiyum (NiCd) Batarya……4
2.1.3. Nikel Metal Hidrit (NiMH) Batarya……5
2.1.4. Lityum İyon Batarya……5
2.1.4.1. Anot……..9
2.1.4.2. Katot……9
2.1.4.3. Elektrolit……10
2.1.4.4. Separatör……10
2.2. Lityum İyon Batarya Çeşitleri……..11
2.2.1. Silindirik Batarya……...11
2.2.2. Prizmatik Batarya……..11
2.2.3. Kese Tip Batarya……...12
2.3. Elektrikli Araçlar……..13
2.3.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar……...17
2.3.2. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar……17
2.3.3. Hibrit Elektrikli Araçlar……17
2.3.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar……19
2.4. Elektrikli Araçların Tarihçesi……...19
2.5. Türkiye'de Elektrikli Araçların Tarihçesi……22
2.6. Lityum İyon Pil Modelleme Yaklaşımları……24
2.6.1. Multi-Scale Multi-Domain Modeli……24
2.6.1.1. Newman Tiedemann Gu ve Kim (NTGK) Modeli……24
2.6.1.2. Eşdeğer Devre Modeli (ECM)……26
2.6.1.3. Newman Pseudo İki Boyutlu (P2D) Modeli……...28
2.7. Elektrikli Araçlarda Yangın……..33
2.7.1. Batarya Hataları……35
2.7.1.1. Mekanik Kaynaklı Yanlış Kullanım……..……36
2.7.1.2. Elektrik Kaynaklı Yanlış Kullanım……..…….37
2.7.1.3. Termal Kaynaklı Yanlış Kullanım……...38
2.8. Termal Kaçak……...39
2.9. Batarya Hasar Testleri……..……40
2.9.1. Mekanik Hasar Testleri……..…...41
2.9.1.1. Titreşim Testi……....41
2.9.1.2. Yüksekten Cisim Düşürme Testi……...42
2.9.1.3. Mekanik Etki Testi……....43
2.9.1.4. Ekstrüzyon Testi……....43
2.9.1.5. Su Geçirmezlik Testi……..……43

2.9.1.6. Çivi Penetrasyon Testi……....44
2.9.1.7. Mekanik Şok Testi……..…44
2.9.1.8. Mekanik Bütünlük Testi……....45
2.9.2. Elektriksel Hasar Testleri……..46
2.9.2.1. İç Kısa Devre Oluşum Testi……...46
2.9.2.2. Aşırı Şarj ve Aşırı Deşarj Testi……..47
2.9.2.3. Dış Kısa Devre Oluşum Testi……....47
2.9.2.4. Harici Kısa Devre Koruması Testi……....47
2.9.2.5. Aşırı Şarj Koruması Testi……..…48
2.9.2.6. Aşırı Deşarj Koruması Testi……..…48
2.9.3. Termal Hasar Testleri……..…..49
2.9.3.1. Batarya Isıtma Testi……..…..49
2.9.3.2. Termal Kaçak Testi……..…..49
2.9.3.3. Termal Şok ve Çevrim Testi……..……49
2.9.4. Yangın Direnci Testi……....50
2.9.5. Aşırı Sıcaklık Koruması Testi……..….51
2.9.6. Aşırı Akım Koruması Testi……...51
2.9.7. Termal Kaçak Yayılma Testi……....52
2.10. Lityum İyon Bataryanın Yangın Güvenliği……...53
2.11. Yangından Korunma Yöntemleri……...54
2.11.1. Hücre Seviyesindeki Önlemler……54
2.11.1.1. Katot Modifikasyonu……54
2.11.1.2. Anot Modifikasyonu……55
2.11.1.3. Elektrolit Katkıları……55
2.11.1.4. İyonik Sıvılar ve Katı Polimer Elektrolitler……55
2.11.2. Batarya Yapısı Bakımından Alınan Önlemler……55
2.11.2.1. Güvenlik Ventleri ve Akım Kesici Cihaz……56
2.11.2.2. Pozitif Sıcaklık Katsayısı Cihazı……...56
2.11.2.3. Kapanan ve Seramik Giydirilmiş Separatör……56
2.11.3. Sistem Seviyesindeki Önlemler……...57
2.11.3.1. Batarya Yönetim Sistemi……..57
2.12. Akıllı Sistemler……...57
2.12.1. Görüntüleme Sistemleri……...57
2.12.1.1. Sıcaklık Görüntüleme……...58
2.12.1.2. Voltaj Görüntüleme……..59
2.12.1.3. Gaz Görüntüleme……..60
2.12.2. Sinyal İşleme Sistemleri……..61
2.13. Yangın Söndürme Yöntemleri……61
2.13.1. Su Bazlı Olmayan Yangın Söndürme Ajanları……61
2.13.1.1. Karbondioksit……...61
2.13.1.2. Sıvı Nitrojen……61
2.13.1.3. Halotan……62
2.13.1.4. Kuru Pudra……...62
2.13.1.5. Aerosol……63
2.13.1.6. 1,1,1,2,3,3,3-Heptaflorpropan (HFC-227ea)……63
2.13.1.7. Perflorhekzanon ($C_6F_{12}O$)……63
2.13.2. Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanları……...64
2.13.2.1. Su……..64

2.13.2.2. Su Püskürtme Sistemi……...64
2.13.2.3. Diğer Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanları……..65
2.13.3. Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanlarındaki Katkı Maddeleri……...65
2.13.3.1. Yüzey Aktif Maddeler……..66
2.13.3.2. İnorganik Tuzlar……...66
2.14. Elektrikli Araç Kontrol Birimleri ve Güvenlik……..66
2.15. Otomotivde Güvenlik Standartları……67
2.15.1. ISO 26262……67
2.15.2. ISO 21488-SOTIF……...67
2.15.3. CAN……67
2.15.4. Underwriters Laboratories (UL) Standartları……..67
2.16. Elektrikli Araç Kazaları……..68
2.16.1. Lake Forest, Kaliforniya, ABD……...68
2.16.2. Mountain View, Kaliforniya, ABD……70
2.16.3. Fort Lauderdale, Florida, ABD……71
2.16.4. West Hollywood, Kaliforniya, ABD……...72
2.16.5. Guangzhou, Çin……...73
2.16.6. Norveç……74
2.16.7. Arlberg Yolu, Avusturya……74
2.17. Kaza Sonrasında Güvenlik Önlemleri……83
3. MATERYAL ve YÖNTEM……94
3.1. Risk Analizi……..94
3.1.1. Risk Değerlendirme Döngüsü……...95
3.1.2. Risk Matrisi……...95
4. BULGULAR ve TARTIŞMA……....97
4.1. Elektrikli Araç İstatistiği……..97
4.2. Elektrikli Araç Yangın Riskleri……99
4.2.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Yangın Riskleri……100
4.2.1.1. Evden Şarj Riskleri……...100
4.2.1.2. Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarındaki Riskler……..101
4.2.1.3. Kapalı Otoparklardaki Riskler……..101
4.3. Risk Değerlendirmesi ve Risk Matrisi……102
4.4. Önlemler……108
4.4.1. Batarya……....108
4.4.2. Şarj İstasyonu……..109
4.4.3. Otopark……110
4.4.4. Eğitim……..111
5. SONUÇ……112
KAYNAKLAR……113
ÖZGEÇMİŞ……..117

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	Tez akış şeması.....	3
Şekil 2.1.	Lityum iyon pilde şarj ve deşarj…….……..	9
Şekil 2.2.	Silindirik batarya yapısı …….……..	11
Şekil 2.3.	Prizmatik batarya yapısı…….……..	12
Şekil 2.4.	Kese tip batarya yapısı……..	13
Şekil 2.5.	Elektrikli aracın yapısı……..	13
Şekil 2.6.	Seri hibrit elektrikli aracın yapısı ……..……..	18
Şekil 2.7.	Paralel hibrit elektrikli aracın yapısı …….……..	18
Şekil 2.8.	Yakıt hücreli elektrikli aracın yapısı.....	19
Şekil 2.9.	Dünya'da elektrikli araç yangınlarının ülkelere göre dağılımı.....	35
Şekil 2.10.	Mekanik şok testi akselerasyon-zaman grafiği.....	45
Şekil 2.11.	Ezme plakasının gösterimi ve boyutu.....	46
Şekil 2.12.	Batarya aşırı şarj ve deşarj test standartları.....	47
Şekil 2.13.	Yangın direnci testi birinci (a), ikinci (b), üçüncü (c) ve dördüncü (d) aşamaların gösterimi.....	51
Şekil 2.14.	Kaliforniya Lake Forest'taki kaza ve yangına müdahale anı ……..….....	68
Şekil 2.15.	Tesla X 2016 model SUV aracının batarya yerleşimi….	69
Şekil 2.16.	Kaza sonrasında bataryanın görünümü …….……..	69
Şekil 2.17.	Kaliforniya Mountain View'daki kaza anı ……..	70
Şekil 2.18.	2014 model Tesla S aracının Florida'daki kaza anı ..…..	71
Şekil 2.19.	Hasar gören batarya paketinin kaza sonrası görünümü....	71
Şekil 2.20.	2012 model Tesla S aracının yanma anı ……..	72
Şekil 2.21.	Yangın sonrası batarya paketinin görünümü ….……..	73
Şekil 2.22.	Lifan 650 model aracın yanma anı…….……..	73
Şekil 2.23.	Tesla S model aracın Norveç'te şarj istasyonunda yanma anı ……..……..	74
Şekil 2.24.	Avusturya'da Tesla S model aracın kaza anı ……..	74
Şekil 4.1.	Dünya'da trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı ……..	97
Şekil 4.2.	Dünya'da trafiğe kayıtlı elektrikli araç provizyonu...…..	98
Şekil 4.3.	Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı ……...	98
Şekil 4.4.	Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç provizyonu …..	99
Şekil 4.5.	Elektrikli araç yangın güvenliği risk değerlendirmesi…..	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Titreşim testi uygulama standartları……...	41
Çizelge 2.2.	Düşürme testi standartları……...	42
Çizelge 2.3.	M1 ve N1 kategorisi araçlar için akselerasyon zaman tablosu…….....	45
Çizelge 2.4.	Dünya'daki araç yangınlarına örnekler …….	75
Çizelge 4.1.	Kazaya bağlı olabilirlik tablosu ……..…….	104
Çizelge 4.2.	Kazaya bağlı şiddet derecesi tablosu…..……...	104
Çizelge 4.3.	Kazaya bağlı risk matrisi……	105
Çizelge 4.4.	Trafikteki elektrikli aracın risk olabilirlik tablosu…..…...	105
Çizelge 4.5.	Kullanım esnasında elektrikli aracın risk şiddet derecesi tablosu……...	106
Çizelge 4.6.	Trafikteki elektrikli araca yönelik risk matrisi…..…….	106
Çizelge 4.7.	Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk olabilirlik tablosu……	107
Çizelge 4.8.	Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk şiddet derecesi……...	107
Çizelge 4.9.	Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk matrisi…	108

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar artmakta olan fosil yakıt tüketimi Dünya'nın ozon tabakasını azaltmakta ve ortalama sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Küresel ısınma olarak tanımlanan bu durum, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini gözler önüne sermektedir. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak ve bu duruma son vermek doğrultusunda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden enerji politikalarını benimsemekte ve yürürlüğe koymaktadır. Bu politikalardan biri de karbon ayak izinin azaltılması ve sıfır karbon olarak ifade edilebilir.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının fabrikalarda, konutlarda ısıtma-soğutma, aydınlatma, elektrik temini, vb. alanlarda kullanımının yanı sıra ulaşımda da uygulama örneklerine rastlanmaktadır. Sıfır karbon politikasını yaygınlaştırmak adına elektrikli araç üretim ve kullanımına teşvik sağlanmakta ve elektrikli araç talebi artmaktadır. Çevre dostu ve sessiz olan bu araçların güvenliği konusunda araştırmalar ve güvenlik arttırma çalışmaları devam etmektedir.

1.1. Tezin Kapsamı, Amacı, Katkısı ve Araştırma Sorusu

Bu çalışmada, elektrikli araçların hasara uğraması durumunda araç bataryasında meydana gelen termal kaçak ve yangın süreci incelenmekte, termal kaçak sebepleri, araç güvenlik birimleri, yangın söndürme sistemleri, yangın sonrası araç tahliyesi ve Türkiye'deki elektrikli araç yangın riskleri açıklanmaktadır. Ayrıca, Dünya'dan kaza örneklerine ve elektrikli araç istatistiğine de yer verilmiştir. Bu kapsam doğrultusunda tezin amacı, elektrikli araçlardaki yangın risklerini, Türkiye'de ortaya çıkabilecek elektrikli araç yangın risklerini belirlemek ve çözüm önerileri geliştirmektir.

Çalışmada yer alan elektrikli araç istatistiği, elektrikli araç yangın risk analizi, Türkiye özelinde risk projeksiyonu, şarj istasyonlarının güvenliği, yangın sonrası tahliye işlemi ve güvenlik önlemleri tezin özgünlüğü kapsamında değerlendirilebilir. Tezin amacı,

elektrikli araç yangını, risk analizi ve yangın güvenliği hakkında Türkiye'deki bilimsel çalışmalara katkı sunmaktır.

Tezin içeriğini oluşturan araştırma soruları aşağıdaki gibidir:

- Elektrikli araçlarda yangın ve yangın güvenliği nedir? Termal kaçak nedir ve lityum iyon bataryaların yanma süreci nasıl gelişmektedir? Termal kaçağa yol açan etkenler nelerdir?
- Yangın söndürme sistemleri nelerdir? Lityum iyon batarya yangınlarında hangi söndürücü etkili bir söndürme işlemi gerçekleştirmektedir?
- Elektrikli araç yangın risk analizi nedir, nasıl yapılmaktadır? Elektrikli araç yangın riskleri nelerdir? Türkiye özelinde elektrikli araç yangın riskleri nelerdir? Yangın güvenliğinin sağlanabilmesi için alınması gereken önlemler nelerdir?

Tez çalışması akış şeması Şekil 1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Tez akış şeması.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Batarya ve Çeşitleri

Bataryalar, genellikle depolanmış kimyasal enerjiyi yüksek verimlilikte ve çalışma aşamasında herhangi bir gaz emisyonu olmaksızın elektrik enerjisine dönüştüren, çok sayıda elektrokimyasal hücreyi barındıran bir taşınabilir depolama cihazıdır. Bataryalarda, kimyasal tepkimeler katı madde kütlesi boyunca gerçekleşir. Böylece malzeme, pratik bir şarj edilebilir bataryayı sağlamak için yüzlerce / binlerce döngü ile malzemede reaksiyon türlerinin içeri girmesine ve çıkarılmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır (Eğin, 2019).

2.1.1. Kurşun Asit (Pb-Acid) Batarya

Kurşun asit bataryalar, 1800'lü yılların ortasından günümüze kadar bir geçmişe sahip olan eski ve yaygın kullanılan ticari bataryalardır. Ucuz ve kullanımı basit olduğu için günümüzde içten yanmalı motorlu araçlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kurşun-asit pillerde negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit (PbO_2) ve elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) materyalleri kullanılmaktadır. Batarya deşarj olurken pozitif plakada kurşun dioksit kurşun sülfata dönüşür, negatif plakada kurşun da kurşun sülfata dönüşür. Bu sırada elektrolit sülfürik asidini kaybederken su kazanır. Bu işlemlerin sonucunda elektrik enerjisi oluşur. Akü şarj olurken de bu işlemlerin tersi meydana gelmektedir. Plakalar eski haline dönerken elektrolitte sülfürik asit yeniden oluşturulmaktadır. Bu batarya kimyası ucuz olmasına rağmen, düşük enerji içeriğine sahiptir (Eğin, 2019).

2.1.2. Nikel Kadmiyum (NiCd) Batarya

Nikel kadmiyum bataryaların tarihi 1899'a dayanmaktadır ve bu batarya anot için nikel oksihidroksit ve katot için kadmiyum kullanır. Bununla birlikte, 1960'lı yılların başında yüksek hacimlerde karşımıza çıkmıştır ve kurşun asit kimyasına göre önemli derecede daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha uzun ömür sürelerine sahip olduğu için 20.

Yüzyılın son çeyreğinde çeşitli yüksek performanslı uygulamalar için (telefonlar, güç araçları, medikal aletler vb.) tercih edilen bir kimyaydı. Bu batarya kimyası, negatif olarak batarya kapasitesini etkilemeden ve bakım gerektirmeden yüksek deşarj oranlarının sürdürülebilmesi ile birlikte geniş sıcaklık aralığı ve kıyasla düşük iç direnç gibi avantajlara sahiptir. Fakat daha düşük enerji yoğunluğuna, kısa ömür süresine, daha belirgin hafıza etkisine ve çevresel etkilere sahip olmasından dolayı yerini nikel metal hidrit (NiMH) ve lityum iyon bataryalara bırakmıştır (Eğin, 2019).

2.1.3. Nikel Metal Hidrit (NiMH) Batarya

Nikel metal hidrit bataryalar, kıyasla yüksek özgül enerji ve ömür sürelerine sahip olmasıyla birlikte toksik olmayan geri dönüştürülebilir bir malzemeye sahip oldukları için 1990 ve 2000 yılları arasında elektrikli araç uygulamaları için kullanılan iyi bir batarya adayıydı. Ayrıca, aşırı şarj edildiğinde nikel metal hidrit piller, bakım gerektirmeden suyu ayırmak ve yeniden birleştirmek için fazla enerjiyi kullanırlar. Bu batarya kimyasının çalışma mekanizması nikel oksit olan anot ve metal hidrit olan katot tarafından hidrojenin salınımı ve absorbe edilmesi üzerinedir (Eğin, 2019).

2.1.4. Lityum İyon Batarya

Lityum iyon piller ilk kez 1912 yılında Gilbert N. Lewis tarafından keşfedilmiş olmasına karşın lityum kimyaya ait pillerin ticarileşmesi 1970'li yılların başlarında ilk birincil lityum iyon pillerin ortaya çıkması ile başlamıştır. Şarj edilebilir lityum iyon pillerin ortaya çıkması ise 20 yıllık bir çalışma sonucunda olmuştur. İlk şarj edilebilir ticari lityum iyon pil kimyası John Goodenough'un çalışmalarına dayanarak 1991 yılında bir Japon şirketi olan Sony tarafından piyasaya sürülmüştür (Dilbaz, 2023).

Lityum iyon bataryalar otomotivde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bataryaların maliyeti, kullanım ömürleri, artan enerji yoğunluğu ve güvenliği açısından pek çok zorlukla da karşılaşılmaktadır. Bu zorluklar arasında, güvenlik bataryalar için temel gerekliliktir ve gelecekteki yüksek enerji yoğunluklu batarya sistemlerinin uygulanmasına geçmeden önce ele alınması gereken kritik sorundur (Zhao ve diğerleri,

2024). Lityum iyon bataryalar, yeniden şarj edilebilir özelliği olan, 60 V ile 1000 V arası enerji kaynağıdır. Anot, katot, elektrolit ve seperatörden oluşmaktadır. Hücreler modülleri, modüller batarya ünitelerini oluşturmaktadır. Anot negatif elektrot, katot ise pozitif elektrottur. Seperatör ise polimerik film anot ile katotu ayırır. Lityum iyonlarının anot ve katot arasındaki hareketi elektrik akımı oluşturur (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024).

Lityum iyon bataryaların diğer batarya türlerine göre üstünlükleri aşağıda özetlenmiştir:

Yüksek enerji yoğunluğu- Lityum iyon piller, diğer pil türlerine kıyasla yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Burada enerji yoğunluğu iki şekilde tanımlanabilir. İlk olarak, bir pilin ağırlığına kıyasla ne kadar enerjiye sahip olduğunu ifade eden gravimetrik enerji yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu Watt-saat / kilogram (Wh / kg) olarak ifade edilir. İkinci tanım ise bir pilin hacmine kıyasla sahip olduğu enerji (Wh / litre (Wh / l)) olarak ifade eden hacimsel enerji yoğunluğu şeklindedir (Dilbaz, 2023).

Hücre voltajı- Bir lityum iyon hücresi ortalama 3,6 volt (V) üretir, bu da diğer batarya kimyalarından çok daha yüksektir. Örneğin NiMH ve NiCd ikincil bataryalar yaklaşık olarak 1.2-1.5 V nominal değerde çalışır. Bundan dolayı, her hücre daha fazla voltaj ürettiğinden, birçok batarya uygulamasında daha az lityum iyon hücresi gerekir. Örneğin, bir telefonun güç sağlamak için yalnızca bir hücreye ihtiyacı vardır. Bu, güç yönetimini önemli ölçüde basitleştirir (Dilbaz, 2023).

Kendi kendine deşarj oranının düşük olması- Birçok şarj edilebilir pilin karşılaştığı en büyük sorun hızlı deşarj oranlarıdır. Bununla birlikte, lityum iyon hücrelerin deşarj oranı çok daha düşüktür (Dilbaz, 2023).

Hafıza etkisi- Diğer türlere göre lityum iyon bazlı piller hafıza etkilerine karşı duyarlı değildir. Örneğin, nikel bazlı bir batarya türüne (NiCd) kısmi şarj uyguladıktan sonra tekrar şarj edersek daha önceki sahip olduğu kapasiteyi bize vermeyecektir. Bu sebeple lityum iyon bataryalar diğer batarya türlerine göre şarj ve deşarj işlemleri sırasında

kapasitelerinin tamamından yararlanabiliriz. Bu da esnek bir şekilde şarj ve deşarj edebilme imkânı sunar (Dilbaz, 2023).

Çevrim ömrü- Lityum iyon bataryalar diğer batarya türlerine karşın daha fazla çevrim ömrü sunarlar. Örneğin NiMH piller maksimum 500 çevrim dayanırken lityum iyon pillerde bu oran 1000 çevrim değerlerini aşmaktadır. Bundan dolayı, lityum iyon kimyaya sahip piller daha uzun ömürlü olarak ifade edilir (Dilbaz, 2023).

Çeşitli farklı pil türlerine sahip olması- Günümüzde birçok lityum iyon batarya türü mevcuttur. Lityumun birçok avantajı olduğu için diğer malzemelerle 11 birleştirilerek belirli bir uygulama için kullanılabilir. Bazıları, telefonlar gibi elektronik cihazlar için harika olan yüksek özgül enerjiye sahipken, diğerleri, elektrikli aletler için harika olan yüksek özgül güce sahiptir (Dilbaz, 2023).

Lityum iyon bataryaların diğer bataryalara göre dezavantajları aşağıda verilmektedir:

Bataryaların korumaya ihtiyacı vardır- Aşırı şarjdan ve çok fazla deşarj edilmekten korunmaları gerekir. Li-iyon bataryalar çok sık tamamen deşarj edilirlerse performanslarının büyük ölçüde etkilenir. Bununla birlikte, şarj sırasında çekilen akımın güvenli sınırlar içinde tutulması da önemlidir (Dilbaz, 2023).

Yaşlanma- Lityum bataryalar, diğer batarya teknolojilerine kıyasla hızlı bir şekilde yaşlanma eğilimindedir. Bu bozulma, sadece zamana bağımlı değil, aynı zamanda bir bataryanın maruz kaldığı şarj/deşarj döngülerinin sayısından da etkilenir (Dilbaz, 2023).

Maliyet- Bir li-iyon hücre yapmak, NiCd batarya yapmaktan %40 daha maliyetlidir. Bu maliyet, özellikle telefonlar gibi seri üretilen ürünlerle tüketiciye düştüğü için imalatta dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Dilbaz, 2023).

Lityum iyon piller şarj olurken pozitif uçtan (katot) negatif uca (anot) elektrolit üzerinden lityum iyonları geçerek negatif uçta kalır ve bu işlem sayesinde lityum iyon pil içerisinde enerji depolanır. Pozitif uçtan negatif uca elektron akışı durduğunda

bilinmelidir ki lityum iyon pil tamamen şarj olmuştur. Deşarj esnasında da bunun tam tersi olarak negatif uçtan pozitif uca lityum iyonlarının hareketi gerçekleşmektedir ve bu olayla lityum iyon piller enerji harcayarak boşalmaktadır. Negatif uçtan pozitif uca elektron akışı durduğunda bilinmelidir ki lityum iyon pil tamamen enerjisini boşaltıp deşarj olmuş ve şarja ihtiyaç duymaktadır (Baturar, 2023).

Lityum iyon pillerde şarj ve deşarj sırasında anot ve katot elektrotlarında meydana gelen indirgenme/yükseltgenme reaksiyonları (Baturar, 2023);
Katot:

$$LiMO_2 \underset{deşarj}{\overset{şarj}{\rightleftarrows}} Li_{1-x}MO_2 + xLi^+ + xe^- \tag{2.1}$$

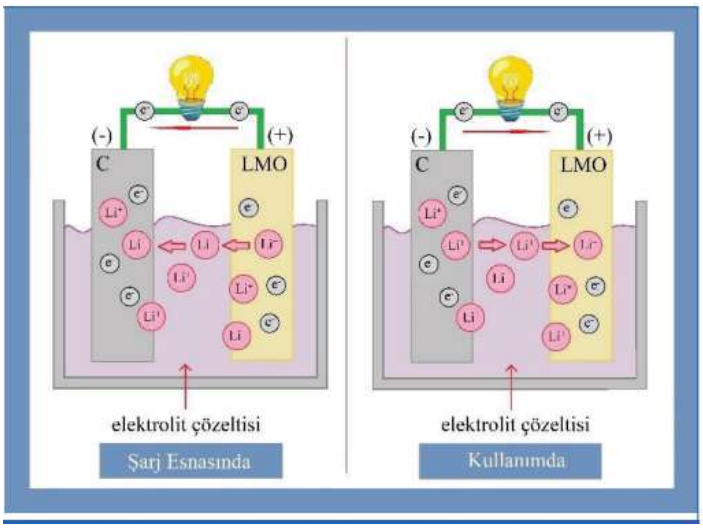
Anot:

$$C + xLi^+ + xe^- \underset{deşarj}{\overset{şarj}{\rightleftarrows}} Li_xC \tag{2.2}$$

burada M, metal elementi (Ni, C, Mn), C anot malzemesini ifade etmektedir (Baturar, 2023).
Lityum iyon pilde gerçekleşen toplam reaksiyon (Baturar, 2023):

$$LiMO_2 + C \leftrightarrow Li_{1-x}MO_2 + Li_xC \tag{2.3}$$

Lityum iyon bataryada iyon hareketliliği Şekil 2.1.'de şematik olarak gösterilmektedir (Batmaz, 2023).



Şekil 2.1. Lityum iyon pilde şarj ve deşarj (Batmaz 2023).

2.1.4.1. Anot

Anot, pil hücresinin negatif tarafı ve elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında elektronların üzerinden akarak devreye aktığı elektrot olarak tanımlanır. Anot tarafında, reaksiyonlar sonucunda yükseltgenme gerçekleşir (Dilbaz, 2023). Anot malzemesi olarak çoğunlukla grafit kullanılır. Grafit lityum biriktirmeye daha yatkındır. Bu ise anot üzerinde dentritlere (çıkıntılara) neden olur. Bu dentritler seperatöre zarar verebilir. Bu nedenle enerji kapasitesi grafite göre düşükte olsa $Li_4Ti_5O_{12}$ kullanımı veya başka metaller (Si, Sn, Sb, Ge vs.) ve bu metallerin lityum ile alaşım yapabilen bileşenleri üzerine çalışılmaktadır (Karamangil ve diğerleri, 2023).

2.1.4.2. Katot

Katot, pil hücresinin pozitif tarafı ve reaksiyon sırasında devreden geçen elektronları toplayan elektrot olarak tanımlanır. Katot tarafında reaksiyonlar sonucunda indirgenme gerçekleşir (Dilbaz, 2023). Katot malzemesi olarak çoğunlukla $LiCoO_2$ (LCO), $LiMn_2O_4$ (LMO), $Li(Ni_xCo_yAl_z)O_2$ (NCA) ve $Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$ (NCM) gibi lityum metal oksitler kullanılır. LCO veya NCM yerine $LiFePO_4$ kullanmak yangın riskini azaltır. Çünkü organik elektrolitlerle reaktivitesi daha düşük dolayısıyla daha az ısı salınımı gerçekleşir (Karamangil ve diğerleri, 2023).

2.1.4.3. Elektrolit

Elektrolit, pil içerisinde iyonlar aracılığı ile elektrotlar arasında yük aktarımını sağlayan ortamdır. Çeşitli tuzların su, baz veya asitler ya da organik çözücülerde çözünmesi ile meydana gelir (Dilbaz, 2023). Elektrolit malzemesi organik çözücülerden ve lityum tuzlarından oluşur. Organik çözücü olarak etilen karbonat (EC), dietil karbonat (DEC), propilen karbonat (PC), etil metil karbonat (EMC) ve dimetil karbonat (DMC) gibi maddeler kullanılır. Özellikle EC (146 °C), DMC (18 °C) ve EMC (23 °C) diğer çözücülere göre daha düşük parlama noktasına sahiptirler ve bu nedenle kolayca ateşlenebilirler. Lityum tuzu olarak ise lithium hexaflorfosfat hexaflorarsenat ($LiPF_6$), monohidrat lityum perklorat ($LiClO_4$) ve lityum tetraflorborat ($LiBF_4$) kullanılır. Organik çözücüler birer hidrokarbondur dolayısıyla yanıcıdırlar. Elektrolitin kütle oranı, hücre kütlesinin yaklaşık %10'u kadardır. Yangın emniyeti açısından daha kararlı lityum tuzları, elektrolit katkı maddeleri, yanıcı olmayan çözücüler ile polimer ve katı elektrolitler tercih edilir (Karamangil ve diğerleri, 2023).

2.1.4.4. Separatör

Separatör bataryada anot ile katot arasında bulunan genellikle polimer malzemesinden meydana gelen yapıdır. Genellikle separatör, tabakaların iki tanesi birbirinden farklı faz dönüşüm sıcaklıklarına sahip çok katmanlı filmlerden meydana gelir (Wang ve diğerleri, 2019). Separatör serbest lityum iyonlarının transferine izin verebilen gözenekli bir yapıya sahiptir (Kong ve diğerleri, 2018). İç kısa devre (internal short circuit – ISC) riskini engellemek adına anot ile katot arasında bir yalıtım görevi görür. Separatör elektrokimyasal olarak aktif bir malzeme olmamakla birlikte batarya güvenliği açısından son derece önemlidir. Separatör hasar görürse, hücre iç kısa devre nedeniyle termal kaçak durumuna geçebilir. İyon transferinde önemli bir rol oynar, hücre ömrünü ve performansını belirler. Seramik seperatörlerde bozunma sıcaklığı 250 °C ye kadar çıkar (Karamangil ve diğerleri, 2023).

2.2. Lityum İyon Batarya Çeşitleri

2.2.1. Silindirik Batarya

Silindirik hücre yapısında, elektrolit içerisine daldırılmış jellyroll adı verilen rulo şeklinde sarılmış elektrotlar (pozitif ve negatif) ve seperatör bulunmaktadır. Silindirik form faktörüne sahip hücreler, yüksek özgül enerjiye, uzun kullanım ömrüne sahip ve ekonomiktir. Bunun yanında sahip olduğu silindir şeklinden dolayı yüksek basınca dayanabildiği için üretimi kolay ve mekanik olarak stabildir. Bu sebeple de günümüzde popülerliğini hala korumaktadır. Piyasada 18650 (18 mm çap ve 65 mm uzunluk) ve 26650 (26 mm çap ve 65 mm uzunluk) olarak adlandırılan iki standart silindirik lityum iyon batarya yaygın olarak kullanılmaktadır. Silindirik form faktörüne sahip hücreler elektrikli el aletleri, oyuncaklar, lambalar, otomotiv endüstrisi ve mobil enerji sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Dilbaz, 2023). Silindirik tip hücre yapısı Şekil 2.2.'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Silindirik batarya yapısı (Dilbaz 2023).

2.2.2. Prizmatik Batarya

Kübik formdaki metal veya sert plastik bir muhafazaya sığdırmak için sıkıştırılmış, sarılmış, veya preslenmiş anot, katot, seperator (ayırıcı) ve elektrolit bir prizmatik hücrenin iç yapısını oluşturmaktadır. Bu tasarımda hücreler ince kılıflara sarılır ve katmanlı bir şekilde yerleştirme yaklaşımı ile hücre içindeki alandan en iyi şekilde yararlanılır. Ancak silindirik hücrelerden daha maliyetlidir. Bu hücre form faktörüne

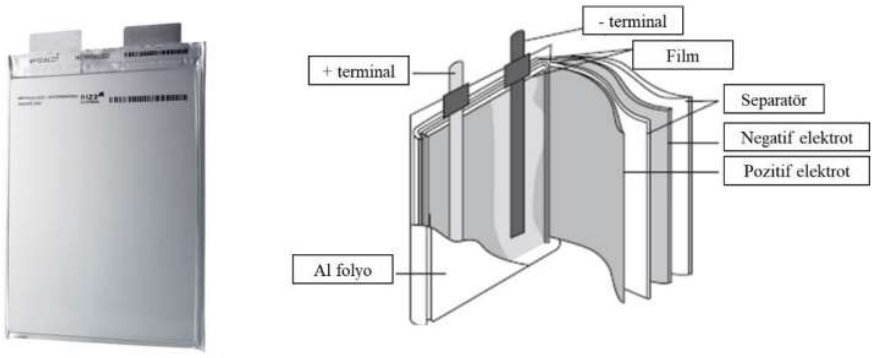
sahip 16 bataryalar akıllı telefonlarda, diz üstü bilgisayarlarda ve elektrikli araçlar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar (Dilbaz, 2023). Şekil 2.3.'te prizmatik batarya gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Prizmatik batarya hücre yapısı (Dilbaz 2023).

2.2.3. Kese Tip Batarya

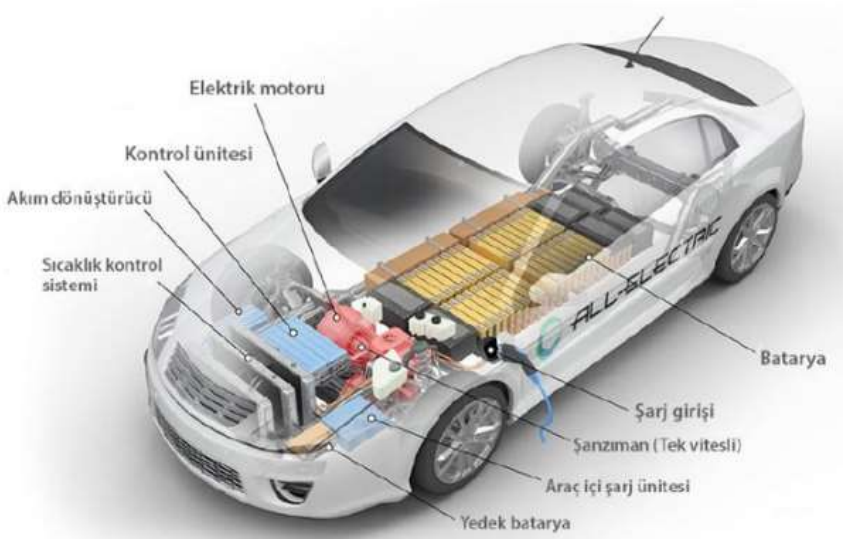
Hücrelerin içerisindeki elektrot ve seperatör katmanlarının katlanıp istiflenmesi ve sızdırmaz esnek bir folyo şeklindeki kese (hücre kabı) içerisine alınması ile kese formundaki hücreler oluşturulur. Bu şekilde tasarlanan hücre form faktörü, elektrot ve seperatör yerleşiminden dolayı oldukça yüksek paketleme verimliliği (%90) sunar. Bu yapıdaki bataryalar dronlar, model uçaklar ve arabalar gibi yüksek akım yüklerine ihtiyaç duyan uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak gaz oluşumu kese hücrelerinde oldukça önemli bir sorundur. Şarj / deşarj döngüsü sırasında yaşlanmaya ve kullanıma bağlı olarak elektrolit ayrışması ile CO_2 ve CO gibi gazlar üretilir. Ayrıca aşırı şarj durumu ve aşırı ısınma gibi stres faktörleri bu gazların salınımını arttırmaktadır. Bu durum kese hücrelerin kullanım sırasında şişmesine neden olarak hücrelerin yanmasına hatta patlamasına sebebiyet verir (Dilbaz, 2023). Kese tip hücre yapısı Şekil 2.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Kese tip batarya hücre yapısı (Dilbaz 2023).

2.3. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar; tahrik için bir veya birden daha fazla elektrik motoru kullanarak hareket eden, gücünü bataryadan veya yakıt hücresinden alan araçlar olarak tanımlanabilir (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024). Elektrikli araçlar Şekil 2.5.'te gösterilmek üzere genel olarak; batarya, şarj girişi, batarya yönetim sistemi, batarya ısıtma sistemi, elektrik motoru, DA/DA dönüştürücü, redüktör, yerleşik şarj cihazı, güç elektroniği denetleyicisi, termal sistem, şanzıman, elektrik güç kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. Elektrikli aracın yapısı (Yıldırım 2022).

Batarya: Bilindiği gibi elektrikli araçlar, motoru döndürmek ve sürüş için gerekli gücü üretmek için aküde depolanan elektrik enerjisini kullanır. Elektrikli araçlarda motorun bu gücü üretmek için batarya kullanması, fosil yakıt tüketen içten yanmalı araçlardan en büyük farkıdır. Bu nedenle elektrikli araçların içten yanmalı araçlar için en önemli bileşenlerden ikisi olan motor ve şanzımana ihtiyacı yoktur. Bunun yerine, elektrikli araçlar elektrik gücü için birkaç bileşen taşır. Bunlar; motor, batarya, yerleşik şarj cihazı ve Elektrik Gücü Kontrol Birimi'dir (EPCU). Bunların tümü, batarya elektriğinin elektrikli aracı ileriye/geriye doğru hareket ettiren kinetik kuvvete dönüştürülmesini sağlamak için gerekli bileşenleridir (Yıldırım, 2022).

Şarj girişi: Şarj girişi, çekiş aküsü paketini şarj etmek için aracın harici bir güç kaynağına bağlanmasına izin verir (Yıldırım, 2022).

Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System, BMS): Bataryanın birçok hücresini yöneterek tek bir varlıkmış gibi çalışabilmelerini sağlar. Elektrikli aracın bataryası, binlerce mini hücreden oluşur ve bataryanın dayanıklılığını ve performansını optimize etmek için her hücrenin diğerleriyle benzer durumda olması gerekir. 24 BMS esas olarak hücrenin şarj/deşarj durumunu denetler. Ancak arızalı bir hücre gördüğünde, hücrenin güç durumunu (açık/kapalı) bir röle mekanizması (diğer devreleri açmak/kapatmak için koşullu mekanizma) aracılığıyla otomatik olarak ayarlar. BMS genellikle pilin gövdesine yerleştirilir. Ancak bazen Elektrik Gücü Kontrol Ünitesinde (EPCU) de yer alabilir (Yıldırım, 2022).

Batarya Isıtma Sistemi: Daha düşük sıcaklıklarda, pil hem şarj kapasitesinde hem de hızda bir düşüş görür. Akü ısıtıcısı aküyü ideal sıcaklık aralığında tutmak, mevsimsel performans düşüşlerini önlemek ve maksimum sürüş mesafesini korumak için mevcuttur. Sistem şarj olurken de çalışır ve şarjın daha verimli olmasını sağlar (Yıldırım, 2022).

DA/DA dönüştürücü: Bu cihaz, çekiş akü paketinden gelen yüksek gerilimli DA gücünü, araç aksesuarlarını çalıştırmak ve yardımcı aküyü yeniden şarj etmek için gereken düşük gerilimli DA gücüne dönüştürür (Yıldırım, 2022).

Elektrik motoru: Elektrik enerjisini tekerlekleri hareket ettiren kinetik enerjiye dönüştürür. Böylece, otomobillerdeki gürültü ve titreşim en aza indirilir. Sessiz ve konforlu bir sürüş sağlanmasına imkân verir. Ayrıca, elektrikli araç güç aktarma sistemi motordan daha küçüktür. Bu nedenle verimli araç tasarımı için genişletilmiş kabin alanı veya depolama gibi birçok ek alan sağlar. Motor aynı zamanda kısmen bir elektrik jeneratörüdür. Vites boştayken (örneğin, araba yokuş aşağı giderken) üretilen kinetik enerjiyi aküde depolanabilen elektrik enerjisine dönüştürür. Aynı enerji tasarrufu fikri, otomobilin hızını düşürdüğü ve "rejeneratif fren sistemi" olarak adlandırılan sistemle sonuçlandığında da geçerlidir. Bazı araçlar, hem sürüş hem de rejenerasyon işlevlerini yerine getiren motorlar kullanır (Yıldırım, 2022).

Redüktör: Redüktör, motorun gücünü tekerleğe etkin bir şekilde iletmeye hizmet ettiği için bir tür şanzımandır. Motor, içten yanmalı bir motordan çok daha yüksek bir devir/dakika değerine sahiptir. Bu nedenle şanzımanlar motor devrini sürüş durumuna uyacak şekilde değiştirirken, redüktör her zaman devir/dakikayı uygun bir değere indirmelidir. Düşük devir/dakika ile elektrikli araç güç aktarma sistemi, sonuçta ortaya çıkan daha yüksek momentten faydalanabilir (Yıldırım, 2022).

Yerleşik şarj cihazı (On-board Charger, OBC): Şarj portu aracılığıyla sağlanan AA elektriğini alır ve çekiş aküsünü şarj etmek için DA gücüne dönüştürür. Ayrıca şarj ekipmanı ile iletişim kurar ve şarj esnasında gerilim, akım, sıcaklık ve şarj durumu gibi batarya özelliklerini izler. Yerleşik şarj cihazı (OBC), AA'yı yavaş şarj cihazlarından veya ev prizlerinde kullanılan taşınabilir şarj cihazlarından DA'ya dönüştürmek için kullanılır. Bu, OBC'nin geleneksel konvertöre benzemesine neden olabilir. Ancak işlev açısından önemli ölçüde farklılık gösterirler. OBC şarj içindir ve konvertör hızlanma/yavaşlama içindir. Hızlı şarj cihazları elektriği doğru akımla sağladığından dolayı hızlı şarjda OBC'ye gerek yoktur (Yıldırım, 2022).

Güç elektroniği denetleyicisi: Bu birim, çekiş aküsü tarafından sağlanan elektrik enerji akışını yöneterek, elektrikli çekiş motorunun hızını ve ürettiği momenti kontrol eder (Yıldırım, 2022).

Termal sistem (Soğutma): Bu sistem, elektrik motoru, güç elektroniği elemanları ve diğer bileşenler için uygun bir çalışma sıcaklığı aralığı sağlar (Yıldırım, 2022).

Çekiş pil takımı: Elektrik çekiş motoru tarafından kullanılmak üzere elektriği depolar (Yıldırım, 2022).

Şanzıman (Elektrikli): Şanzıman, tekerlekleri sürmek için elektrikli çekiş motorundan gelen mekanik gücü aktarır (Yıldırım, 2022).

Elektrik Güç Kontrol Ünitesi (Electric Power Control Unit, EPCU): Elektrik Güç Kontrol Ünitesi (EPCU), araçtaki elektrik gücünün akışını kontrol ederek tüm cihazların verimli şekilde çalışmasını sağlar. Evirici, Alçak Gerilim DA-DA Dönüştürücü (LDC) ve Araç Kontrol Ünitesinden (VCU) oluşur (Yıldırım, 2022).

- **Evirici:** Evirici, akünün DA'sını AA'ya dönüştürür ve daha sonra motor hızını kontrol etmek için kullanılır. Cihaz, hızlanma ve yavaşlamadan sorumludur. Bu nedenle elektrikli aracın sürülebilirliğini en üst düzeye çıkarmada önemli bir rol oynar (Yıldırım, 2022).

- **Alçak Gerilim DA-DA Dönüştürücü:** Elektrikli aracın aküsünden gelen yüksek gerilimi düşük gerilime (12 V) dönüştürür ve aracın çeşitli elektronik sistemlerini besler. Elektrikli araçtaki tüm elektronik sistemler düşük gerilimde elektrik kullanır. Bu nedenle bu sistemlere faydalı olması için önce aküdeki yüksek gerilimin dönüştürülmesi gerekir (Yıldırım, 2022).

- **Araç Kontrol Ünitesi:** Araçtaki tüm elektrik güç kontrol sistemlerinin kontrol kulesi olan VCU, EPCU'nun en önemli bileşenidir. Motor kontrolü, rejeneratif fren kontrolü, yük yönetimi ve elektronik sistemler için güç kaynağı dâhil olmak üzere aracın neredeyse tüm güç kontrol mekanizmalarını denetler (Yıldırım, 2022).

Genel olarak elektrikli araç türleri (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024);

2.3.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar

Bunlar, içten yanmalı motoru olmayan tamamen elektrikli araçlardır. Batarya enerjisi bittiğinde yeniden şarj edilmeleri gerekir (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024). Araç, enerji depolama ünitesi için bir batarya, bir elektrik motoru ve bir kontrolör içerir. Şarj üniteleri aracın içine yerleştirilebilir veya aracın dışında yer alabilir. Kontrolör, elektrik motorunun hızını kontrol etmek için kullanılır. Aracın optimum güç koşullarında çalışmasını destekler. Elektrik motorları aynı zamanda jeneratör olarak da çalışabilir. Kontrolör, optimum güç dağılımına ulaşmak için elektrik motorunun çalışma moduna da karar verir. Bu tip elektrikli araçlar, elektrikli araçların ilk modellerini oluşturmaktadır. Elektrikli bisikletten elektrikli arabalara, dağıtım kamyonlarından otobüslere kadar pek çok örneği vardır. Sınırlı menzile ve performansa sahip olması gibi bir dezavantajı vardır (Yıldırım, 2022).

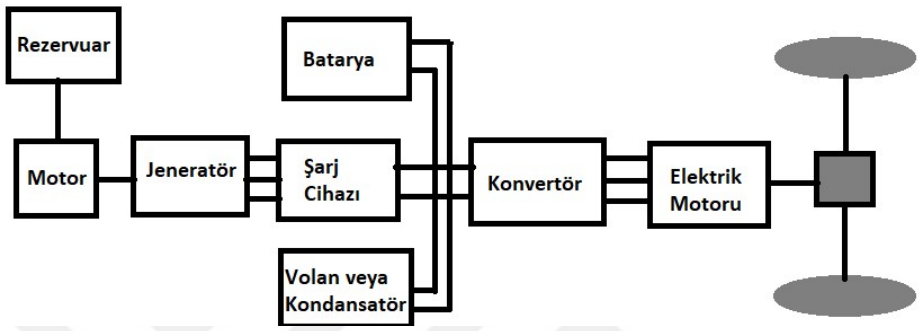
2.3.2. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar

Bu araçlarda hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor bulunur. Kısa mesafelerde bataryasından aldığı elektrikle çalışıp sonrasında içten yanmalı motora geçebilmektedir. Batarya enerjisi azaldığında veya ek güce ihtiyaç duyulduğunda her iki motoru kullanabilmektedir (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024).

2.3.3. Hibrit Elektrikli Araçlar

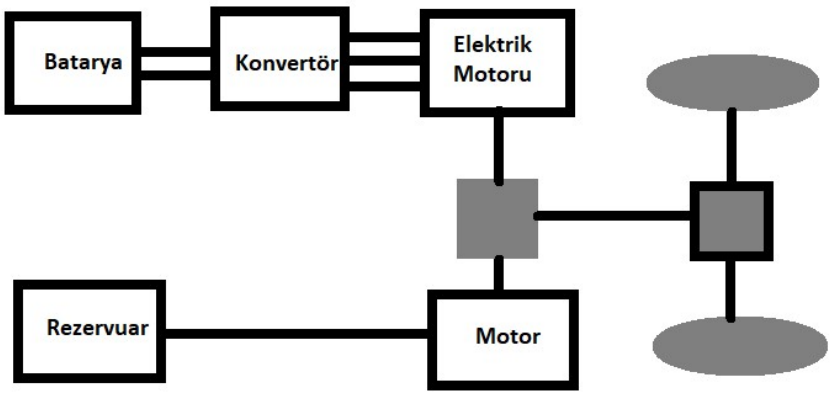
Plug-in Hibrit Elektrikli araçlarına benzer şekilde, Hibrit araçlar da hem elektrik motoruna hem de içten yanmalı motora sahiptir. Yalnız farklı olarak Hibrit araçların bataryaları harici fişe takılarak şarj edilememesidir. Hibrit araçlarda bataryalar, içten yanmalı motor ve rejeneratif frenleme tarafından şarj edilmektedir (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024). Hibrit araç, içten yanmalı motor, elektrik motoru ve jeneratörden oluşur. Seri ve paralel hibrit olmak üzere iki çeşitten oluşur (Yıldırım, 2022).

Seri hibrit elektrikli araçlarda, elektrik motoru aracı hareket ettirir. Elektrik motoru, bir elektrik pilinden veya içten yanmalı bir motorla çalıştırılan bir jeneratörden beslenir ve her iki güç kaynağı da elektrik motoruna enerji vermek için kullanılabilir. Seri hibrit elektrikli araçlarda, aracın çekiş gücü sadece elektrik motorundan gelmektedir. Diğer enerji kaynakları elektrik motorunu besler (Yıldırım, 2022). Seri hibrit aracın yapısı Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Seri hibrit elektrikli aracın yapısı.

Paralel hibrit araçlarda ise, hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru kullanılır. Bu motorlar aracın güç aktarım sistemine bağlıdır ve aynı anda aracı hareket ettirebilir (Yıldırım, 2022). Paralel hibrit aracın yapısı Şekil 2.7.'de gösterilmektedir.



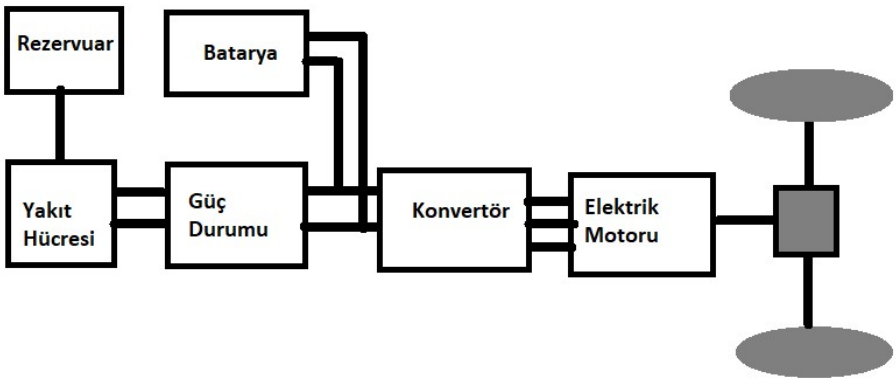
Şekil 2.7. Paralel hibrit elektrikli aracın yapısı.

İçten yanmalı motor ve jeneratör, hibrit araçların hareketi sırasında aküyü şarj eder. Bu, akünün elektrikli araçlara göre daha küçük olmasını sağlar. Ayrıca sistem, hibrit

elektrikli araçların çalışma şekli olan rejeneratif frenlemeye de izin verir. Bu modda elektrik motoru jeneratör gibi çalışır ve elektrik enerjisi üretir. Her iki hibrit çeşidinde de birden fazla elektrik motoru olabilir (Yıldırım, 2022).

2.3.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

Yakıt hücreli elektrikli araçlar, yakıt hücresinin hidrojen kullanarak görev aldığı bir dizi hibrit araç olarak düşünülebilir (Eğin, 2019). Yakıt hücresi, enerji taşıyıcısını sıvı veya gaz formunda kullanan kimyasal bir yapıdır. Bir kimyasal reaksiyondan sonra enerji üretir (Yıldırım, 2022). Bu araçlar, elektrik üreten yerleşik bir yakıt hücresine ve elektrik motoruna sahiptir. Yakıt hücresine güç sağlamak için hidrojen gazı kullanır (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024). Yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik, elektrik motoruna güç vermek için kullanılabilir aynı zamanda enerji depolama sisteminde (batarya, ultrakapasitör, volan gibi) enerjiyi saklamak için kullanılabilir (Eğin, 2019). Yakıt hücreli elektrikli araçlar sadece kara araçları değil aynı zamanda gemilerdir. Pahalı bir teknoloji olması dezavantajlarıdır (Yıldırım, 2022). Yakıt hücreli elektrikli aracın yapısı Şekil 2.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Yakıt hücreli elektrikli aracın yapısı.

2.4. Elektrikli Araçların Tarihçesi

İlk elektrikli aracın muhtemelen 1842'de Amerika Birleşik Devletleri'nde Thomas Davenport veya Edinburgh'ta Robert Davidson tarafından yapıldığı söylenmektedir. Bu

araçların her ikisinin de şarj edilemeyen elektrik hücreleri vardı ve bu nedenle sınırlı bir yol menziline sahiptiler ve sıradan kullanıcılar tarafından kabul görmediler (Kaptan, 2016).

Bu erken gelişmeler kamuoyunun dikkatini çekmedi çünkü bu teknoloji at arabalarıyla rekabet edecek kadar yeterli değildi. 15 km/s hız ve 16 km menzil müşteriler için heyecan verici değildi. 1864 Paris-Rounen yarışı her şeyi değiştirdi: 1135 km, 23 km/s ortalama hızla 48 saat 53 dakikada kat edildi. Bu hız at arabalarına göre çok üstündü. Halk bu elektrikli araçlarla ilgilenmeye başladı (Kaptan, 2016).

Otomobillerde batarya kimyasında yaygın olarak kullanılan ilk kurşun-asit batarya, 1859 yılında Gaston Planté tarafından bulunmuştur. Bu keşif, 1881 yılında Gustave Trouvé tarafından yapılan elektrikli üç tekerlekli araçta uygulanmıştır. 1865 yılında batarya depolama keşfedilmiş, 1881 yılında geliştirilmiştir. Batarya teknolojisi 1890-1910 yılları arasında, 1881 yılında Henri Tudor tarafından modern kurşun-asit bataryanın geliştirilmesiyle önemli ölçüde iyileştirildi (Kaptan, 2016).

Birçok kişi ve şirket elektrikli araçlar geliştirdi. 1897'de London Electric Cab şirketi, Walter Bersey tarafından tasarlanan arabaları kullanarak günlük üretime başladı. 40 hücreli ve üç beygir gücünde bir elektrik motoru kullanan Bersey Cab, şarjlar arasında 50 mil gidebiliyordu. Bir yıl sonra, Avusturya'daki Lohner & Company'de mühendis olan Dr. Jacob Ferdinand Porsche, ilk arabası olan Lohner-Porsche'yi yaptı. Bu dünyanın ilk önden çekişli aracıydı. İkinci arabası daha ilgi çekiciydi, hibrit bir araçtı. Bu Porsche, tekerleklerin göbeği aracılığıyla ayrı tekerleklere güç veren elektrik motorlarına güç sağlayan bir jeneratörü çalıştırmak için içten yanmalı motoru kullanıyordu (Kaptan, 2016).

Elektrikli araçlar, benzinli araçların titreşimine, kokusuna, gürültüsüne sahip değildi. Motoru çalıştırmak ve vites değiştirmek benzinli bir aracı sürmenin en zor kısmıydı. Elektrikli araçların çalışması için elle krank çevrilmesine gerek yoktu ve şanzımana veya vites değiştirmeye ihtiyaçları yoktu. Bunlar halkın içten yanmalı araçlara göre elektrikli araçları kabul etmesinin başlıca nedenleriydi (Kaptan, 2016).

1904’te Ford Motor Şirketi, benzinle çalışan otomobillerin üretimine geçti. Model T, 1908’de üretime girdi. Birkaç yıl içinde elektrikli otomobil şirketi kapanmaya başladı. 1920’lere gelindiğinde otomobil, minibüs, taksi, otobüs olarak kullanılmak üzere birkaç yüz bin elektrikli araç üretilmişti. Ancak, ucuz benzinli araçlar oldukça kullanışlı ve güç bakımından elektrikli araçlara göre üstünlerdi (Kaptan, 2016).

1945’te Bell Laboratuvar’ındaki üç araştırmacı transistörü keşfetti. Sinyal elektroniği için vakum tüplerinin yerini aldı ve kısa süre sonra yüksek voltajlarda yüksek akımların anahtarlanmasını sağlayan tristör icat edildi. 1966’da General Motors tristörlerle oluşturulan invertörlerle beslenen endüksiyon motorlarıyla tahrik edilen Electrovan’ı üretti (Kaptan, 2016).

Petrol fiyatlarının artmasına sebep olan 1970’lerdeki Arap petrol ambargosuyla beraber, ABD binek araçlardaki verimlerin artmasını sağlayan ve ortalama yakıt ekonomisi standartlarını beraberinde getiren yakıt tüketiminin azaltılmasını başlattı. Bunların arasında, 1965 tarihli Temiz Hava Yasası, elektrikli araçlarla ilgili araştırma yapmak için çok sayıda araştırma enstitüsünü ve firmayı da tetiklemiştir. Böylelikle, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara olan ilgi artmış ve günümüzün modern hibrit ve elektrikli araçlarının temelini oluşturan yakıt tüketimini azaltmak için çeşitli prototipler üretilmiştir. Fakat o dönemlerde önemli gelişmeler elde edemediler, bataryaların düşük enerji yoğunluğu ve yüksek fiyatları nedeniyle taşıt pazarına giremediler (Eğin, 2019).

1980'lere kadar elektrikli araçlarla ilgili çok az çalışma vardı. Çevre ile ilgili endişeler, bu konudaki araştırmaları arttırmıştır. Pil teknolojisi ve güç elektroniği alanındaki ilerlemelere rağmen, araç yelpazesi ve performansı hala yetersizdi. Modern elektrikli araç çağı, 1980'lerde ve 1990'ların başında General Motors gibi firmaların EV1 ve Peugeot Société Anonyme (PSA) 106 Electric ile birkaç gerçekçi aracı piyasaya sürmesiyle doruğa ulaşmıştır. Bu araçlar, daha öncekilere kıyasla başarılı sonuçlar verse 18 de 1990'ların başında elektrikli otomobillerin benzinli otomobillerle menzil ve performans bakımından asla rekabet edemeyeceğini göstermiştir. Bunun nedeni,

bataryalarda enerjinin, aynı enerji içeriği için benzinden çok daha ağır olan elektrotların metalinde depolanmasıdır (Yıldırım, 2022).

Elektrikli motorların verimli bir şekilde tahriği için güç dönüşüm tasarımının geliştirilmesini sağlayan mikroişlemcilerin keşfi ile 1980'ler ve 90'larda pek çok gelişme yaşanmıştır. Ayrıca bu dönemde, elektrikli araç geliştirmede doğrudan kullanılmasa da volan enerji depolama sistemlerinde kullanılan manyetik yatakların geliştirilmesine katkıda bulunan faktörler de olmuştur (Kaptan, 2016).

2000'li yılların başlarında, yakıt tüketimini azaltmak için küçük araçların ve elektrikli araç ve hibrit elektrikli araçların kullanımını arttırmaya yönelik çalışmalara başlanmıştır. 2004'te, Kaliforniyalı otomobil üreticisi Tesla Motors tarafından Tesla Roadster geliştirilmiş ve 2008 yılında piyasaya çıkmıştır. 2010 yılında, Mitsubishi MiEV ve Nissan Leaf elektrikli araçları Japonya ve Amerika gibi çeşitli ülkelerde satışa çıkmıştır. 2012 yılından beri ise, Citroen C1, Mercedes-Benz Vito E-cell, REVAi, Buddy, Wheego Whip LiFe, Transit Connect Electric, Tazzari Zero, Smart ED, Mia Electric, BYD e6, Ford Focus Electric, BMW ActiveE, Honda Fit, Coda, Renault Fluence Z.E.. Tesla Model S. gibi pek çok elektrikli otomobil piyasada yerini almıştır (Yıldırım, 2022).

Devlet teşvikleri, elektrikli araç teknolojilerindeki Ar-Ge, altyapıda önemli artış ve batarya maliyetlerinde azalma ile bu araçların pazardaki yerinin yakın gelecekte daha da etkin hale gelmesi beklenmektedir. Ayrıca, geçtiğimiz yirmi yıl içinde yakıt pili teknolojisinin, taşımacılık sektörü de dahil olmak üzere birçok sektördeki uygulamalarda yer almaya başladığı göz ardı edilmemelidir (Eğin, 2019).

2.5. Türkiye'de Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araç Ar-Ge projelerinde finansman desteği, tüketim ve araç vergilerindeki azalma ve bunula ilişkili altyapı oluşturma çabalarının artması, birçok özel şirketin, elektrikli batarya ve motor ile ilgili araştırma yapmaya başlamasını sağladı, birçok özel şirketin elektrikli batarya ve motor, emisyon azaltma yöntemleri ve araç sistemi

entegrasyonu konusunda yurt içinde araştırma yapmaya başlamasını teşvik etti. Bunlar arasında 2009 yılında, Türk otobüs üreticisi TEMSA, standart konvansiyonel otobüslere kıyasla %25 yakıt azaltma ve daha düşük CO_2 emisyonu sağlayan bir dizi hibrit güç aktarma sistemine sahip Avenue Hybrid'i piyasaya sürdü. Aynı yıl Otokar, hibrit kent otobüsü Doruk 160LE Hibra'nın elektrik bataryalı ve dizel motorlu, yakıt tüketiminde %20 azalma olduğunu iddia ettiği konseptini duyurdu (Eğin, 2019).

Kasım 2009'da TOFAŞ, Türkiye'de seri üretim için tasarlanan ve geliştirilen elektrikli araç olan Doblo EV'nin elektrikli versiyonunu geliştirmeye başladı ve 2010 yılında prototipini tanıttı. Araç 105 kW maksimum güç çıkışına sahip ve tek bir şarjla 150 km yol alabilmektedir. Ayrıca rejeneratif frenleme (enerji tasarruflu frenleme) özelliğine sahiptir. Araç yaklaşık 7 saat içinde şarj edilebilmektedir, ancak bu süre hızlı şarj ile 1 saate düşürülebilmektedir (Eğin, 2019).

Fluence Z.E.'nin 2010 yılında yalnızca Oyak Renault Bursa Fabrikasında üretimine başlanmıştır. Araç, 22 kWh Li-ion batarya, 185 km'lik menzil ve 135 km/saat'e kadar hız sağlayan 70 kW elektrik motoru kullanmaktadır. Evdeki bir priz kullanılarak 10-12 saatte şarj edilebilir, ancak daha hızlı şarj süreleri için hızlı şarj istasyonlarıyla da uyumludur. Ancak, Fluence Z.E.'nin Türkiye ve Avrupa'daki düşük satışları nedeniyle üretimi 2013 yılında durdurulmuştur (Eğin, 2019).

2013 yılının başında, Derindere Motor Taşıtlar (DMA), Türkiye'deki elektrikli taşıtlar için onay sertifikasına sahip ilk Türk aracı olan elektrikli aracı DMA All Electric'i piyasaya sürdü ve ilk test sürüşlerini yaptı. Aracın, 220 V'de 8 saatte şarj edilebilmesi, Avrupa Standart tip 2 şarj istasyonlarıyla uyumlu olması ve bir şarjla yaklaşık 280 km yol alması planlanmaktadır. Araç, 40 kWh Li-ion bataryaya ve 62 kW elektrik motoruna (225-325 Nm tork ile) sahiptir ve 3 yıl 100 000 km garantilidir (Eğin, 2019).

2013'ün ortalarında Malkoçlar Otomotiv, Türkiye'de yapılan tüm Ar-Ge ve imalat ile (elektrik motoru hariç) 100 km yol alabilen elektrikli araç geliştirdi. Araç, biri 2 koltuklu diğeri 4 koltuklu olmak üzere 2 versiyona sahiptir ve temel olarak şehir içi seyahatleri ve ticari kullanım için tasarlanmıştır. Plastik ve alüminyum konstrüksiyona

sahiptir. Yaklaşık 800 kg ağırlığında ve maksimum 150 km menzille 130 km/saat hıza sahip olabilmektedir. Normal prizden şarj işlemi yaklaşık 6-7 saat, hızlı şarj seçeneği ile 45 dakika sürmektedir (Eğin, 2019).

2014 yılında kurulan GEN Otomobil tarafından tasarlanan, prototip üretimi devam eden ve Türkiye'de üretilen elektrikli otomobil TM-480 İstanbul Lütfi Kırdar Kongre Salonu'nda gerçekleşen 3'üncü Ar-Ge ve İnovasyon Zirvesi'nde 17-18 Ekim 2018 tarihinde sergilendi. Motor gücü 80 kW, maksimum hız 160 km/saat, tek oranlı redüktör ile 1 ileri ve 1 geri vites, menzil 400 km ve şarj süresi şehir şebekesi ile 8 saat, hızlı şarj ile 1 saat gibi özelliklere sahiptir (Eğin, 2019).

2.6. Lityum İyon Pil Modelleme Yaklaşımları

2.6.1. Multi-Scale Multi-Domain Modeli

Lityum-iyon bataryalarda ısının, elektrokimyasal tepkimeler nedeniyle düzensiz ve homojen dağılım göstermeyecek şekilde açığa çıkması analizi zorlaştırabilir (Kumar ve diğerleri, 2024). Multi-scale multi-domain (MSMD) modeli, bataryanın akış, termal ve elektrokimyasal davranışını göz önünde bulundurur (Kumar ve diğerleri, 2024). Üç ana MSMD alt modeli yaygın kullanılır: NTGK (Newman, Tiedemann, Gu ve Kim) modeli, eşdeğer devre modeli (ing. Equivalent Circuit Model-ECM), Newman Pseudo iki boyutlu (ing. Newman Pseudo Two-dimensional -P2D) modeli (Kumar ve diğerleri, 2024).

2.6.1.1. Newman Tiedemann Gu ve Kim (NTGK) Modeli

Elektrik ve termal alanlarla ilgili deneysel parametreler U ve Y'nin bağlı olarak ifade edilen NTGK modeli yarı ampirik modeldir (Zhang ve diğerleri, 2023). Deneysel verilere dayanan U ve Y polinomlarının eğri uydurma yöntemi ile lityum-iyon bataryanın termal davranışı iyi bir doğruluk oranıyla tahmin edilebilir (Zhang ve diğerleri, 2023). NTGK modeli, deneylerden elde edilen voltaj ve empedans verilerinden altıncı mertebeye kadar uydurulabilen polinom eğrisini kullanarak devamlı

olarak sıcaklık ve deşarj derinliği (ing. depth of discharge-DOD) verilerini üretir (Kumar ve diğerleri, 2024). Yerel DOD, voltaj, direnç, sıcaklık ve ısı üretimi için hücre içerisinde üç boyutlu hesaplamalar yapılır. Bu da bataryanın her bir noktasında voltaj ve DOD ile bağlantılı sıcaklık alanı tanımını meydana getirir. NTGK modeli çözüm denklemleri, voltaj ve akım yoğunluğu arasındaki ampirik ilişkiyi ve bataryanın ısı üretim süreci düşünüldüğünde enerji korunum denklemini içerir. (Kumar ve diğerleri, 2024).

Bataryanın elektriksel ve termal alanını çözmek için çalışma alanı aşağıdaki denklemleri kullanır (Kumar ve diğerleri, 2024):

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - \nabla(k\Delta T) = \sigma_{pos}\left|\nabla\phi_{pos}\right|^2 + \sigma_{neg}\left|\nabla\phi_{neg}\right|^2 + \dot{q}_{Ec} \ + \dot{q}_{short} \qquad (2.4)$$

$$\nabla\left(\sigma_{pos}\nabla\phi_{pos}\right) = -(j_{Ech} - j_{short}) \qquad (2.5)$$

$$\nabla\left(\sigma_{neg}\nabla\phi_{neg}\right) = (j_{Ec} \ - j_{short}) \qquad (2.6)$$

burada faz potansiyeli ϕ, elektrotlardaki efektif elektrik iletimi σ, elektrokimyasal reaksiyonlardan üretilen ısı $\dot{q}_{Ech}$, batarya kısa devrelerden kaynaklanan ısı $\dot{q}_{short}$, transfer edilen hacimsel akım miktarı j_{Ec} , batarya içerisindeki kısa devrelerden transfer edilen akım miktarı j_{short} olarak ifade edilmiştir (Kumar ve diğerleri, 2024). Alt indisler, pos ve neg sırasıyla pozitif elektrot ve negatif elektrot içindir (Kumar ve diğerleri, 2024).

Potansiyel alan ve transfer edilen hacimsel akım miktarı arasındaki ilişki (Kumar ve diğerleri, 2024);

$$j = \frac{C_N}{C_{ref}Vol} Y\left[U - \left(\phi_{pos} - \phi_{neg}\right)\right] \qquad (2.7)$$

burada aktif bölgenin hacmi Vol, U ve Y fonksiyonlarından elde edilen batarya kapasitesi C_{ref} ile belirtilmiştir (Kumar ve diğerleri, 2024).

Deşarj derinliği (DOD), belirli bir deşarj zaman aralığında bataryanın kalan kapasitesini Amper saat (Ah) cinsinden gösterir (Kumar ve diğerleri, 2024).

$$DOD = \frac{Vol}{3600 Q_{nominal}} \int_0^t j dt \tag{2.8}$$

U ve Y parametreleri;

$$U = \{\sum_{n=0}^{5} a_n (DOD)^n\} - C_2\left(T - T_{ref}\right) \tag{2.9}$$

$$Y = \{\sum_{n=0}^{5} b_n (DOD)^n\} exp\left(-C_1\left\{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right\}\right) \tag{2.10}$$

T_{ref} referans sıcaklığı, C_1 ve C_2 batarya için verilen sabitlerdir (Kumar ve diğerleri, 2024).

Elektrokimyasal reaksiyonlardan üretilen ısı miktarı (Kumar ve diğerleri, 2024);

$$q_{Ech} = j\left[U - \left(\phi_{pos} - \phi_{neg}\right) - T\frac{dU}{dT}\right] \tag{2.11}$$

2.6.1.2. Eşdeğer Devre Modeli (ECM)

Bataryaya akım verildiğinde, ohmik dirençten kaynaklanan ani voltaj düşüşü devamında kütle transferine gösterilen direnç ve çift tabaka etkileri nedeniyle ek voltaj düşüşleri meydana gelir. ECM, bu elektriksel durumun dirençler ve kapasitörler kullanılarak eş zamanlı olarak ifade edilebildiği yaklaşım tabanlıdır (Cho ve diğerleri, 2023). Elektriksel karakteristiklerin basit bir simülasyonunu yapabilen eşdeğer devre modeli (ECM), Thevenin Teoremi temellidir ve voltaj, direnç ve kapasitör elemanlarını içerir (Cho ve diğerleri, 2023). Kapasitör sayısı arttıkça modelin doğruluğu artar. Fakat hesaplama yükü artar. Ters durumda, kapasitör sayısı azaldıkça hesaplama yükü azalır ancak doğruluk da azalır (Cho ve diğerleri, 2023). Cho ve diğerleri (2023) çalışmalarında ikinci mertebeden ECM elektriksel modelini seçmişler ve hazırladıkları makalede model denklemlerine yer vermişlerdir:

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_1 + \frac{1}{C_1} I \tag{2.12}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 C_2} V_2 + \frac{1}{C_2} I \tag{2.13}$$

$$V_t = OCV - V_1 - V_2 - IR_0 \tag{2.14}$$

burada terminal voltaj OCV, ohmik direnç R_0, R_1 ve R_2 dirençler, C_1 ve C_2 her iki kapasitöre ait kapasitans değerleridir. Bu parametreler, kapasitörün dinamik karakteristiğini ifade etmektedir (Cho ve diğerleri, 2023). Kütle transferi, çift tabaka etkileri ve kinetik reaksiyonlar kaynaklı potansiyel farklar V_1 ve V_2 olarak ifade edilmektedir (Cho ve diğerleri, 2023).

Şarj durumu (SOC) (Cho ve diğerleri, 2023);

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{1}{3600C_b} I \tag{2.15}$$

burada C_b birimi Ah olan nominal kapasitedir. Deşarj boyunca I, pozitiftir (Cho ve diğerleri, 2023). SOC'e bağlı diğer parametreler deneyler sonucunda elde edilir (Cho ve diğerleri, 2023);

$$R_1 = k_1 exp(k_2 \times SOC) + k_3 \tag{2.16}$$

$$C_1 = k_4 exp(k_5 \times SOC) + k_6 \tag{2.17}$$

$$R_2 = k_7 exp(k_8 \times SOC) + k_9 \tag{2.18}$$

$$C_2 = k_{10} exp(k_{11} \times SOC) + k_{12} \tag{2.19}$$

Parametrelerin hesaplanmasında hücre sıcaklığının etkisi göz önüne alındığında (Cho ve diğerleri, 2023):

$$R_1 = (k_1 exp(k_2 \times SOC) + k_3) \times exp\left(\frac{z_1}{T_{cell} - z_2}\right) \tag{2.20}$$

$$C_1 = k_4 \exp(k_5 \times SOC) + k_6 + (z_3 + z_4 \times SOC + z_5 \times SOC^2) \times T_{cell} \tag{2.21}$$

$$R_2 = (k_7 exp(k_8 \times SOC) + k_9) \times exp\left(\frac{z_6}{T_{cell}}\right) \tag{2.22}$$

$$C_2 = k_{10} \exp(k_{11} \times SOC) + k_{12} + (z_7 + z_8 \times SOC + z_9 \times SOC^2) \times T_{cell} \quad (2.23)$$

Enerji dengesi (Cho ve ark., 2023);

$$mc_P \frac{dT_c}{dt} = I(OCV - V_t) - IT_c \frac{dOCV}{dt} - Q_{amb} + Q_{stack} \quad (2.24)$$

burada kütle m, hücrenin özgül ısısı c_P, ortam sıcaklığı Q_{amb}, basınç sebebiyle ek ısı üretimi Q_{stack} ile gösterilmektedir (Cho ve diğerleri, 2023). I ve V_t deneysel verilerden elde edilir. OCV ve $\frac{dOCV}{dt}$ ise regresyon analizi ile elde edilen fonksiyonlardır (Cho ve diğerleri, 2023).

2.6.1.3. Newman Pseudo İki Boyutlu (P2D) Modeli

Lityum-iyon batarya, iki elektrot ve bir ayrıştırıcı olarak üç bölgeye ayrılır. Negatif elektrot, grafitte depolanan lityum elementini içerir. Pozitif elektrot genellikle lityum iyonlarını çekebilen metal oksitten meydana gelir. İki elektrot bölgesi birbirinden, yalıtkan görevi gören ve sıvı veya jel halindeki elektrolitin taşıyıcı kanallarından lityum iyonlarının taşınmasını sağlayan gözenekli ayrıştırıcı ile ayrılır. Şarj sırasında, dış elektrik alanının etkisi altında lityum iyonları pozitif elektrottaki aktif materyalden ayrışır ve polimer ayrıştırıcıdan geçtikten sonra negatif elektrottaki grafit parçacıklarına girer. Deşarj esnasında, negatif elektrotta yer alan lityum iyonlar pozitif elektroda geçiş yapar. Bataryanın farklı bölgelerinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal süreçler Newman'ın Pseudo İki Boyutlu (P2D) modelinin konusudur (Liu ve diğerleri, 2020). P2D modeli, elektrodu lityum iyon depolayan çoklu parçacıklar olarak göz önünde bulundurur ve iki ölçekte gerçekleşmesi sebebiyle her bir parçacığın yarıçapını baz alarak lityum-iyon konsantresindeki değişimi hesaplar (Cho ve diğerleri, 2023). Aktif materyal parçacıkları ve elektrotlar arasındaki lityum-iyon geçişi sırasıyla nanometre (nm) ve mikrometre (μm) boyutlarında meydana gelirken ısı geçişi ise batarya seviyesinde (1D, 2D, 3D) veya milimetre (mm) ölçeğinde gerçekleşir (Tahir ve Merten, 2022).

Batarya termodinamiği:

Lityum demir fosfat bataryanın deşarj sırasında negatif elektrotta lityum iyonunun indirgenme-redüklenme denklemi (Tahir ve Merten, 2022):

$$LiC_6 \leftrightarrow C_6 + Li^+ + e^- \tag{2.25}$$

Pozitif elektrotta lityum iyonunun redüklenme-indirgenme denklemi (Tahir ve Merten, 2022);

$$FePO_4 + Li^+ + e^- \leftrightarrow LiFePO_4 \tag{2.26}$$

Elektrotun yarı-hücre potansiyelini Gibbs-Helmholtz denklemi kullanılarak bulmak için elektrotun entalpi ve entropisi kullanılabilir (Tahir ve Merten, 2022):

$$\Delta\emptyset_{eq}(c_{Li}) = -\frac{\Delta G}{zF} = -\frac{\Delta H(c_{Li}) - T\cdot\Delta S(c_{Li})}{zF} \tag{2.27}$$

burada c_{Li} batarya hücresindeki lityum konsantresidir (Tahir ve Merten, 2022).

Kinetik:

Nano ölçekte, aktif materyalin içinde ve dışında lityum iyonlarının transferi boyunca, elektron transfer reaksiyonu parçacık yüzeyinde gerçekleşir ve bu reaksiyon Butler-Volmer denklemi ile aktivasyon fazla potansiyelinin fonksiyonu olarak gösterilir (Tahir ve Merten, 2022):

$$i_F^V = i_0 \cdot \left[exp\left\{\frac{\alpha zF}{RT}\eta_{act}\right\} - exp\left\{\frac{(1-\alpha)zF}{RT}\eta_{act}\right\}\right] \tag{2.28}$$

$$i_0 = i_{00} \cdot exp\left[\frac{E_{act}}{RT}\right] \cdot \left(c_{elyt}(Li^+)\right)^a \cdot \left(c_{surf}(Li)\right)^b \cdot \left(1 - c_{surf}(Li)\right)^c \tag{2.29}$$

burada $a = 0{,}5,\ b = 0{,}1,\ c = 0{,}1$ olup a, b, ve c deneysel verilerin uydurulmasıyla elde edilen sabitlerdir (Tahir ve Merten, 2022). Katı ve sıvı fazdaki lityum konsantresindeki değişimin etkileri değişen akım yoğunluğunun (i_0) ifadesi olan Butler-Volmer denklemi ile tanımlanır (Tahir ve Merten, 2022). i_0, parçacık yüzeyindeki ve

elektrolit arayüzündeki lityum konsantresine bağlıdır. i_{00} sabit, $c_{elyt}(Li^+)$ elektrolitteki lityum iyonların bağıl konsantresidir (boyutsuz) (Tahir ve Merten, 2022). $c_{surf}(Li)$, aktif materyal parçacığının yüzeyindeki lityum bağıl konsantresidir (Tahir ve Merten, 2022). Parçacıktaki boşluklar $1 - c_{surf}(Li)$ terimi ile gösterilmektedir (Tahir ve Merten, 2022). E_{act}, R ve T sırasıyla aktivasyon enerjisi, gaz sabiti ve sıcaklığıdır (Tahir ve Merten, 2022). i^V, elektrot aktif materyal birim hacminden geçen akım miktarı olarak tanımlanan hacimsel akım yoğunluğudur (A.m^{-3}).

Negatif ve pozitif elektrotların tersinir reaksiyon denklemleri, küresel boyutta tek bir elektronun transfer edildiği kabul edilerek, aktivasyon fazla potansiyelinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır (Tahir ve Merten, 2022):

$$\eta_{act} = \Delta\phi - \Delta\phi_{eq}(c_{Li}) - \eta_{conc} \tag{2.30}$$

$$\Delta\phi = E_{eld} - \phi_{ele} \tag{2.31}$$

Elektrolitte elektron transferinden kaynaklanan fazla potansiyel konsantresi (Tahir ve Merten, 2022);

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{c_0}{c(t)}\right) \tag{2.32}$$

Elektrokimyasal modelde katı-elektrolit arayüzü (ing. solid-electrolyte-interface SEI) ya da çift tabaka oluşumu şu şekilde ifade edilir (Tahir ve Merten, 2022);

$$i_{DL}^V(t) = A_{DL}^V C_{DL}(\Delta\phi) \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial t} \tag{2.33}$$

Elektrot toplam alanı için akım (Tahir ve Merten, 2022);

$$i = \int_{y=0}^{L_{eld}} (i_F^V + i_{DL}^V) \tag{2.34}$$

Hücre potansiyeli, iki elektrot arasındaki potansiyellerin farkı olarak (Tahir ve Merten, 2022);

$$E = \emptyset_{ca} - \emptyset_{an} \tag{2.35}$$

burada alt indisler ca ve an, katot (pozitif elektrot) ve anottur (negatif elektrot).
Elektrolit içerisindeki elektron transferi denklemleri:
Nernst-Planck denklemi;

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_i)}{\partial t} = \nabla[D_i \nabla\rho_i] + \nabla\left[D_i^{mig} \nabla\phi\right] + M_i R_{i,gen} \tag{2.36}$$

burada transfer katsayısı D_i^{mig} (Tahir ve Merten, 2022);

$$D_i^{mig} = \frac{z_i F}{RT} D_i \rho_i \tag{2.37}$$

Yük korunumu şu şekilde tanımlanır (Tahir ve Merten, 2022);

$$\nabla[\sigma \nabla\phi] = b \tag{2.38}$$

burada σ, elektrolit iletkenliği olup (Tahir ve Merten, 2022);

$$\sigma = \sum_i \left(\frac{z_i^2 F^2}{RT} \frac{D_i \rho_i}{M_i}\right) \tag{2.39}$$

$$b = -\sum_i \left(\nabla\left(\frac{z_i D_i F}{M_i} \nabla\rho_i\right)\right) - \sum_i z_i F R_{i,gen} \tag{2.40}$$

Konsantreli Çözelti Teorisi'ne (ing. concentrated solution theory-CST) dayanan konsantre ve sıcaklığa bağlı difüzyon katsayılarını veren denklemler (Tahir ve Merten, 2022);

$$D_{\pm}^{eff} = \varepsilon_{elyt}^{\beta_{\pm}} D_{elyt} + \frac{t_{\pm}}{z_{\pm}F} . \frac{\sigma_D^{eff}}{c_{\pm}} \quad (2.41)$$

$$D_{\pm}^{eff,mig} = + \frac{t_{\pm}}{z_{\pm}F} . \sigma^{eff} \quad (2.42)$$

$$\ln[D(c,t)] = D_i(T) + D_{i+1}(T).c \quad (2.43)$$

$$D_i(T) = D_{i0} + \frac{D_{i1}}{T-(T_{g0}-T_{g1}.c)} \quad (2.44)$$

$$\sigma_D^{eff} = \frac{2R}{F} \sigma^{eff} (t_+ - 1) \left[1 + \frac{d \ln \gamma_{\pm}}{d \ln c_{elyt}}\right] \quad (2.45)$$

$$D_i^{eff} = \varepsilon^{\beta_k} . D_i \quad ve \quad \sigma^{eff} = \varepsilon^{\beta_k} . \sigma \quad (2.46)$$

$$\sqrt{\sigma(c,t)} = \alpha c \sum_{i=0}^{2} \quad \sum_{j=0}^{2} \sigma_{ij} c^i T^j \quad (2.47)$$

$$\ln(\gamma_{\pm}) = \frac{1}{1-t_+} \sum_{j=1}^{3} {}_j^2 - a_{j0}\left[1 + a_{j1}(T - 293)\right] c^{j/2} \quad (2.48)$$

Batarya hücresinde açığa çıkan toplam ısı:

$\dot{Q}_{rev}$, $\dot{Q}_{pol}$ ve $(\dot{Q}_{res} + \dot{Q}_{ohm})$ olarak aşağıdaki denklemde verilen sırasıyla termodinamik, kinetik ve Joule ısılar lityum iyon bataryalarda ısı üretimine katkıda bulunmaktadır (Tahir ve Merten, 2022).

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{pol} + \dot{Q}_{res} + \dot{Q}_{ohm} \quad (2.49)$$

Tersinir ısı $\dot{Q}_{rev}$, elektrot aktif materyalinin dolaşımdaki lityum miktarına bağlı olan entropi değişimi ile ilgilidir (Tahir ve Merten, 2022):

$$\dot{Q}_{rev} = \frac{i^V}{zF} \left[\sum_e \quad - \left(T . \Delta S_{an\ veya\ ca}\right)\right] \quad (2.50)$$

Polarizasyon kaynaklı ısı (Tahir ve Merten, 2022);

$$\dot{Q}_{pol} = i^V\left[\sum_e\left(\eta_{act,an\ veya\ ca} + \eta_{conc,an\ veya\ ca}\right)\right] \tag{2.51}$$

Ohmik direnç kaynaklı ısı (Tahir ve Merten, 2022);

$$\dot{Q}_{ohm} = i^V\left[\sum_l \eta_{ohm,l}\right] \tag{2.52}$$

burada $l = [ac; cc]$ ve ohmik polarizasyon η_{ohm} olmak üzere,
Elektrolit direnci kaynaklı ısı (Tahir ve Merten, 2022);

$$\dot{Q}_{res} = i^V\left[\sum_h \eta_{res,h}\right] \tag{2.53}$$

burada $h = [an; ca; elyt]$ ve elektrolit direnç polarizasyonu $\eta_{res} = R_{ele}.i$
Enerji korunum denklemi (Tahir ve Merten, 2022):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_{gen} + \nabla(k\nabla T) \tag{2.54}$$

2.7. Elektrikli Araçlarda Yangın

Yangın, kontrolsüz bir yanma olayıdır. Yangının gerçekleşmesi için ortamda sıcaklık, ısı ve yanıcı maddenin bulunması gerekir. Isı, herhangi bir maddenin oluşmasında temel yapı taşlarından olan moleküllerin sahip olduğu tüm potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamıdır. Isı ve oksijenin yanıcı maddelerle bir araya gelmesi durumunda ortaya çıkan kimyasal olaya yanma denir. Yanma, oksitlenmiş bir ürün oluşturmak için herhangi bir yanıcı malzeme ile bir oksitleyici arasındaki bir reaksiyonu içerir. Genellikle bir hidrokarbon, karbondioksit ve su üretmek için oksijenle reaksiyona girdiğinde ortaya çıkar. Yanma olayı; yangın üçgeninde belirtildiği gibi; üç bileşenin ısı, yanıcı madde ve oksijenin bir araya gelmesiyle oluşan, dışarıya ısı veren (ekzotermik) bir reaksiyondur (Coşgun, 2022).

Lityum-iyon bataryalar şarj ve deşarj esnasında üç tip ısı açığa çıkarmaktadır: elektrokimyasal reaksiyon polarizasyon kaynaklı aktivasyon tersinmez ısı, ohmik kayıplardan dolayı joule ısısı ve şarj-deşarj esnasındaki entropi değişiminden kaynaklı tersinir reaksiyon ısısı (Kim ve diğerleri, 2019).

Aşırı şarj, bataryayı dışarıdan ısıtma ve mekanik etkenler batarya arıza olasılığını önemli ölçüde arttırabilir. Batarya yangınlarının kök nedenleri arasında aşırı ısınma, kısa devre, aşırı şarj, bataryanın ısınması ya da mekanik hasar veya kaza verilebilir (Wang ve diğerleri, 2019). Lityum iyon batarya hücrelerinin birbirine yakın yerleştirilmiş elektrotlardan oluşması kısa devre olasılığını arttırır. Ayrıca hücrelerin yanıcı bir sıvı elektrolitle dolu olması, ısınan elektrolitin kaynaması ve hücre dışına sızması yangın riskini arttıran diğer bir ana faktördür (Karamangil ve diğerleri, 2023).

Bataryaya alınan hasar, zaman içerisinde ya da üretim hatasından kaynaklı kısa devre veya aşırı şarj gibi nedenlerle batarya ayıracı bozulabilir. Bu durumda elektrolit anot ile reaksiyona girer. Ekzotermik reaksiyon nedeniyle bataryadaki mevcut enerji ile hızla ısınan dahili hücreler, yaklaşık 180°C'de anot, elektrolit ve katottun yapısal olarak bozulmasına neden olur. Bu bozulma yanıcı ve toksik gazları ortaya çıkarır ve yeterli basınca ulaşıldığında, bataryadaki güvenlik ventlerinden, yanıcı gaz ve tutuşturulabilir elektrolit buharı ortama salınır (TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2024).

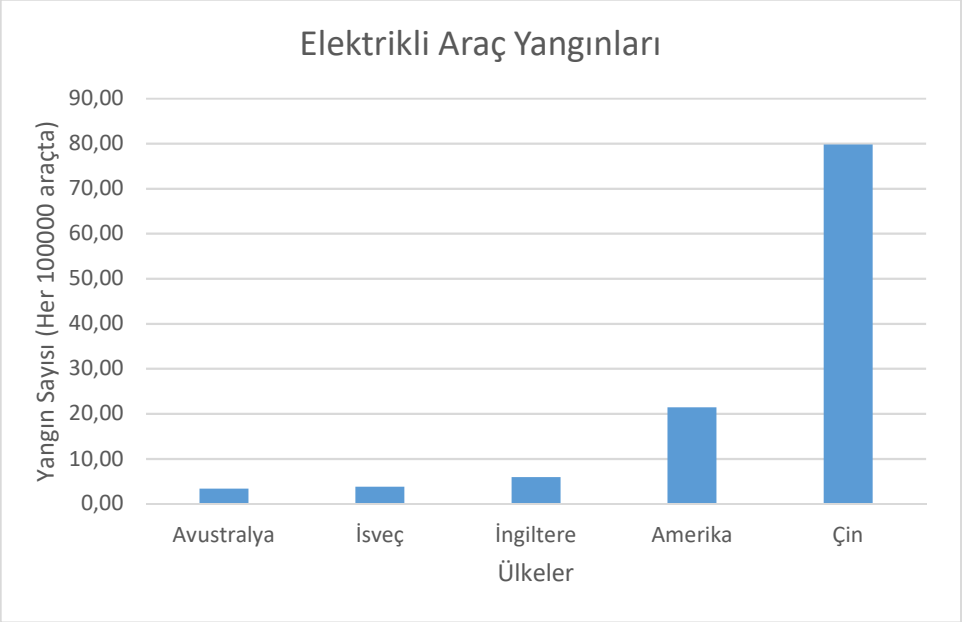
NFPA 10-2018 standardına göre elektrikli araç yangınları, kaynaklanan sebepler bakımından dört kategoride toplanmıştır (Sun ve diğerleri, 2020):

1. Elektrikli araçtaki yanıcı katı malzemeler, örn. araç koltuklarını oluşturan köpükler, plastik iç trim elemanları.

2. Termal kaçak ve beraberinde bataryadan çıkan yanıcı gazlar, soğutucu sıvı, fren sıvısı, hibrit elektrikli araçlarda depolanan sıvı yakıt.

3. Elektrikli cihazlar ve batarya yönetim sistemi.
4. Lityum-iyon bataryadan açığa çıkan lityum metal parçacıkları (Sun ve diğerleri, 2020).

Bazı ülkelerde kayda geçen her 100 000 adet elektrikli araç için her yıl meydana gelen ortalama yangın oranları Şekil 2.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Dünya'da elektrikli araç yangınlarının ülkelere göre dağılımı.

Şekil 2.9'a göre Çin'de kayıtlı her 100 000 adet elektrikli araç başına yıllık ortalama 79,77 adet yangın meydana gelmektedir ve diğer ülkelere kıyasla en büyük payın Çin'e ait olduğu görülebilir. Çin'i sırasıyla 21,42 ile Amerika, 5,9 ile İngiltere, 3,8 ile İsveç ve 3,33 ile Avustralya izlemektedir. Çin'de yapılan araştırmaya göre, elektrikli araç yangınlarının %62,1'i elektriksel hata kaynaklı iken %23,5'i aşırı şarj uygulaması, tek bataryada meydana gelen hata ve kısa devre kaynaklıdır. NTSB (National Transportation Safety Board) (2020)'ye göre Amerika'daki elektrikli araç yangınlarının büyük bir kısmı şarj ve batarya modülünden kaynakladığı, elektrikli araç yangın riskinin içten yanmalı motorlu araçlara göre 9 kat fazla olduğu tespit edilmiştir.

2.7.1. Batarya Hataları

Elektrikli araçlarda çok sayıda lityum iyon hücresinin bulunduğu göz önüne alındığında, oluşabilecek yıkımın büyüklüğü güvenlik konusundaki endişeleri arttırmaktadır. Bu nedenle lityum iyon bataryaların hata mekanizmaları iyi incelenip, üretilecek lityum

iyon bataryaların hücreden başlayıp batarya paketine kadar bu hata mekanizmaları göz önüne alınarak tasarım süreçleri tamamlanmalıdır (Yılmaz, 2023). Lityum iyon batarya hataları mekanik, elektrik ve termal hasar olmak üzere üç grupta toplanır. Mekanik hasar genellikle çarpışmalardan, ekstrüzyon ya da deformasyondan kaynaklanır. Elektriksel hasar normal şarj deşarj döngüleri sırasında iç kimyasal dengesizliklerden, malzeme bozulmasından veya yapısal hasardan kaynaklanır ve performans düşüşüne ya da batarya arızasına yol açar. Termal hasar, pilin aşırı ısınması veya tasarlanan sıcaklık aralığının dışında çalışması nedeniyle oluşur. Öte yandan iç kısa devre oluşumu da batarya hatası olarak tanımlanabilir. İç kısa devre durumu separatörün işlevselliğini kaybetmesi sonucunda anot ve katodun birbiri ile temas etmesi sonucunda oluşmaktadır. İç kısa devre, bir kere tetiklendikten sonra hücre içerisinde depolanmış elektrokimyasal enerji kendiliğinden salınıp hücrenin termal kaçak durumuna geçmesine neden olmaktadır. Elektriksel, mekaniksel ve termal kötüye kullanım sonucunda tetiklenebilen iç kısa devre, üretim hatası sonucu hücre içerisinde kalan kontaminasyondan da kaynaklanabilmektedir (Yılmaz, 2023). Lityum iyon bataryaların hatalarını önlemek için, bataryayı aşırı sıcaklıklara, mekanik gerilimlere ve uygunsuz şarj ve deşarj ortamlarına maruz bırakmaktan kaçınmak, pilin ömrünü uzatmak ve performansını sürdürmek için güvenli aralıklarda çalışmasını sağlamak çok önemlidir (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.7.1.1. Mekanik Kaynaklı Yanlış Kullanım

Çarpışma, ezilme ve penetrasyon gibi farklı yöntemlerle batarya hücrelerinin mekanik olarak deforme olması sonucunda iç kısa devre tetiklenmekte ve termal kaçak durumu başlamaktadır (Yılmaz, 2023). Elektrikli araç kazalarından kaynaklanan penetrasyon, batarya modül tasarımının dayanıksız oluşu ve titreşim lityum iyon bataryaların mekanik kaynaklı yanlış kullanımına neden olmaktadır. Yaygın mekanik durumlar arasında mekanik hasar, elektrot delaminasyonu, elektrolit sızıntısı, plaka deformasyonu ve batarya paketinin yırtılması bulunur. Çarpışmalar, ekstrüzyon veya bozulma lityum iyon bataryalarda mekanik hasara kolayca yol açabilir ve bu da mekanik arızalarına katkıda bulunan birincil faktördür. Bu tarz bir arıza, batarya kabuğunun ya da iç yapısının bozulmasına, dolayısıyla elektrolit sızıntısına sebep olabilir. Kabuk

kırıldığında seperatör de bozulur, dolayısıyla iç kısa devreye ve termal kaçağa neden olabilir. Elektrot delaminasyonu da elektrot malzemesi ile akım toplayıcısı arasındaki seperatörün zayıflayarak elektrot performansının düşmesine ve batarya ömrünün azalmasına sebep olan mekanik hasarın bir diğer yaygın formudur (Zhao ve diğerleri, 2024). Batarya paketlerinin güvenliği için pillerin deformasyona karşı gösterdikleri tepkilerin ölçümüne ve pillerin akreditasyonlarına yönelik belirli standartlar bulunmaktadır. SAE J2463 standardında belirtildiği şekilde piller ve batarya paketleri sivri uçlu bir cisimle deforme edilerek termal kaçak durumunun tetiklenmesi sağlanır. Bu test sivri uç penetrasyon testi (nail penetration) test olarak bilinir ve lityum iyon bataryalarda mekanik kaynaklı yanlış kullanımı simüle eder (Yılmaz, 2023).

2.7.1.2. Elektrik Kaynaklı Yanlış Kullanım

Lityum iyon bataryalarda termal kaçak durumuna neden olabilecek elektriksel yanlış kullanım, harici kısa devre (external short circuit), aşırı şarj ve deşarj gibi üç farklı durumu içermektedir. Harici kısa devre, farklı voltaj değerlerine sahip pozitif ve negatif uçlarının birbirine düşük dirençli iletken üzerinden bağlanması nedeniyle sistemde yüksek akım oluşarak hücrenin yüksek yoğunluklarda deşarj olmasını ile oluşmaktadır. Bu yüksek akım sistem içerisinde hızlı bir şekilde yüksek ısı enerjisi oluşmasına ve dolayısıyla bataryanın sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Lityum iyon batarya sıcaklığının, separatörün termal boyutsal stabilitesinin bozulacağı derecelere çıkması sonucunda separatör işlevselliğini kaybederek anot ve katottun birbiri ile temasını engellemede yetersiz kalmaktadır. Bunun sonucunda iç kısa devre oluşmakta ve birbirini takip eden termal reaksiyonlar, termal kaçağı meydana getirerek bataryada yangın ve patlamalara neden olmaktadır. Harici kısa devre durumu elektrikli araçlarda, çarpışma sonucu batarya paketinin deformasyona uğraması, batarya paketinin içine su girmesi ve iletken uçlarda kontaminasyon olması durumlarında da ortaya çıkabilmektedir. Harici kısa devre durumunda voltaj farkından kaynaklı devreden yüksek akımlar geçmektedir. Bu durumu önlemek için batarya paketlerinin içinde aşırı akım sonucu devreyi kesen sigortalar, anormal sıcaklık artışını tespit edip devreyi kesen pozitif termal katsayılı (PTC) cihazlar ve manyetik anahtarlar kullanılmaktadır (Yılmaz, 2023).

Aşırı şarj arızası, lityum iyon bataryaların hücrede var olan tüm bileşenlerin güvenli çalışma aralığı olan voltaj değerlerinin dışında şarj edilmesi ile oluşur. Şarj limitini katot malzemesi ve elektrolit belirler. Yaygın olarak kullanılan 1 M LiPF6 EC-DMC içeren elektrolitin güvenli çalışma voltaj aralığı 2,5-4,2V arasıdır. 4,2V üzerinde hücre şarj edildiğinde termal kaçak oluşum riski bulunmaktadır. Kullanılan katot malzemeleri gözönüne alındığı ise yaygın kullanılan $LiFePO_4$ için aralık 3,2-3,65V, $LiNiO_2$ için 2,6-4,2V, $LiCoO_2$ için 3,0-4,2V ve NCA için 3,0-4,2V dir. Aşırı şarj arıza durumunda batarya içerisinde fazladan elektrik enerjisi oluşur ve en kritik arıza durumlarından biri oluşur. Aşırıcı deşarj oluşum voltaj değeri 2,5V altıdır. Aşırı deşarj voltaj değeri olan 2,5V altında anottaki bakır kolektör çözünmeye başlar. Elektrolit içerisinde çözünen bakır iyonları separatörden geçerek katotta birikir. Bakır iyonlarının geçişi sırasındaki separatöre penetrasyonu sonucunda separatör işlevini yerine getiremeyerek katot ve anot birbirine temas eder. Bu durumda iç kısa devreye ve sonrasında termal kaçağa neden olmaktadır (Yılmaz, 2023).

Şarj ve deşarj çevrimi sırasında, elektrot malzemesinin hacimsel genişlemesi elektrot parçacıklarının yapısının bozulmasına neden olur ki bu da aktif malzemenin çökelmesini tetiklemektedir. Aktif malzemenin çökeltisi elektrotlar arasında kısa devrelere sebep olabilir ki bu da aşırı ısınmaya, yangın ve diğer güvenlik kazalarına neden olur. Voltaj farklılığına sahip elektrotlar bir iletken aracılığıyla bağlandığında, bataryanın dış kısa devresi tetiklenir. Öte yandan, eğer lityum-iyon bataryada aşırı şarj gerçekleşirse büyük oranda ısı ve gaz üretilir. Aşırı şarj sırasında, katotta lityum iyonlarının büyük miktardaki kaybı katot yapısının çökmesine ve geri dönülemez hasara neden olur (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.7.1.3. Termal Kaynaklı Yanlış Kullanım

Lityum iyon bataryalar sıcaklığa duyarlıdır ve uygun çalışma sıcaklık aralığı 20-40℃ ($\pm$5℃)'dir. Bu aralığın dışındaki sıcaklığa ulaşan bataryanın performansı azalır hatta durumu kötüleşebilir (Zhao ve diğerleri, 2024). Lityum iyon bataryalarda termal yanlış kullanım, batarya hücrelerinin fazla ısıya maruz bırakılarak termal kaçağın tetiklenmesi

ile gerçekleşir. Lityum iyon hücreleri aşırı ısıtıldığında, anot ve katot aktif malzemelerin ve katı elektrolit arayüzü ayrışmasına sebep olan bir dizi reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonlar hücre sisteminin iç ısısını daha da arttırıp separatörün küçülmesine ve işlevini yerine getiremeyerek iç kısa devrenin tetiklenmesine neden olur. Bunun sonucunda ekzotermik reaksiyonlar başlar, lityum iyon hücresi termal kaçak durumuna geçer ve termal kaçak diğer hücrelere ilerler (Yılmaz, 2023).

Termal yanlış kullanım, batarya içerisinde aşırı ısınma ve dışarıdan ısı uygulaması olarak iki şekilde kategorize edilir. Batarya içerisinde aşırı ısınma, bataryadaki elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında açığa çıkan yüksek miktardaki ısının batarya sıcaklığını oldukça arttırması olarak tanımlanabilir. Bu durum elektrolitin uçuculuğuna, elektrot malzeme yapısının hasar görmesine, seperatör ergimesine, termal kaçağa, oradan yangın ve patlamaya neden olabilir. Dışarıdan ısı uygulaması ise ortam sıcaklığının batarya çalışma sıcaklığının üzerinde olduğu durumlarda bataryanın normal bir şekilde çalışamaması olarak ifade edilebilir. Bu durum, bataryanın kapasitesinin azalmasına, termal direncin artmasına, elektrolitin buharlaşmasına ve elektrot aktif malzeme dengesizliğine neden olur. Termal arıza, termal stabilite ve elektrot malzemesinin termal diffüzivitesi, elektrolit, seperatör ve batarya iç yapı tasarımı ile yakından alakalıdır (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.8. Termal Kaçak

Termal kaçaktan kaynaklanan yangın ve patlamalara sıklıkla yol açan ciddi arızalar, önemli kamu güvenliği ve mülkiyet risklerini vurgulamaktadır. Bu riskleri anlamak ve azaltmak, pil arızalarının altında yatan elektrokimyasal, termodinamik ve mekanik davranışların kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirir. Bunun merkezinde, iç kısa devre, aşırı şarj, mekanik deformasyon ya da dış termal koşullar nedeniyle sıcaklıktaki artışla tetiklenen devam eden bir reaksiyon zinciri olan termal kaçak mekanizması yer alır (Zhao ve diğerleri, 2024).

Termal kaçak, bataryada ekzotermik reaksiyonlardan açığa çıkan ısı miktarının ortama bırakılan ısı miktarından fazla olması durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda

elektriksel veya mekanik etken sonucunda ya da dış ısı kaynağının varlığı kaynaklı istenmeyen sıcaklık artışı lityum iyon bataryada gerçekleşir. Eğer üretilen ısı çevreye bırakılan ısı miktarından fazla ise bataryanın sıcaklığı artar. Bazı kritik sıcaklıklara ulaştığında, özellikle seperatörün sıcaklığına ulaştığında, hücrenin etkinliği sona erer (Wang ve diğerleri, 2019). Lityum iyon bataryalarda ekzotermik zincir reaksiyonun başladığı kritik sıcaklık yaklaşık 70℃'dir. Bu sıcaklıktan itibaren batarya kendi kendine ısınmaya başlar (Zhao ve diğerleri, 2024). Sıcaklık arttıkça batarya hücresinde sırasıyla; katı-elektrolit ara tabakasında (solid electrolyte interphase layer-SEI) bozunma, anot ve elektrolit arasında reaksiyon, ardından katot ve elektrolit arasında reaksiyon, elektrolit bozunması, anot ve hücre kaplaması arasında reaksiyon gerçekleşir (Wang ve diğerleri, 2019). Batarya sıcaklığı yaklaşık 210℃'ye ulaştığında termal kaçak gerçekleşir. Bataryanın sıcaklığı hızlıca 800℃ ve üzerine çıkar. Bu durum diğer batarya hücrelerine de yayılan büyük ölçekli iç kısa devreyi tetikler. Bu da batarya paketinde ciddi bir termal kaçağa ve ani patlamaya neden olabilir (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.9. Batarya Hasar Testleri

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon hücrelerin yanıcı olmasından dolayı kullanıcı güvenliğini ön planda tutmak için, elektrikli araçlara ve bu araçlarda kullanılan batarya paketlerine bir dizi standart testler uygulanmaktadır. Elektrikli araçların karayollarında kullanım izinleri, bu regülasyon testlerini hem komponent hem de araç seviyesi geçmesi durumunda çıkarılabilmektedir. Aksi takdirde testlerin sonuçları pozitif olana kadar araçların üretim izni olarak tanımlanan homologasyon sertifikaları verilmemekte ve araçlar piyasaya sürülememektedirler (Yılmaz, 2023). Çin'deki Lityum-iyon Bataryalar için Genel Teknik Gereklilikleri Standart'ına (GB/T 38331-2019) göre bu testler düzenlenmektedir (Yu ve diğerleri, 2023). Titreşim, yüksekten cisim bırakma, mekanik etki, ekstrüzyon, su geçirmezlik, çivi penetrasyonu testleri mekanik hasar testleri olarak gruplandırılır. Elektriksel hasar testleri ise iç kısa devre oluşum testi, aşırı şarj ve deşarj testleri, dış kısa devre oluşum testleridir. Termal hasar testleri arasında ısıtma ve termal kaçak oluşum testi yer alır.

Çin standartlarına göre uygulanan bu testlerin yanı sıra uluslararası test standardı UN ECE-R100'e göre vibrasyon, termal şok ve çevrim, mekanik şok, mekanik bütünlük, yangın direnci, harici kısa devre koruması, aşırı şarj ve deşarj koruması, aşırı sıcaklık koruması, aşırı akım koruması ve termal kaçak ilerleme testleri bulunmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.1. Mekanik Hasar Testleri

2.9.1.1. Titreşim Testi

Titreşim testi batarya modülü, paketi ya da tüm sistem için gerçekleştirilebilir. Test alanına yerleştirilen bataryaya belirli bir zaman ve frekans aralığında titreşim uygulanır. Çizelge 2.1.'de test standartları yer almaktadır (Yu ve diğerleri, 2023).

Çizelge 2.1. Titreşim testi uygulama standartları (Yu ve diğerleri, 2023).

Standart	**Titreşim Yönü**	**Titreşim Uygulama Zamanı**	**Titreşim Miktarı**	**Titreşim Hızı**
GB/T 31486-2015	Yukarı ve aşağı yönlü bir titreşim	3 saat	10	Lineer
GB/Z 18333-2001	Yukarı ve aşağı yönlü bir titreşim	2 saat	-	-
QC/T 1023-2015	Üç yönlü	-	10	1 oct/dk
QC/T 989-2014	Yukarı ve aşağı yönlü bir titreşim	-	10	1 oct/dk
NB/T 33024-2016	Yukarı ve aşağı yönlü bir titreşim	120 $\pm$ 5 dk	10	1 oct/dk

DB11/Z 800-2011	Üç yönlü	2 saat	10	1 oct/dk

UN ECE-R100 standardına göre bu testinin amacı, elektrikli aracın vibrasyonlu ortam koşullarında lityum iyon batarya paketinin güvenlik açısından sorunsuz çalıştığını doğrulamaktır. Test prosedüründe öncelikle lityum iyon batarya paketi araca takıldığı noktalardan vibrasyon makinesine montaj edilmelidir. Montaj edilen lityum iyon batarya paketinin SOC değeri %95'ten 29 küçük olmamalı ve ortam sıcaklığı 22 ± 5 °C olmalıdır. Test prosedüründe lityum iyon batarya paketi 7 Hz ile 50 Hz arasında logaritmik tarama ile sinüzoidal dalga biçimine sahip titreşime 15 dakika boyunca tabi tutulup 1 çevrim tamamlanmalıdır. Bu çevrim 12 kez batarya paketinin montaj yönüne dik bir şekilde tekrarlanmalıdır. Test sonucunda lityum iyon batarya paketinde herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmaması gerekmektedir. Buna ek olarak, test sonunda ölçülen izolasyon dirençlerinin 100 Ω/V'tan büyük olması testi başarılı tamamlamak için gerekli kriterlerden biridir (Yılmaz, 2023).

2.9.1.2. Yüksekten Cisim Düşürme Testi

Belirli bir yükseklikten bırakılan cisim batarya hücresi ya da modülüne çarpmaktadır. Test standartları farklı düşme yüksekliklerini, testin kaç kez yinelendiğini ve bataryanın yerleştirildiği yüzey türünü esas almaktadır. Bu esaslar Çizelge 2.2.'de açıklanmaktadır. Tek bir batarya hücresi için düşürme yüksekliği 1,5 m iken batarya modülü ya da paketi için 1,2 m'dir (Yu ve diğerleri, 2023).

Çizelge 2.2. Düşürme testi standartları (Yu ve diğerleri, 2023).

Standart	**Test Objesi**	**Düşürme Miktarı**	**Yer Malzemesi**
GB/Z 18333-2001	Hücre	Her bir yön için 2 defa	Tahta yüzey

GB/T 31485-2015	Hücre	1 kez	Beton yüzey
	Modül	1 kez	Beton yüzey
DB11/Z 800-2011	Paket	Her bir yüz için 1 kez	20 mm kalınlığında tahta yüzey
DB12/T 475-2011	Hücre	Her yön için 1 kez	20 mm kalınlığında beton yüzey
QC/T 744-2006	Hücre	Her bir yüz için 1 kez	20 mm kalınlığında tahta yüzey
T/CEC 172-2018	Hücre	1 kez	Beton yüzey
	Modül	1 kez	Beton yüzey

2.9.1.3. Mekanik Etki Testi

Test yüzeyine yerleştirilen batarya sistemine yarı sinüs şok dalgası verilerek mekanik etki testi gerçekleştirilir (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.1.4. Ekstrüzyon Testi

Elektrikli araç kazalarında çarpışmanın etkisiyle batarya sisteminde ekstrüzyon meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bataryanın farklı yüklemeler neticesinde ekstrüzyon davranışını anlamak için standartlara uygun testler yapılmaktadır. Testler ekstrüzyon plakasını, hızını, uygulanan ekstrüzyon kuvvetinin yönünü, derecesini esas alarak gerçekleştirilir (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.1.5. Su Geçirmezlik Testi

Batarya paketi ve sistemi için yapılan bu testte yüksekliği 850 mm'yi geçmeyen test objesinin en düşük noktasının su yüzeyinden 1000 mm aşağıda bulunması, 850 mm'den yüksek test objesi için en yüksek noktasının su yüzeyinden 150 mm aşağıda bulunması

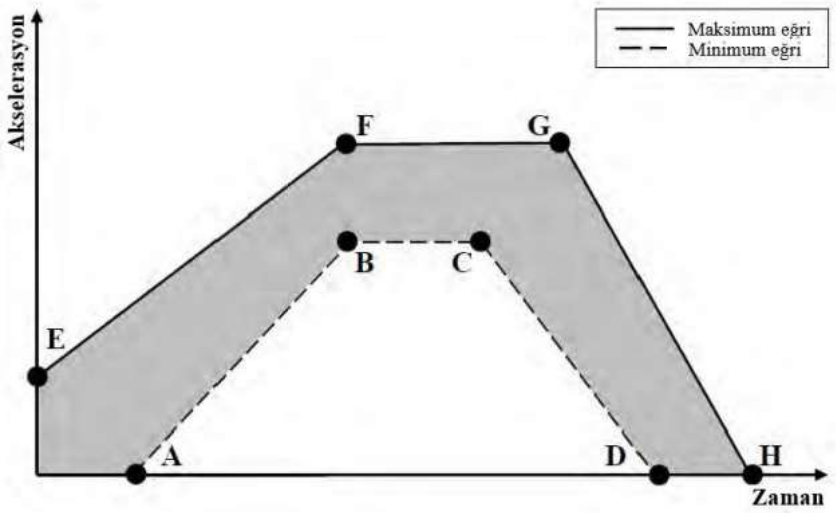
gerekmektedir. Standarda göre test süresi 30 dk olup su ile batarya arasındaki sıcaklık farkının 5℃'den daha fazla olması gerekmektedir (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.1.6. Çivi Penetrasyon Testi

Çivi penetrasyon testinde çelik iğne batarya hücresine ya da modülüne doğrudan temas ettirilir. Bu testte iğnenin malzemesi, yarıçapı, penetrasyon hızı ve bataryanın şarj durumu önemlidir (Yu ve diğerleri, 2023). İğne penetrasyon testleri, lityum iyon bataryanın iç kısa devresini belirlemek için gerçekleştirilir. Çelik iğnenin hücreye penetrasyonu sırasında iç akım devresi gelişir çünkü iğne elektrot materyalleri ile akım toplayıcılarını birbirine bağlar ve elektrotlar deformasyon nedeniyle birbirlerine temas etmektedir. Böylece Joule ısısı yüksek oranda üretilir. Isı, penetrasyon noktasından hücre boyunca transfer edilir (Wang ve diğerleri, 2019).

2.9.1.7. Mekanik Şok Testi

Mekanik şok testinin amacı, atalet yükleri altında lityum iyon batarya paketinde güvenlik açısında tehlike arz edecek bir durum oluşmadığını doğrulamaktır. Teste hazırlık sürecinde ortam sıcaklığının 20 ± 10°C olduğu, test edilecek lityum iyon batarya paketinin SOC değeri %95'ten büyük olduğu kontrol edilmeli ve batarya paketi araca bağlantı noktalarından fikstüre montajlanmalıdır. Şekil 2.10. ve Çizelge 2.3.'te maksimum ve minimum akselerasyon değerleri ve uygulanma süreleri verilmiştir. M1 kategorisi sürücü hariç en fazla 8 kişilik yolcu taşıma araçlarını temsil ederken, N1 kategorisi maksimum 3,5 ton yük taşıma kapasitesine sahip taşıma araçlarını belirtmektedir. Tabloda belirtilen g kuvveti değeri 9,8 m2 s -1 yer çekimi ivmesine denk gelmektedir. Uygulanan yüklerin ardından test edilen lityum iyon 30 batarya paketi 1 saat boyunca gözlemlenmektedir. Eğer herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmaz ise mekanik şok testinin ilk sonucu pozitif yönde sonuçlanmaktadır. Ardından izolasyon direnci ölçümü yapılır ve izolasyon direnç değeri 100Ω/V'den büyük ise test başarılı olarak raporlanmaktadır (Yılmaz, 2023).



Şekil 2.10. Mekanik şok testi akselerasyon-zaman grafiği (Yılmaz 2023).

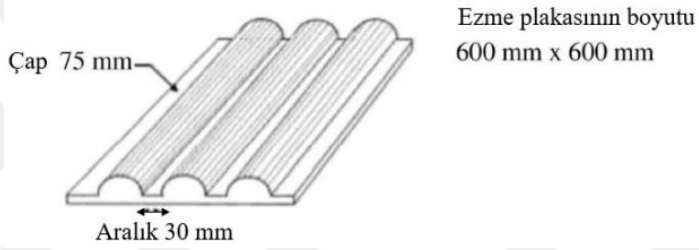
Çizelge 2.3. M1 ve N1 kategorisi araçlar için akselerasyon zaman tablosu (Yılmaz, 2023).

Nokta	**Zaman (msn)**	**Akselerasyon (g)**	
		Boyuna	**Enine**
A	20	0	0
B	50	20	8
C	65	20	8
D	100	0	0
E	0	10	4,5
F	50	28	15
G	80	28	15
H	120	0	0

2.9.1.8. Mekanik Bütünlük Testi

Mekanik bütünlük testinin amacı, lityum iyon batarya paketinin temas halindeki yüklere maruz kaldığı durumdaki davranışını gözlemlemek ve güvenlik açısından riskli bir

durum oluşturmadığını doğrulamaktır. Test edilecek lityum iyon batarya paketi araca bağlandığı şekilde test fikstürüne bağlanmaktadır. Eğer araç tarafında lityum iyon bataryayı koruyan bariyer gibi başka parçalar varsa bu parçalar da batarya paketine takılmalıdır. Test yapılan ortamın sıcaklığı 20 ± 10 °C ve lityum iyon batarya paketinin SOC değeri %95'ten büyük olmalıdır. Bu testte lityum iyon batarya paketi, bir tarafı düz sabit bir zemine temas halinde iken Şekil 2.11.'de boyutları gösterilmiş ezme plakası ile minimum 100 kN ve maksimum 105 kN yüklere maksimum 10 saniye maruz bırakılmaktadır. Test sonrasında, 1 saat bekletilen lityum iyon batarya paketinde elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, yangın, patlama olmaz ve izolasyon direnci 100Ω/V'den büyük ise test başarılı olarak tamamlanmış olmaktadır (Yılmaz, 2023).



Şekil 2.11. Ezme plakasının gösterimi ve boyutu (Yılmaz 2023).

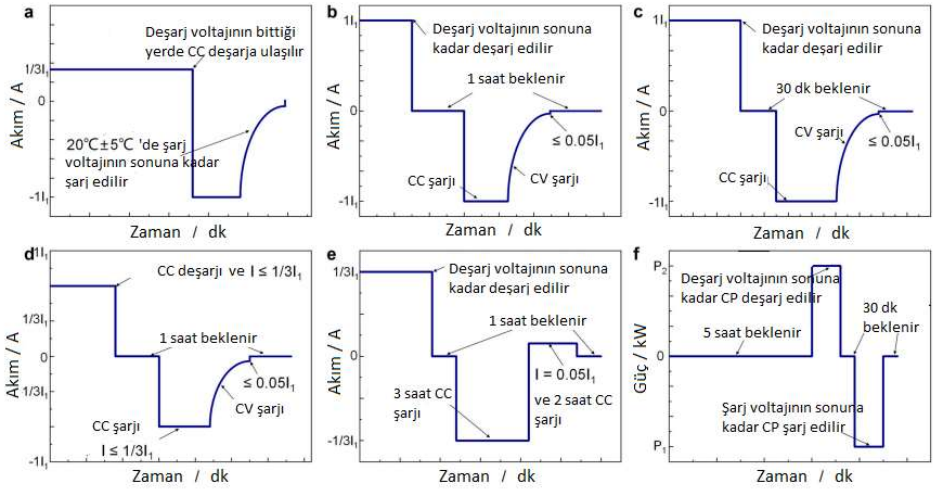
2.9.2. Elektriksel Hasar Testleri

2.9.2.1. İç Kısa Devre Oluşum Testi

Çivi penetrasyonu, aşırı şarj, aşırı deşarj, bataryanın çok yüksek ve düşük sıcaklıklara maruziyeti gibi pek çok test dolaylı olarak batarya hücresi içerisinde kısa devreyi meydana getirmektedir. Kısa devre oluşumu da termal kaçağa sebep olmaktadır. Bu testte kısa devre oluşumu, şekil hafızalı bir metal alaşımından yapılmış bir eleman sağlamaktadır. Anot veya katot malzemesinin merkezine yerleştirilen bu eleman, sıcaklık arttıkça separatöre zarar vermekte dolayısıyla anot ve katot arasında iç kısa devreye yol açmaktadır (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.2.2. Aşırı Şarj ve Aşırı Deşarj Testi

Batarya hücresinden geçirilen akım belirli bir voltaj limitine kadar arttırılır (Zhang ve diğerleri, 2018). Batarya yönetim sisteminin çalışmama durumunda aşırı şarj esnasında, lityum katottan uzaklaşırken katodun yapısı değişir, direnci artar. Böylece hücrenin sıcaklığı artar (Wang ve diğerleri, 2018). Şekil 2.12'de batarya aşırı şarj ve deşarj test uygulama prosedürü gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Batarya aşırı şarj ve deşarj test standartları (Yu ve diğerleri 2023'ten değiştirilerek alınmıştır).

2.9.2.3. Dış Kısa Devre Oluşum Testi

Bu testte bataryanın anot ve katot uçlarının birbirine bağlanmasıyla 10 dk içerisinde kısa devre meydana gelir. Dış direncin 5 mΩ'dan daha düşük olması gerekmektedir. Kısa devre testi ile ilişkili test standartları GB/T 31485-2015, DB12/T 475-2012, GB 38031-2020, QC/T 744-2006, T/CEC 172-2018'dir (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.2.4. Harici Kısa Devre Koruması Testi

Harici kısa devre koruma testinin amacı, lityum iyon batarya paketinin kısa devre akımı geçmesi durumunda güvenli bir şekilde korunduğunu teyit etmektir. Testin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı 20 ± 10°C olmalıdır. Lityum iyon batarya paketinin test öncesi SOC değeri %95'ten büyük olması gerekmektedir. Aracın aktif sürüş modunu simüle

edebilmek için test sırasında tüm ana kontaktörlerin kapalı durumunda olması gerekmektedir. Testte kısa devre oluşturmak için lityum iyon bataryanın artı ve eksi terminalleri birbirine bağlanır ve bağlantı direnci 5mΩ'dan büyük olmaması 33 gerekmektedir. Kısa devre koşulu batarya paketinin kısa devre korumasını aktif edip kısa devre akımını sonlandırana kadar devam etmektedir. Batarya paketi 1 saat boyunca gözlemlenmekte ve herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmaz ise test başarılıyla sonuçlanmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.2.5. Aşırı Şarj Koruması Testi

Bu testin amacı lityum iyon paketinin olası yüksek şarj yüzdelerine çıkması durumunda aşırı şarj koruma performansını doğrulamaktır. Teste başlamadan önce ortam sıcaklığı 20 ± 10°C olmalı ve batarya SOC değeri %50 ila %60 arasında olmalıdır. Ardından lityum iyon batarya paketinin hızlı şarj konnektöründen şarj kablosu bağlanmalı ve batarya paketinin alabileceği maksimum şarj akım değerinde şarj işlemine başlanmalıdır. Batarya yönetim sisteminde yer alan aşırı şarj koruma fonksiyonu aktif olup şarj akımını sonlandırdıktan sonra şarj işlemi sonlandırılmalıdır. Eğer aşırı şarj koruma fonksiyonu devreye girmez veya böyle bir koruma fonksiyonu batarya yönetim sistemi içerisinde yok ise batarya paketi maksimum çalışma sıcaklığından 10 °C daha fazla sıcaklığa ulaştığı an şarj işlemi kesilmelidir. Eğer aşırı şarj koruma sistemi devreye girmez ve batarya paketi sıcaklığı maksimum çalışma sıcaklığından 10 °C'den daha fazla geçmez ise şarj işlemi 12 saat boyunca devam ettirilip sonlandırılmalıdır. Şarj kesildikten sonra batarya paketi 1 saat boyunca gözlemlenmeli ve herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmazsa test sonucu başarılı olarak raporlanmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.2.6. Aşırı Deşarj Koruması Testi

Aşırı deşarj koruma testinin amacı ise lityum iyon batarya paketinin çok düşük şarj yüzdelerine düşmesi durumunda aşırı deşarj koruma fonksiyonunun performansını doğrulamaktır. Ortam sıcaklığı 20 ± 10 °C olmalı ve batarya paketinin başlangıç şarj yüzdesi düşük ancak batarya paketinin normal çalışma aralıklarında yani maksimum

akım verebildiği bir değerde olmalıdır. Test başlangıcında bütün ana kontaktörler kapatılmalı ve ardından batarya paketinin verebileceği maksimum akım değeri çekilmelidir. Batarya yönetim sisteminin aşırı deşarj koruma fonksiyonu devreye girdikten sonra deşarj sonlandırılmalıdır. Eğer bu fonksiyon çalışmaz veya yok ise, batarya paketi nominal voltaj değerinin %25'ine ulaşıldığında deşarj işlemi sonlandırılmalıdır. Deşarj işlemi tamamlandıktan sonra 1 saat gözlemlenen batarya 34 paketinde herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmazsa test raporuna başarılı olarak raporlama yapılmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.3. Termal Hasar Testleri

2.9.3.1. Batarya Isıtma Testi

Yüksek sıcaklığa sahip ortamda bulunan batarya içerisindeki sıcaklık kritik sıcaklığa ulaşarak, bataryada kendi kendine ısınma ve ardından termal kaçak meydana gelir. Herhangi bir yangın ve patlamanın olmayışı bu testten geçmenin şartıdır (Yu ve diğerleri, 2023).

2.9.3.2. Termal Kaçak Testi

Lityum-iyon bataryanın termal kaçak süreci DB34/T 3377-2019 ve T/CEC 172-2018 standartlarına göre incelenir. DB34/T 3377-2019 standardında batarya adyabatik ısı odasında bulunmakta üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile batarya sıcaklığı gözlenmektedir. T/CEC 172-2018 test standardına göre düz yüzey şeklindeki ısıtma cihazı ile batarya doğrudan temas halindedir (Yu ve diğerleri, 2023).

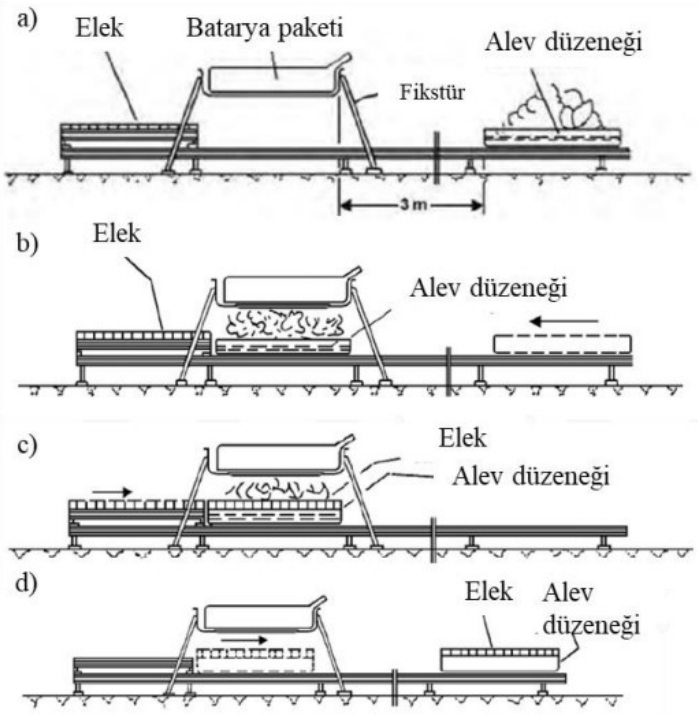
2.9.3.3. Termal Şok ve Çevrim Testi

Termal şok ve çevrim testinin amacı, lityum iyon batarya paketinin ani sıcaklık değişimlerine karşı direncini doğrulamaktır. Test başlangıcında SOC değeri %95'ten büyük olan lityum iyon batarya paketi termal şok ve çevrim testinde ilk olarak

minimum 60 ± 2 °C sıcaklıkta minimum 6 saat bekletilmektedir. Maksimum 30 dakika içerisinde lityum iyon batarya paketi, -40 ± 2 °C sıcaklıkta olan bir ortamda minimum 6 saat saklanmaktadır. Bu şekilde bir çevrim tamamlanmış olup, toplamda 5 çevrim tamamlandıktan sonra test edilen lityum iyon batarya paketi ortam sıcaklığı 22 ± 5 °C'de 24 saat bekletilmektedir. Ardından lityum iyon batarya paketi 1C ile deşarj, C/3 ile şarj edilip çalışma fonksiyonları kontrol edilmektedir. Test sonrasında eğer test edilen lityum iyon batarya paketinden herhangi bir elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmaz ise test sonucu başarılı olarak raporlanmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.4. Yangın Direnci Testi

Yangın direnci testinin amacı elektrikli aracın dışarıdan yangına maruz kaldığı durumda kullanıcı ve yolcuların güvenli şekilde araç dışına tahliyesine kadar ki sürede lityum iyon batarya paketinin yangına karşı direncini doğrulamaktır. Test başlangıcında ortam sıcaklığının minimum 0 °C olması ve lityum iyon batarya paketinin SOC değeri %95'ten büyük olması gerekmektedir. Test sırasında yanıcı madde olarak LPG veya benzin kullanılmaktadır. Test edilecek batarya paketinin test düzeneğine yerleştirilmeden önce alevin yüksekliği minimum 60 cm olması gerekmektedir. Bu test Şekil 2.13.'te gösterildiği gibi 4 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yakıtın yanması başlatılmakta ve 60 saniye boyunca devam ettirilmektedir. Alevin başladığı düzenek ile lityum iyon batarya paketi arasındaki mesafe minimum 3 metre olmalıdır. İkinci aşamada ise alevin olduğu düzenek, lityum iyon batarya 32 paketinin altına gelecek şekilde yerleştirilmekte ve 70 saniye boyunca batarya paketi bu alevlere maruz bırakılmaktadır. Üçüncü aşamada alev ile batarya paketi arasına refrakter malzemeden üretilmiş elek şeklindeki plaka yerleştirilmekte ve bu şekilde lityum iyon batarya paketi 60 saniye boyunca aleve maruz bırakılmaktadır. Son olarak elek ve alev düzeneği batarya paketinden uzaklaştırılmaktadır. Test sırasında herhangi bir batarya paketinde patlama gerçekleşmemesi, testin başarı kriteri olarak sayılmaktadır (Yılmaz, 2023).



Şekil 2.13. Yangın direnci testi birinci (a), ikinci (b), üçüncü (c) ve dördüncü (d) aşamaların gösterimi (Yılmaz 2023).

2.9.5. Aşırı Sıcaklık Koruması Testi

Testin amacı lityum iyon batarya paketinin içinde yer alan hücrelerin sıcaklığının istenilen aralığın üstüne çıkması durumunda batarya yönetim sistemi içerisinde yer alan aşırı sıcaklık koruma fonksiyonunun çalışma performansını doğrulamaktır. Testin başlangıcında batarya paketi iklimlendirme odasına yerleştirilmektedir. Ardından hücre sıcaklığını en hızlı arttıracak şekilde akım çekilmekte ve verilmektedir. Eğer batarya yönetim sistemi çekilen veya verilen akım değerlerini izin verilen maksimum değere ulaşması sonrasında kısıyor veya kesiyor ise test sonlandırılmalıdır. Test sonucunda batarya paketinde elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmazsa test başarı ile sonuçlanmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.6. Aşırı Akım Koruması Testi

Aşırı akım koruma testi ECE-R100 revizyon 3 ile gelen bir ister olup testin amacı hızlı şarj yani DC şarj sırasında batarya yönetim sisteminin aşırı akım koruma sisteminin

performansını doğrulamaktır. Test başlangıcında ortam sıcaklığı 20 ± 10 °C olmalı ve SOC değeri %50-60 arasında bir değerdeyken teste başlanmalıdır. Ardından lityum iyon batarya paketinin DC şarj konnektörüne aşırı akım verebilen şarj ekipmanı bağlanıp şarj işlemi başlatılmaktadır. 5 saniye içerisinde şarj akımları batarya yönetim sistemi tarafından izin verilen maksimum şarj akım değerlerinin üzerine çıkarılıp şarj işlemi devam ettirilmektedir. Test, batarya yönetim sistemi aşırı şarj akım değerleri tespit edip şarjı kesmesi sonucunda bitirilmektedir. Batarya yönetim sistemi tarafından şarj işlemi kesilmediği durumda ise batarya sıcaklığının 2 saat boyunca 4°C'den fazla artmayıp stabilize olması halinde şarj işlemi durdurulmaktadır. 1 saat boyunca batarya paketi gözlemlendikten sonra eğer elektrolit sızıntısı, mekanik bir deformasyon, gaz tahliyesi, yangın ve patlama olmazsa test pozitif bir şekilde sonuçlanmaktadır (Yılmaz, 2023).

2.9.7. Termal Kaçak Yayılma Testi

ECE-R100 revizyon 3 ile regülasyona eklenen bu testin amacı olası lityum iyon batarya paketinde yer alan hücrelerin termal kaçak yayılması durumunda kullanıcı ve yolcuların güvenli bir şekilde araçtan tahliyesi için yeterli sürelerde büyük patlama ve yangınların oluşmayacağını doğrulamaktır. Bu test öncesinde batarya paketi SOC 35 değeri maksimumda olacak şekilde ayarlanmaktadır. Ardından batarya paketi içerisinden yer alan lityum iyon hücrelerden bir tanesinde iç kısa devre oluşturularak termal kaçak durumu başlatılmaktadır. Bu iç kısa devreyi oluşturmak için regülasyonda farklı tetikleme yöntemleri sunulmuştur. İlk olarak batarya paketi içerisinde yer alan bir hücre mekanik olarak deforme edilerek iç kısa devre oluşturulabilmektedir. İkinci seçenek ise bir tane hücrenin harici ısıtıcılar ile sıcaklığı artırılıp hücrenin kısa devre olmasına ve termal kaçak durumunun başlaması sağlanabilmektedir. Üçüncü seçenek ise bir hücreyi aşırı şarj veya deşarj ederek hücrede kısa devre oluşturulup termal kaçak durumunun başlaması tetiklenebilmektedir. Testtin başarılı ile tamamlanabilmesi için lityum iyon batarya paketinden 5 dakika içerisinde herhangi bir alev çıkmaması ve patlama olmaması gerekmektedir. Bunun yanı sıra alev çıkmadan 5 dakika öncesinde yani ilk hücrede termal kaçak başladığı anda, batarya yönetim sisteminin bunu tespit edip kullanıcıya aracın tahliye edilmesi uyarısı verilmelidir. 1 Eylül 2023 tarihinden sonra alınacak elektrikli araç seviyesi homologasyon onaylarında ECE-R100 revizyon 3'e

göre tüm lityum iyon batarya testlerinin tamamlanması gerekmektedir. Lityum iyon batarya hücrelerinin yanıcılığı ve artan enerji ihtiyacıyla beraber yüksek kapasitelerde batarya paketleri üretilmesi göz önüne alındığında elektrikli araç ve batarya paketi üreticilerini en çok zorlayan testlerden birinin termal kaçak yayılma testi olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra testler sırasında tüm batarya paketi yandığı için test maliyetlerinin çok yüksek olması sebebiyle test öncesi yapılacak simülasyonlar büyük önem arz etmektedir (Yılmaz, 2023).

2.10. Lityum-İyon Bataryanın Yangın Güvenliği

Batarya hatası, arızası ve termal kaçak mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için araştırmacılar ve mühendisler pillerin kötü koşullar altındaki davranışlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Lityum iyon bataryalardaki termal kaçak sorununu azaltmak için çok kaynaklı, çok ölçekli ve uzun süreli stratejiler gerekmektedir (Zhao ve diğerleri, 2024). Bataryanın hem kimyasal ve yapısal modifikasyonu sağlanarak hem de batarya içerisine güvenli aygıtlar eklenerek daha güvenli lityum iyon batarya tasarımına ulaşılabilir. Alternatif olarak, etkili termal yönetim ve/veya yangın söndürme sistemi ile batarya güvenliği geliştirilebilir (Wang ve diğerleri, 2019).

Son yıllarda, batarya güvenliğini geliştirmek ve termal kaçak sorununu azaltmak için bilim komitesi disiplinlerarası bir yaklaşımı benimsemiştir. Bu yaklaşım, elektrot ve elektrolit malzemesini iyileştirmeyi, ileri batarya yönetim sistemlerini geliştirmeyi ve arızaları önlemek veya azaltmak için batarya tasarım ve mimarisini yenilemeyi içermektedir. Batarya mühendisliği güvenlik teknolojileri (Battery Engineering Safety Technologies-BEST) kapsamlı, hiyerarşik ve sistematik bir yaklaşımla bataryaların güvenlik performansını ve güvenilirliğini arttırmak için tasarlanmış sistematik bir teknolojik çerçevedir. BEST, malzemeler ve hücrelerden batarya sistemine kadar çeşitli seviyeleri barındıran bütün bir teknolojik çerçeveyi kapsamaktadır (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.11. Yangından Korunma Yöntemleri

Lityum iyon bataryaların uğradıkları mekanik, elektriksel, termal hasarların ve kazaların bataryalarda termal kaçağa, ardından yangın ve patlamalara yol açtıkları bir gerçektir. Bu tehlikeli durumu önlemek, termal kaçağı azaltmak için yangından korunma yöntemleri hücre, batarya yapısı ve sistem düzeyindeki stratejiler olarak gruplandırılmaktadır.

2.11.1. Hücre Seviyesindeki Önlemler

Lityum iyon bataryaların güvenliğini arttırmak, termal kaçağı önlemek amacıyla malzeme seviyesinde pek çok uygulama yapılmaktadır. Kimyasal stabilite ve iletkenlik özellikleri nedeniyle bataryaların elektrokimyasal performansını arttırma bakımından lityum tuzları elektrolit için önemlidir. Ayrıca, elektrolit bozunmasını önlemek, dolayısıyla termal kaçağı azaltmak bakımından yüksek termal stabilite ve mekanik dayanım özelliklerine sahip katı elektrolitler, sıvı elektrolitlere göre daha etkilidir. Batarya üretiminde geliştirilmiş seperatör malzemelerinin kullanımı da güvenliği arttırmak için önemlidir (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.11.1.1. Katot Modifikasyonu

Katodun termal stabilizasyonunun gelişmesi için giydirme (ing. coating) yaygın olarak uygulanır. Giydirmeye ek olarak, katotta metallerin yerini alması ve doping uygulaması da termal stabilizasyonu geliştirir. Ni ve Al, $Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O_2$'deki Co'nun yerine kullanılabilir. $xLi(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O_2$-$yLi(Ni_{2/3}Mn_{1/3})O_2$-$zLi(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Al_{1/3})O_2$ oluşabilir. Al'ın kullanılması termal stabilizasyonu arttırır fakat kapasitede azalmaya neden olabilir. Kapasiteyi arttırmak için Ni kullanılabilir (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.1.2. Anot Modifikasyonu

Anot modifikasyonu, yüzey modifikasyonu ve elektrolit katkılarını içerir. LTO ($Li_4Ti_5O_{12}$)'nun grafitten daha güvenli olduğu gaz üretim analizi, kalorimetrik veri ya da batarya termal kaçak testi yapılarak tespit edilmiştir (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.1.3. Elektrolit Katkıları

Elektrolit katkılarının bir kısmı termal stabilizasyonu sağlamak ya da elektrolit ve lityum iyon batarya hücrelerinin aşırı şarjdan koruma verimini arttırmak için test edilmiştir. Alevlenmeyen fosfonat elektrolit, LFP katot ve alaşım anotlarının bir araya geldiği daha güvenli lityum iyon bataryalar oluşturulmuştur (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.1.4. İyonik Sıvılar ve Katı Polimer Elektrolitler

Elektrolit katkılarına ek olarak geleneksel elektrolitler yerini iyonik sıvılar veya tamamen katı polimer elektrolitlere bırakmıştır. İyonik sıvılar iyonlardan meydana gelir. İyonlar arasındaki Colomb kuvvetleri güçlüdür ve dolayısıyla sıvılar çok viskozdur ve düşük buhar basıncına sahiptir. Düşük buhar basıncı, iyonik sıvıların zor ateşlenmesini sağlar ancak düşük viskoziteye bağlı olarak düşük elektrik iletkenliği ve diğer batarya materyalleri ile bir arada kullanılamaması elektrolit değişiminde ideal bir seçim olmasını engeller (Wang ve diğerleri, 2019).

Lityum ya da sodyum iyon bataryaların yangın riski için katı polimer elektrolit uygun çözümlerden biri olarak düşünülebilir. Sıvı elektrolitlerle kıyaslandığında gaz formuna geçmeme özelliği, yanma olasılığının düşük olması, kolay işlenebilirliği ve elektrokimyasal ve kimyasal stabilitesi bakımından bazı avantajlara sahiptir (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.2. Batarya Yapısı Bakımından Alınan Önlemler

Yapısal olarak önlem almak sadece bataryanın normal çalışma koşulları altında stabilitesini sağlamakla kalmaz ayrıca anormal çalışma koşulları altında güvenliğini

arttırabilir. İç yapının optimizasyonu ve dış koruyucu tasarımların uygulamasıyla batarya kullanımı ile ilgili olası riskler azaltılabilir (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.11.2.1. Güvenlik Ventleri ve Akım Kesici Cihaz

Güvenlik ventleri, batarya hücresi içerisindeki basınç arttığında açılır ve hücrenin çatlamasından kaçınmak için gazın kaçmasını sağlar. Ventin açılması, elektrolitin buharlaşması ve gazın genişlemesi nedeniyle endotermik süreçtir, böylece hücreyi soğutur ve ilerideki sıcaklık artış riskini azaltır (Wang ve diğerleri, 2019).

Ayrıca, güvenlik ventleri akım kesici cihaz olarak da kullanılabilir. Pozitif ucun parçası olan alüminyum plaka hücre içerisinde basınç arttığında pozitif uçtan ayrılır, böylece devre kesilir ve akımı önler (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.2.2. Pozitif Sıcaklık Katsayısı Cihazı

Dış kısa devrenin sebep olduğu istenmeyen yüksek akımdan korunmak için akımı sınırlandıran materyal olan pozitif sıcaklık katsayısı (PTC) lityum iyon batarya hücresine entegre edilir. PTC cihazı genellikle güvenli sıcaklık aralığında devreyi tamamlayan polimer içerikli iletken parçacıklardan oluşur. Sıcaklık bu aralığın dışına çıktığında polimer erir ve devreyi keser (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.2.3. Kapanan ve Seramik Giydirilmiş Separatör

Ergime sıcaklıkları sırasıyla 135 ve 165℃ olan polietilen (PE) ve polipropilen (PP) yaygın polimer ayrıştırıcılardır (Wang ve diğerleri, 2019). Polimer separatörler gözenekli yapıda oldukları için batarya sıcaklığının separatör ergime sıcaklığına ulaşması halinde kapanabilirler. Bu durumda separatör gözenekleri kapanır ve böylece iyon akımını durdurur. İyon transferinin durdurulmasıyla batarya aniden soğumamaktadır. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olabilmesi ve dolayısıyla iç kısa devrenin önlenebilmesi için separatör iki PP katman arasında bir PE katmanın yer aldığı biçimde geliştirilebilir (Kong ve diğerleri, 2018). Kapanan ayrıştırıcıya ek olarak,

seramik giydirilmiş ayrıştırıcılar geliştirilmiş ve separatörün yüksek sıcaklığa direncini attırmak için uygulanmaktadır (Wang ve diğerleri, 2019).

2.11.3. Sistem Seviyesindeki Önlemler

Etkili denetim olmadan ciddi olaylara yol açabilen termal kaçak oldukça hızlı bir şekilde batarya modülü ya da sistem boyunca yayılabilir. Bu sebeple batarya güvenliğini arttırmak için termal kaçağın sistem seviyesinde azaltılması gereklidir. Öte yandan, yüksek verimli ısı açığa çıkaran malzemelerin, yenilikçi soğutma tasarımlarının ve gelişmiş tahmin tekniklerinin entegrasyonu batarya sistemlerinin güvenliğini ve termal stabilitesini önemli ölçüde arttırabilir (Zhao ve diğerleri, 2024).

2.11.3.1. Batarya Yönetim Sistemi

Batarya yönetim sistemi, bataryanın ve/veya bataryanın bulunduğu ortamın durumunu gösterir. Elektronik ya da mekanik olabilir ve paket, modül veya tek bir hücre için kullanılabilir. Batarya yönetim sistemi; şarj durumu, deşarj derinliği, sağlık durumu, fonksiyon durumu, bataryanın aşırı ısınmadan korunması ve raporlama gibi pek çok fonksiyonu içerir (Wang ve diğerleri, 2019).

2.12. Akıllı Sistemler

Normal yangınlarla kıyaslandığında lityum-iyon batarya yangınları kontrol edilemez çok tehlikeli bir hal alabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek, yangından korunmak ve yangının erken safhada tespit edilebilmesi için akıllı sistemlerin kullanımı önem kazanmaktadır. Yangından korunma sistemi üç kısımdan meydana gelmektedir: görüntüleme sistemi, sinyal işleme sistemi ve yangın söndürme (Li ve diğerleri, 2024).

2.12.1. Görüntüleme Sistemleri

Görüntüleme sistemi lityum-iyon bataryanın çalışma durumunu görüntülemektedir ve anormal bir durumda bunu sinyal işleme sistemine aktarmaktadır (Li ve diğerleri, 2024).

2.12.1.1. Sıcaklık Görüntüleme

Termal kaçak sürecinde üç kritik sıcaklık T_1, T_2, T_3'tür. Bu nedenle, sıcaklığı görüntülemek termal kaçak oluşumunu belirlemenin en doğrudan yoludur. T_1-T_2 aşaması sırasında termal kaçak oluşumunu önlemek için önceden uyarı ve güvenlik yönetimi kullanılabilirse güvenliğe yönelik tehdit en aza indirilebilir. Batarya sıcaklığının görüntülenmesi, yüzey sıcaklığının ve iç sıcaklığın görüntülenmesi olarak ikiye ayrılır. Yüzey sıcaklığının görüntülenmesi basit ve kullanışlıdır ancak doğruluktan yoksundur. İç sıcaklığın görüntülenmesi doğrudur ancak karmaşıktır. Elektrot malzemeleri, seperatörler ve akım toplayıcılar gibi batarya bileşenleri farklı termal iletkenliklere sahiptir, bunlar farklı ısı dağıtım yollarına neden olur ve bataryada düzensiz dış sıcaklık dağılımlarına yol açar (Li ve diğerleri, 2024).

Sıcaklık Sensörleri: Termokupllar ve termistörler gibi geleneksel sıcaklık sensörleri lityum-iyon bataryaların yüzey ve iç sıcaklıklarını görüntülemektedir (Li ve diğerleri, 2024). Termokupllar sıcaklık sensörleri olarak kullanılır. Termokuplun elektrik bağlantısı yapan iki farklı elektrik iletkeni vardır. Termokupl Seebeck etkisi sonucunda sıcaklığa bağlı olarak voltaj üretir ve bu voltaj sıcaklık ölçmek için kullanılır. Termistör, sıcaklık ile iletkenliği değişen bir tür dirençtir. Termistörler, sıcaklık sensörleri, kendiliğinden sıfırlamalı aşırı akım koruyucuları ve kendiliğinden ayarlamalı ısıtma elementlerinde kullanılır.

Optik Fiber Sensörler: Geleneksel sıcaklık sensörleri ile kıyaslandığında optik fiber sensörler yeni tip sıcaklık sensörleridir, küçük boyutta ve elektromanyetik parazitlere ve elektrokimyasal korozyona dayanıklı olma gibi avantajlara sahiptir. Aynı zamanda, optik fiber sıcaklık sensörleri batarya yüzeyinde ve içindeki sıcaklık değişimlerini görüntüleyebilmektedir. Optik fiber sensörler silikadan yapılmaktadır ve 273-1190℃ sıcaklık aralığında mükemmel bir termal stabilite gösterir. 500℃'ye kadar olan sıcaklık değişimlerinde optik fiber sensörler normal çalışır ve doğru bir ölçüm yapar (Li ve diğerleri, 2024).

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopi: Batarya empedansı batarya sağlık durumunu ve şarj durumunu ve iç sıcaklıkları içeren parametreleri etkili bir şekilde yansıtabilir. Ayrıca empedans testi, lityum-iyon bataryaların iç sıcaklık görüntülenmesi için tahribatsız bir test yöntemidir (Li ve diğerleri, 2024).

2.12.1.2. Voltaj Görüntüleme

Kısa devre, aşırı şarj ve deşarj gibi elektriksel hasarlara yüksek hassasiyet bakımından batarya voltajı en kritik parametredir. Örneğin batarya aşırı şarj edildiğinde, voltaj teorik yüksek voltaj değerinden daha yüksek bir değer olan tepe noktaya hızlı bir biçimde ulaşır. Bu değer batarya şarj durumu %100 değerinden yukarıdadır, batarya anormal durumdadır. Ardından voltaj aniden 0 V'a düşer ve termal kaçağı oluşturan bazı zararlı gazlar açığa çıkar. Benzer olarak minimum veya minimuma yakın bir değerde olan voltaj aşırı deşarj ya da kısa devre durumunda olabilir. Böylece, voltaj anormallikleri her zaman ciddi iç arızaları ima etmekte, bu nedenle uygun karar alma için zamanında erken bir teşhis sağlanması gerekir. Voltaj görüntüleme bataryanın termal kaçak durumunda olup olmadığını belirlemek için etkili bir yöntemdir. Hücre belirli bir sıcaklığa ulaştığında, seperatör bölgesel erime ve çökmeye uğrar, böylece iç kısa devre meydana gelir ve hücrenin voltajı birden azalır. Bu voltaj düşüşü erken bir aşamada fark edilebilirse termal kaçak oluşumu önceden uyarılabilir ve karşılık gelen güvenlik yönetim protokolü uygulanabilir (Li ve diğerleri, 2024).

2.12.1.3. Gaz Görüntüleme

Lityum-iyon bataryaların termal yönetimi için sıcaklık ve voltaj görüntüleme yöntemlerinin daha yaygın kullanılmasına rağmen, termal kaçağın başlangıç evresinde sıcaklık ve diğer parametreler belirgin bir biçimde değişim göstermemektedir. Ancak, termal kaçağın ilk evrelerinde gaz çıkışı gerçekleşmektedir. Gaz üretiminin görüntülenmesi ile bataryanın anormal çalışması tespit edilebilir (Li ve diğerleri, 2024).

Gaz Sensörü: Gaz sensörleri, batarya güvenliğinin görüntülenmesi için yaygın kullanılan cihazlardır (Li ve diğerleri, 2024).

FBG Metodu: FBG'ler bataryadaki sıcaklık ve gerilim değişimlerini görüntüleyebilir. Böylece termal kaçak süreci boyunca termal gaz ventinin sebep olduğu gerilim değişimlerini görüntülemekte kullanılabilirler. Sıcaklık sensörlerine, termokupllara, termistörlere göre FBG bataryanın anormal çalışma koşullarını daha hassas tespit edebilir (Li ve diğerleri, 2024).

Ultrasonik Görüntüleme Metodu: Ultrasonik görüntüleme, lityum-iyon batarya içerisindeki kusurları tespit eden yeni bir yöntemdir. Ultrasonik dalgalar iki faz arasında farklı arayüzlerde yayılırken, akustik empedans yansımada büyük bir fark gösterir. Ses dalgalarının yayılım özellikleri;

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \tag{2.54}$$

$$R = \frac{(Z_2-Z_1)^2}{(Z_1+Z_2)^2} \tag{2.55}$$

burada Z_1 yayılan maddenin akustik empedansı, Z_2 karşılayan maddenin akustik empedansı, T yayılım oranı, R yansıma oranıdır. Ultrasonik görüntüleme yöntemi, batarya içerisindeki gaz çıkışını hassas bir şekilde tespit edebilen bir yöntemdir (Li ve diğerleri, 2024).

2.12.2. Sinyal İşleme Sistemleri

Sinyal işleme sistemi; sensör sisteminden gelen sinyalleri analiz etme, depolama ve işlemeden sorumludur. Batarya termal kaçak riski ile karşılaşmadan önce sistem ilgili sinyali bir sonraki bağlantıya program aracılığıyla aktarır. Görüntüleme sistemini ve yangın koruma sistemini birbirine bağlayan önemli bir kanal olan sinyal işleme sistemi yalnızca sinyal almakla ve yangın koruma sisteminin başlatılmasını ve durdurulmasını kontrol etmekle kalmaz, lityum-iyon bataryaların çalışma durumunu da analiz eder. Görüntüleme sisteminden gelen farklı sinyaller için sinyal işleme sistemi bilgiyi analiz etmek ve işlemek, ayrıca bataryanın normal bir şekilde çalışıp çalışmadığını tespit etmek için farklı algoritmalar kullanır. Lityum-iyon bataryanın yanması aniden

gerçekleşen bir durum değildir. Bu nedenle, sinyal işleme sistemi farklı türdeki bataryalara göre termal kaçak modellerinin oluşturulmasına ihtiyaç duyar (Li ve diğerleri, 2024).

2.13. Yangın Söndürme Yöntemleri

Lityum-iyon bataryaların yangın tespiti sadece ısı veya duman dedektörüne kıyasla duman-ısı dedektörü ile daha hızlı yapılabilir. Bataryanın içerisinde süreklilik gösteren kimyasal reaksiyonlar nedeniyle lityum-iyon batarya yangınları tipik bir yangın örneği değildir. Tipik yangınlara uygulanan temelde dört yaklaşım ki bunlar izolasyon metodu, boğma metodu, soğutma ve söndürme metodu batarya yangınları için yetersiz yaklaşımlardır (Wang ve diğerleri, 2019). Lityum-iyon batarya yangınları etkili bir soğutma yapılmadığında termal kaçak süreci nedeniyle tekrar edebilir.

2.13.1. Su Bazlı Olmayan Yangın Söndürme Ajanları

2.13.1.1. Karbondioksit

Karbondioksit, yangın söndürme ajanları arasında en yaygın kullanılan gazdır. CO_2'nin yangın söndürme mekanizması, havadaki oksijen miktarını yanma için gerekli olan oksijen miktarından daha az olacak şekilde tutmaktır. Karbondioksit, lityum-iyon batarya yangınlarını etkili bir biçimde söndüremez. Karbondioksit kullanımı batarya paketini soğutma ve yangının yeniden başlamasını önlemek bakımından etkisiz kalmaktadır (Sun ve ark., 2020). CO_2 yanıcı gazların yanmasını ve jet alev oluşumunu önleyebilmesine rağmen bataryayı soğutamamaktadır. Batarya sıcaklığı yeterince yüksek olduğunda, batarya yeniden alev alabilir ve söndürülemeyebilir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.2. Sıvı Nitrojen

Termal kaçak meydana gelmeden önce, termal kaçak oluşumunu önlemek için sıvı nitrojen ve R410A gibi soğutucu akışkan batarya paketinin yüzeyine spreylenebilir.

Böylece lityum-iyon batarya yangınının erken evresindeki termal kaçak soğutucunun buharlaşması ile hızlı soğutularak önlenebilir. Soğutucu akışkan, yüksek sıcaklıktaki bataryanın soğutulmasında büyük bir etkiye sahiptir ve batarya paketindeki oksijen miktarını kısa zamanda hızlı bir şekilde azaltabilir. Fakat yüksek depolama gerektirmesi ve ulaşım maliyeti bakımından yaygın bir yöntem değildir. Ayrıca, sıvı nitrojenin buharlaşması endotermik olduğundan sıvı nitrojen söndürücünün nozulunda nitrojen buharı donar ve sıvı nitrojen geçişi engellenir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.3. Halotan

Kimyasal yangın söndürme ajanı olan halon ajanı ısındığında yangının zincirleme reaksiyonunu önlemek için OH, H, O'ya ve diğer aktif serbest radikallere bozunur. Halon söndürme ajanının ozon tabakasına zarar verdiği bilinene kadar Halon 1211 ve 1301'in temiz ve güvenli bir yangın söndürme ajanı oldukları kabul edilmekte idi. Bu ajanlar, lityum-iyon batarya yangınlarını söndürücü etkilerinin yanı sıra yalıtkan görevi de görmektedir. Özellikle Halon 1301 lityum-iyon batarya yangınlarının inhibitörü olarak tercih edilir. Ancak, batarya kasasının tamamını saramamasından ötürü halon bataryayı etkili bir şekilde soğutamaz. Bu nedenle bataryanın yeniden yanmasını önleyemez (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.4. Kuru Pudra

Kuru pudra yangın söndürme ajanları aktif yangın söndürme elemanlarını, hidrofobik elemanları ve inert doldurucuları içermektedir. Yüksek sıcaklıkta kuru pudra, oksijen ve yakıtı izole edebilmek amacıyla camsı bir yapı oluşturmaktadır. Böylece yanma zincirleme reaksiyonunu ve batarya yangınlarını önlemektedir. Lityum-iyon bataryaların soğutulmasında etkili değildir ve yangınların tekrar etmesini engelleyemez (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.5. Aerosol

Aerosol içerisinde katı ve sıvı parçacıkların homojen bir şekilde dağıldığı bir gaz dağılma sistemidir. Ortalama parçacık boyutunun 5 μm'den küçük olduğu parçacıklarla katı ve sıvı parçacıklar çoğunlukla oksidanlar, indirgeyiciler, yapıştırıcılar ve diğer fonksiyonel katkı maddeleridir. Aerosollerin yangın söndürme mekanizması bastırma, boğma ve soğutmadır. Yangın söndürme prosesi boyunca aerosol ajan yanar, bu reaksiyon çok küçük aerosol parçacıklarda metal iyonlarını üretir. Metal iyonlar serbest radikalleri ortadan kaldırır ve zincirleme reaksiyonları bitirir. Öte yandan, metal oksitler ve karbonatların bozunumu ile açığa çıkan inert gazlar oksijen konsantresini azaltır ki bu da ısının büyük bir kısmını ve yangınları önlemektedir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.6. 1,1,1,2,3,3,3-Heptaflorpropan (HFC-227ea)

HFC-227ea'nın yangın söndürme mekanizması Halon 1301 ile benzerlik gösterir. HFC-227ea kullanımıyla çevreye brom ve klor yayılımı gerçekleşmez. HFC-227ea'nın yangın söndürme mekanizması temelde fiziksel ve kimyasal yaklaşımlar içerir. Fiziksel kısmı soğutma ve yangını boğmaktır. HFC-227ea yüksek miktarda gizli buharlaşma ısısına sahiptir ve bozunma prosesinden ısıyı absorbe eder. Bu nedenle, HFC-227ea CO_2'e göre daha iyi bir soğutma etkisine sahiptir. Ayrıca, HFC-227ea alev bölgesini karıştırırken oksijen konsantresi azalır ve alev boğulur. Fiziksel inhibitasyon prensibinin aksine yanma prosesinde HFC-227ea, kimyasal olarak zincirleme reaksiyonları engellemektedir. HFC-227ea yüksek sıcaklıklarda bozunarak CFO, CF_3 ve CF_2 açığa çıkarır. Bu moleküller H, O ve CH_3 radikallerini hapseder. Böylece, yanmayı meydana getiren zincirleme reaksiyonları engeller ve yangın bastırılır (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.1.7. Perflorhekzanon ($C_6F_{12}O$)

$C_6F_{12}O$ fiziksel soğutma, oksijenin yalıtılması ve kimyasal inhibitasyon aşamaları ile yangını söndürebilen temiz bir ajandır. $C_6F_{12}O$, hem yüksek bir söndürme performansına sahiptir hem de çevre dostudur. $C_6F_{12}O$ alevlerden ve yanma reaksiyonlarından ısıyı emer ve hızlı bir yangın söndürme için sıcaklığı yanmanın

başladığı minimum sıcaklığın altına kadar azaltır. HFC-227ea'ya benzer olarak $C_6F_{12}O$, fiziksel ve kimyasal inhibitasyonların bir arada olması ile lityum-iyon batarya yangınlarını söndürür. Fiziksel inhibitasyon genelde soğutma ve boğmak olarak tanımlanır. Kaynama noktası 49℃ olduğu için $C_6F_{12}O$ kolaylıkla buharlaşır ve alev bölgelerinden ısıyı absorbe eder. Öte yandan, $C_6F_{12}O$ buharı oksijeni izole edebilir ve alevi boğabilir. Alevlenmede $C_6F_{12}O$ bozunur ve CF_3, CF_2 ve CF_2O açığa çıkarır. Bu moleküller alevde H ve OH serbest radikallerini harcar ve zincirleme reaksiyonlar önlenir. $C_6F_{12}O$'nun kullanımı sınırlıdır çünkü çok yüksek sıcaklıklarda zehirli ve korozif HF'ü meydana getirir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.2. Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanları

2.13.2.1. Su

Su, yüksek özgül ısı kapasitesi ve buharlaşma gizli ısısı yüksek olması bakımından en yaygın kullanılan ve çok yönlü bir yangın söndürme ajanı özelliği göstermektedir. Su, soğutma performansının yüksek olması nedeniyle termal kaçak oluşumunu önleyebilir. Elektrikli araç yangınlarında içten yanmalı motora sahip araç yangınlarına göre yangının tekrar etmemesi için daha fazla su kullanımı gerekmektedir. Ayrıca su batarya paketinin büyük bir kısmına ulaşamadığından bataryanın soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Öte yandan, su $LiPF_6$ ile tepkimeye girdiğinde zehirli ve zararlı hidrojen florürü (HF) açığa çıkarmaktadır (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.2.2. Su Püskürtme Sistemi

Su ile kıyaslandığında su püskürtme sistemi içerisindeki küçük boyutlu yoğun su damlacıkları ile daha geniş alanı kapsamakta böylece bataryayı soğutmada daha verimlidir. Ayrıca, küçük boyuttaki su püskürtme sisteminin daha küçük buhar parçacıklarında buharlaşma olasılığı daha yüksektir, böylece alev alanındaki oksijen konsantresini azaltır ve boğulma etkisini arttırır. Öte yandan, su püskürtme sistemi ışınımla ısı transferini engelleyerek yangının yayılmasını da önleyebilir. İyi bir soğutma ve boğma yeteneği, düşük su tüketimi, düşük elektrik iletkenliği ve çevre dostu olması

bakımından su püskürtme sistemi yalnızca normal yangınlar için uygun olmakla kalmaz, aynı zamanda lityum-iyon batarya yangınlarında da büyük bir potansiyele sahiptir. Hızlı soğutma etkisi nedeniyle su püskürtme sistemi, diğer su bazlı olmayan söndürme ajanlarından daha üstün bir yangın söndürme etkisine sahiptir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.2.3. Diğer Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanları

Lityum-iyon batarya yangınlarında su bazlı yangın söndürme ajanları daha iyi bir soğutma kapasitesine sahip olmaları bakımından su bazlı olmayan yangın söndürme maddelerine göre daha iyi bir söndürme performansı gösterebilir. Böylece, su bazlı maddeler yanıcı gazların açığa çıkmasını engelleyebilir ve yeniden alevlenmeyi önleyebilir. Öte yandan, yüksek ısı kapasitesine sahip olmaları nedeniyle su bazlı yangın söndürme maddeleri lityum-iyon batarya yangınlarına müdahalede diğer maddelere göre çok daha iyi bir performansa sahiptir. Dezavantajları arasında kimyasal tepkimede HF açığa çıkarmaları ve suyun yalıtkan özelliği gösterememesidir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.3. Su Bazlı Yangın Söndürme Ajanlarındaki Katkı Maddeleri

Lityum-iyon batarya yangınlarını bastırabilmek için büyük miktarda su tüketiminin gerekli olması bir sorun teşkil eder. Bu problem göz önüne alındığında, suya katkı maddeleri eklemek çözeltinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirebilir, su tüketimini azaltabilir ve zehirli gaz çıkışını önleyebilir. Bu etkilere ek olarak su püskürtme sistemine eklenen katkı maddeleri ile batarya yangınları daha verimli bir şekilde bastırılabilir. Katkı maddeleri yüzey aktif maddeler ve inorganik tuzlar olarak iki gruba ayrılır (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.3.1. Yüzey Aktif Maddeler

Yüzey aktif maddeler arayüz gerilimini azaltarak yanan malzemenin yüzeyinde film tabakası oluşturabilir ki bu da alevin boğulması ve bataryanın soğutulmasına sebep olur ve hızlı, güvenli bir söndürme gerçekleşir. Florokarbon yüzey aktif maddeler su bazlı film köpük yangın söndürme maddelerinin ana katkı maddesidir (Li ve diğerleri, 2024).

2.13.3.2. İnorganik Tuzlar

İnorganik tuzların termal bozunma prosesi büyük miktarda ısıyı absorbe etmektedir. İnorganik tuzların termal bozunumu ile üretilen serbest radikaller zincirleme yanma tepkimelerini engelleyebilir. İnorganik tuzlar zehirli gazlarla reaksiyona girebilir ve zehirli maddelerin konsantresini azaltmak için tütebilir. İnorganik tuzlar yüksek korozif özelliğe ve iletkenliğe sahiptir. Batarya yangınlarında bu maddelerin kullanımı ile korozyon ve kısa devre meydana gelebilir (Li ve diğerleri, 2024).

2.14. Elektrikli Araç Kontrol Birimleri ve Güvenlik

Çevremizdeki her araç, aracın hareketini etkileyebilen pek çok düzeltici sistemlerden ya da kontrolörlerden oluşur. Elektrikli araç kontrol ünitesi genelde diğer birimlerle etkileşime geçebilen, araçta gerekenleri yöneten ve kontrol edebilen bir düzeltici sistem olarak tanımlanabilir. Elektrikli araç kontrol birimleri; güç kontrol ünitesi, batarya kontrol birimi, araç güvenliği kontrol birimi, beden kontrol ünitesi, telematik ünitesi, bilişim ünitesi gibi alt sistemlerden meydana gelir (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

Güç kontrol modülü, elektrikli aracın şarj, transmisyon ve emisyon gibi fonksiyonlarını kontrol eden farklı sensörlerle etkileşime girer. Batarya kontrol birimi de benzer olarak şarj durumu tespiti, her bir hücrenin monitörde izlenmesi ve raporlanması, termal yönetimi vb. görevleri üstlenir. Araç güvenliği kontrol ünitesi, aracın aktif ve pasif güvenliği ile ilgili kısımları görev alır. Beden kontrol biriminde; kapıların, pencerelerin gücü, iç ve dış aydınlatma ve silecekler kontrol edilir. Ayrıca, iklimlendirme kontrolü ve yönlendirme kontrolü de beden kontrolü modülünde yer alır. Telematik modülünde

kablolu ve kablosuz terminaller ve aksesuar cihazlar sürekli monitörde izlenir. Sonarlar, yan ayna kamerası, GPS, WLAN bu modülün parçalarıdır. Bilişim kontrol birimi ses, video oynatıcılarının, radyonun, mikrofonların operasyonu ve navigasyon gösterimi ile uğraşır (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

2.15. Otomotivde Güvenlik Standartları

2.15.1. ISO 26262

Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (International Organization for Standardization-ISO) ISO 26262, 2011 yılında tanımlanmış olarak, araçların elektrik parçalarının ve elektroniğinin fonksiyonel güvenliğini sağlamak için oluşturulmuştur (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

2.15.2. ISO 21488-SOTIF

ISO 21488-SOTIF (Safety of the Intended Functionality), ISO 26262'nin uzantısıdır. Karmaşık sensör ve algoritmaları içeren acil durum değerlendirmesi ile uğraşır (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

2.15.3. CAN

Elektrikli araçtaki kontrol üniteleri CAN (Controller Area Network) BUS üzerinden etkileşir. CAN bus'ı test etmek için standartlar oluşturulmuştur. ISO 11898-CAN yol araçlarını içeren standarttır (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

2.15.4. Underwriters Laboratories (UL) Standartları

Güvenlik ile ilgili uzmanlardan oluşan bir grup tarafından oluşturulan bir diğer önemli organizasyon, elektrik ve elektronik ürünler için pek çok standardı tanımlamaktadır. Elektrikli araçlar için lityum bataryalar, şarj istasyon altyapısı, bilişim teknoloji

ekipmanı, güç sistemleri vb. için ayrı ayrı standartlar tanımlanmaktadır (Indu ve Aswatha Kumar, 2023).

2.16. Elektrikli Araç Kazaları

Elektrikli araç yangınları, yangının gerçekleşme sebepleri bakımından beş kategori etrafında genelleştirilebilir. Bunlar; yangının trafik kazası sonucu bataryanın mekanik hasara uğraması, yangının termal hasar sebebiyle başlaması, şarj sırasında güvenli olmayan şarj istasyonu ve altyapısı sebebi, çok yüksek sıcaklık ve nem koşullarında park halindeki aracın birden alevlenmesi, ortamda var olan yangının araca sirayet etmesi olarak gruplandırılabilir.

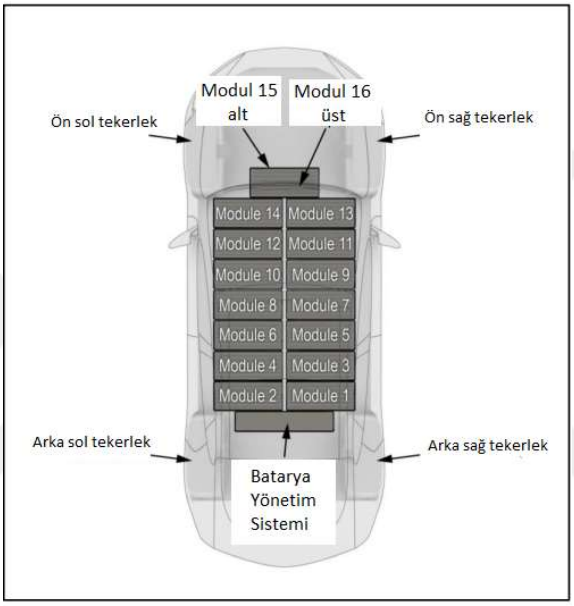
2.16.1. Lake Forest, Kaliforniya, ABD

NTSB (National Transportation Safety Board) (2020) raporuna göre 25 Ağustos 2017 saat 18:17'de Kaliforniya Lake Forest'ta 2016 Tesla X model SUV aracı aşırı hız sonucu bir evin garajına çarparak kaza yapmıştır. Şekil 2.14.'te görüldüğü üzere çıkan yangında itfaiye ekipleri dakikada 200 galon su püskürterek aracın bataryasındaki yangını söndürememiş, miktarı 600 galona çıkartarak 45 dakika boyunca araç yangınına müdahale etmişlerdir (National Transportation Safety Board, 2020).



Şekil 2.14. Kaliforniya Lake Forest'taki kaza ve yangına müdahale anı (National Transportation Safety Board 2020).

Söndürme çalışmalarından yaklaşık 6 saat sonra batarya soğutma çalışmaları, aracın altında bulunan bataryaya dakikada 300 galon su püskürterek devam etmiştir. Söndürme ve soğutma çalışmalarının ardından 16 modülden oluşan batarya paketinde Şekil 2.15.'te gösterildiği gibi sağ ön kısımda yer alan 13 numaralı modül ve 15 numaralı modüllerde Şekil 2.16.'da yer alan ciddi hasar meydana gelmiştir. Ayrıca 11 ve 9 no'lu modüller de hasar görmüştür (National Transportation Safety Board, 2020).



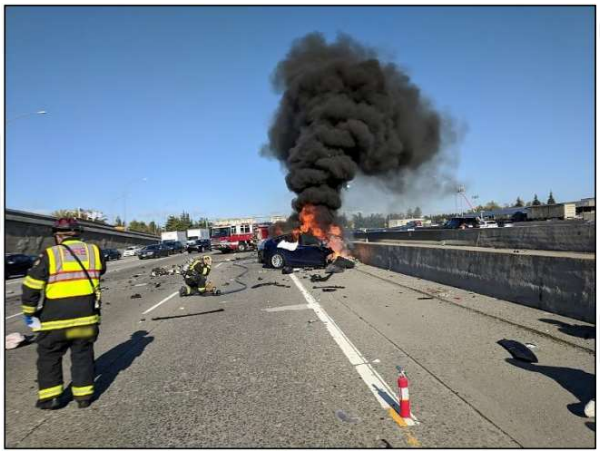
Şekil 2.15. Tesla X 2016 model SUV aracının batarya yerleşimi (National Transportation Safety Board 2020'den değiştirilerek alınmıştır).



Şekil 2.16. Kaza sonrasında bataryanın görünümü (National Transportation Safety Board 2020).

2.16.2. Mountain View, Kaliforniya, ABD

23 Mart 2018 saat 9:27'de US-101 yolunda seyir halindeki 2017 model Tesla X SUV aracı iki araca ve bariyere çarparak alev almıştır. Şekil 2.17.'de bu durum görülmektedir. 30 saniye boyunca 200 galon su ve köpük ile yangına müdahale edilmiştir. İlk müdahalenin ardından üretici firmadan gelen mühendislerle birlikte aracın zarar görmüş batarya parçaları ve patlayan 16 no'lu modül kaza alanından su dolu kap içerisinde uzaklaştırılmıştır. Kazadan 5 gün sonra aracın tekrar alevlendiği, yangına müdahale edildiği kayıtlara geçmiştir (National Transportation Safety Board, 2020).



Şekil 2.17. Kaliforniya Mountain View'daki kaza anı (National Transportation Safety Board 2020).

2.16.3. Fort Lauderdale, Florida, ABD



Şekil 2.18. 2014 model Tesla S aracının Florida'daki kaza anı (National Transportation Safety Board 2020).

8 Mayıs 2018 saat 18:46'da Florida'da 2014 model Tesla S aracı bir evin duvarına çarparak alev almıştır. Yangına 500 galonluk su tankının yarısına kadar ve köpük/ıslatma ajanı ile müdahale edilmiştir. Şekil 2.18.'de aracın kaza anı görülmektedir. Ayrıca itfaiye ekipleri söndürme çalışmalarının bitiminde araç içerisinde çok yoğun ısı ve elektrik arkını gözlemleyip 200 ile 300 galonluk su ve köpük püskürtme uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Kaza sonrasında büyük oranda hasar görmüş aracın batarya paketi Şekil 2.19.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Hasar gören batarya paketinin kaza sonrası görünümü (National Transportation Safety Board 2020).

11, 12, 13 ve 14 no'lu modüllerin kesişiminde yüksek voltaj bağlantı noktaları olduğu ve bu noktada 3 ile 5 inç yarıçapında bir delik gözlemlenmiştir (National Transportation Safety Board, 2020).

2.16.4. West Hollywood, Kaliforniya, ABD

15 Haziran 2018 saat 17:30'da West Hollywood yolunda seyir halindeki 2012 Tesla S model aracın birden alev aldığı, yanmaya başladığı görülmüştür. Aracın ön sol tekerlek ve arka sol tekerlek kısmında başlayan yangın Şekil 2.20.'de görülebilir (National Transportation Safety Board, 2020).



Şekil 2.20. 2012 model Tesla S aracının yanma anı (National Transportation Safety Board 2020).

Yangına yaklaşık 30 dakika süren 300 galonluk su ve köpük ile ilk müdahalenin ardından araçtan dumanların yükseldiği itfaiye ekiplerince gözlenmiştir. Araç bataryasının tekrar alevlenmediği kayıtlara geçmiştir. 14 no'lu modülde termal kaçağın meydana geldiği, 14 no'lu modül haricinde diğer modüllerde ciddi hasar görülmediği de kayıtlara geçmiştir. Yangın sonrası bataryadaki hasarlar Şekil 2.21.'de gösterilmektedir. Kaza sonrasında 14 no'lu modül elektriksel olarak yalıtılmış ve güvenlik açısından diğer modüllerin şarj seviyesi %50'ye düşürülmüştür (National Transportation Safety Board, 2020).



Şekil 2.21. Yangın sonrası batarya paketinin görünümü (National Transportation Safety Board 2020).

2.16.5. Guangzhou, Çin

31 Ağustos 2018'de Çin'in Guangzhou kentinde Lifan 650 model elektrikli araç birden alev almaya başlamış, zamanında etkili bir söndürme uygulaması yapılamamıştır. Yangın batarya paketinin yer aldığı aracın alt kısmında gerçekleşmiştir. Yangına pek çok patlamanın ve zehirli yoğun duman da eşlik etmiştir. Söndürme çalışmalarında iki saatten fazla bir süre boyunca su püskürtülmüş, bu uygulama ile bataryada kısa devre gerçekleştiği ve bu durumun termal kaçağa ardından yangına yol açtığı belirtilmiştir (Sun ve ark., 2020). Şekil 2.22.'de aracın yanma anı gösterilmektedir.



Şekil 2.22. Lifan 650 model aracın yanma anı (Sun ve diğerleri 2020).

2.16.6. Norveç

1 Ocak 2016'da Norveç'te bir şarj istasyonunda Tesla S model elektrikli araç şarj esnasında yanmaya başlamıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, aracın şarj ekipmanındaki arıza sebebiyle yangının başladığı ifade edilmiştir (Sun ve diğerleri, 2020). Şekil 2.23.'te yangın görülebilir.



Şekil 2.23. Tesla S model aracın Norveç'te şarj istasyonunda yanma anı (Sun ve diğerleri 2020).

2.16.7. Arlberg Yolu, Avusturya

18 Ekim 2017'de Tesla S model araç Arlberg Yolu'nda seyir halindeyken yol kenarındaki bariyere çarpması sonucu alev almaya başlamıştır. Aracın ön kısmı yanmaya başlamış ve araçtan çok yoğun bir zehirli gaz çıkışı gözlenmiştir. Bataryanın soğutulması için yoğun miktarda su püskürtülmüş, aracın yeniden alev alma riskine yönelik araç 48 saat boyunca gözlem altına alınmıştır (Sun ve diğerleri, 2020). Şekil 2.24.'te kaza ve yangına müdahale anı verilmiştir.



Şekil 2.24. Avusturya'da Tesla S model aracın kaza anı (Sun ve diğerleri 2020).

Dünya'daki farklı ülkelerde gerçekleşen elektrikli araç yangınları tablo halinde Çizelge 2.4.'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Dünya'daki araç yangınlarına örnekler (Zhao ve diğerleri, 2024).

Tarih	**Kaza Tanımı**	**Batarya Türü**	**Yangın Durumu**	**Ülke**
07/05/2021	Seyir halindeki elektrikli araçta yangına yol açan ani bir patlama meydana gelmiştir. Patlama sebebinin bataryadaki kısa devre olduğu tespit edilmiştir.	NMC	Çarpışma sonrasında yangın	Çin
31/05/2021	Dongfeng Honda X-NV model elektrikli araç bir saatlik şarjın ardından araç tabanından alev almaya başlamıştır.	NMC	Şarj esnasında yangın	Çin
29/06/2021	Tesla S model araç yolda seyir halindeyken ani patlama meydana gelmiştir. Patlama öncesinde aracın arka kısmında duman çıkışı	NMC	Seyir halinde patlamanın meydana gelmesi	ABD

	gözlenmiştir.			
01/07/2021	Chevrolet Bolt model elektrikli araç şarj sırasında patlama ve ardından yangın meydana gelmiştir.	NMC	Şarj sırasında patlama	ABD
08/07/2021	Nissan Leaf model araç bir alışveriş merkezinin şarj istasyonunda şarj edilirken yangın meydana gelmiştir. Yangın öncesinde aracın arka kısmından yoğun siyah duman çıkışı akabinde alevler aracı sarmıştır.	LFP	Şarj sırasında yangın	Ukrayna
29/12/2021	Alter otomobil firmasının otomotiv fuarından bir gün önce park halindeki elektrikli araçta yangın meydana gelmiştir. Araç bataryasındaki kısa devre yangın nedeni	NMC	Park halinde meydana gelen patlama	Çin

	olarak tanımlanmıştır. Kaza sırasında yoğun miktardaki duman gözlenmiştir.			
28/03/2022	Bina otoparkında park halindeki Xiaopeng aracı patlamıştır. Patlama seslerinin eşlik ettiği aracın alt kısmından yoğun bir beyaz duman çıkışı ve alevler gözlenmiştir.	NMC	Park halindeyken patlamanın meydana gelmesi	Çin
18/04/2022	Şarj istasyonunda WM EX5 elektrikli aracının şarj işleminin başlamasından 3 dakika sonra yangın meydana gelmiştir. Ön güç bölgesi ve alttaki batarya yanmıştır.	NMC	Şarj sonrasında yangın	Çin
21/07/2022	Tesla sedan aracı Toyota SUV aracı ile çarpışarak alev almaya başlamıştır.	NMC	Çarpışmanın ardından yangın	Çin

	Yangının sebebi, aracın batarya paketindeki basınç çıkış valfindeki arızadır.			
01/08/2022	Jaguar marka I-Pace model araç garajda şarj uygulaması sonrasında yanmaya başlamıştır.	LCO	Şarj sonrasında yangın	ABD
16/08/2022	Hareket halindeki bir elektrikli araçta patlama meydana gelmiştir. Yangın sırasında bir yakıt tankeri ile beş adet elektrikli scooter zarar görmüştür.	LFP	Seyir halinde meydana gelen patlama	Çin
29/01/2023	Yol kenarındaki L9 elektrikli aracında patlama meydana gelmiştir. Aracın ön kısmında çıkan yangın bir dakikadan az sürede kontrol edilemez hale gelmiştir.	LFP	Yol kenarında meydana gelen patlama	Çin

	Yangın öncesinde aracın normal bir şekilde fonksiyon gösterdiği kayıtlara geçmiştir.			
31/01/2023	Hareket halindeki Tesla elektrikli aracında 6000 galon su ile söndürülebilen yangın çıkmıştır. Yangın öncesinde aracın fonksiyonunun anormal olduğu ve söndürme çalışmalarının ardından bataryanın hala yanmaya devam ettiği gözlenmiştir.	NMC	Seyir halinde meydana gelen patlama	ABD
04/02/2023	Chery Little Ant elektrikli aracında şarj esnasında yangın meydana gelmiştir.	NMC	Şarj sırasında meydana gelen yangın	Çin
12/02/2023	Seyir halindeki Audi marka elektrikli araçta yangın gelişmiştir.	NMC	Seyir halinde meydana gelen	Çin

	Yangından önce araç içerisinde yanmış plastik kokusu alınmıştır.		yangın	
25/02/2023	Binaya çarpan Tesla elektrikli aracında bir dakikadan az bir sürede yangın gerçekleşmiştir. Yangın söndürüldükten sonra araç bulunduğu yerden uzaklaştırılırken tekrar alev almıştır.	NMC	Çarpışmanın ardından meydana gelen yangın	ABD
24/07/2023	500 elektrikli aracı taşıyan kargo gemisinde taşıma esnasında yangın çıkmıştır. Yangın sebebinin araç bataryası olduğu tespit edilmiştir.	Bilinmiyor	Taşıma sırasında meydana gelen yangın	Hollanda
01/08/2023	NIO ES8 elektrikli aracı direğe çarparak araçta yangın meydana	NMC	Çarpışmanın ardından yangın	Çin

	gelmiştir.			
08/08/2023	Tesla S model sedan başka bir araca çarparak yanmaya başlamıştır. Yangın sırasında ciddi bir patlama da gerçekleşmiştir.	NMC	Çarpışmanın ardından yangın	Çin
05/09/2023	Park halinde şarj uygulaması sırasında Nissan Leaf aracında yangın meydana gelmiştir. Yangın 3. Seviyede hızlı şarj sırasında gerçekleşmiştir. Aracın lityum-iyon bataryası aşırı ısınarak, termal kaçak oluşmuş ve devamında yanmaya başlamıştır.	LFP	Şarj esnasında yangın	Japonya
11/09/2023	Havaalanında park halindeki elektrikli araçta yangın gerçekleşmiş, aracın gövdesi hasar görmüştür. Aracın bataryasındaki arıza yangının	NMC	Park halinde meydana gelen yangın	Avustralya

	sebebi olarak tespit edilmiştir.			
24/09/2023	Yolda seyir halindeki Porsche marka elektrikli araç yanmaya başlamıştır. Yangının sebebi kaput altında meydana gelen kısa devredir.	NMC	Çarpışmanın ardından meydana gelen yangın	Çin
31/10/2023	Tesla elektrikli aracında seyir halindeyken yoğun bir duman çıkışı ve yangın meydana gelmiştir. Aracın ön kısmında ve altında hasar meydana gelmiştir.	NMC	Çarpışmanın ardından meydana gelen alevlenme	Çin
25/12/2023	Seyir halindeki Tesla Y model araç yanmaya başlamıştır. Yangını söndürmek için bir saat boyunca 136000 lt su kullanılmıştır.	NMC	Seyir halindeyken meydana gelen patlama	ABD
26/12/2023	Park halindeki elektrikli araç aniden	NMC	Park halinde meydana gelen	Çin

yanmaya başlamış ve yangın diğer araca da sıçramıştır.	patlama

2.17. Kaza Sonrasında Güvenlik Önlemleri

Elektrikli ve hibrit araçlarla meydana gelen kaza durumunda öncelikle sahada keşif ve hızlı durum tespiti yapılması çok kritiktir. Kaza mahalline ulaşıldığında ilk olarak acil müdahale ekipleri tarafından aracın görsel olarak incelenmesi gerekmektedir. Aracın dış kısmındaki amblemler öncelikli görsel unsurlar olmakla birlikte bu amblemlerin çarpışma sonrasında sıklıkla görünmez duruma gelmesi ya da yerinde olmaması mümkün olabilmektedir. Bu yüzden aracın mutlaka her tarafını incelenmesi ve mümkün olması durumunda kaputun altındaki ve aracın iç kısmındaki görsel unsurların da mutlaka değerlendirilmesi gerekmektedir. Yüksek gerilim uyarı etiketleri, araç marka/modeli, şarj portu, egzoz sistemi olmaması, gösterge panelinde yer alan elektrikli ve hibrit araçlara özel görseller veya turuncu yüksek gerilim kabloları bu kapsamda elektrikli ve hibrit araçlar için en temel ayırt edici özellikler olarak değerlendirilebilir (Topal, 2023).

Kaza mahallinde yapılacak müdahaleler öncesinde ilgili aracın hareket edemeyecek şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Kaymaya karşı gerekli tedbirler alınması sonrası, yangın mücadele çalışmaları başlatılmalıdır. Ardından kimyasal sızıntısı ve elektriksel sistemlere dair kontroller yapılmalıdır. Acil müdahale ekipleri için riskler ortadan kaldırıldıktan sonra kurtarma çalışmalarına geçilmesi uygun olacaktır (Topal, 2023).

Batarya içerisinde birikmiş enerji tehlikeli bir durum yarattığından kaza sonrasında elektrikli araçtaki yolcuların ve çevredekilerin güvenliği için araç içerisinde gerekli güvenlik önlemlerinin alınmış olması ve yolcuların hızlı şekilde tahliyesi önemlidir. Elektrikli araç tahliye öncesinde yapılması gereken gözlemler ve güvenlik önlemleri; araç içerisinde gözle görülebilecek herhangi bir hasarın tespiti ardından elektrik

sisteminin devre dışı bırakılması, elektrolit veya soğutucu sıvı sızıntısının meydana gelip gelmediğinin gözlenmesi, herhangi bir gaz, duman çıkışının ya da yangının var olup olmadığının gaz sensörleri, duman dedektörleri ile tespiti olarak özetlenebilir (Zhang ve diğerleri, 2022).

Elektrikli ve hibrit araçları için acil durumlar için uygulanacak ilk müdahale kapsamında, araç tamamen hareketsiz hale getirilmesi sonrası yüksek gerilim sistemlerinin devre dışı bırakılması gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki prosedürlerin uygulanması tavsiye edilmektedir (Topal, 2023).

- Gösterge panelindeki aracın sürüşe hazır olduğunu belirten uyarı ışığı kontrol edilmelidir. Eğer aktif olduğu görülüyorsa, araç güç düğmesinden/kontak anahtarından kapatılmalıdır (Topal, 2023).
- Aracın yardımcı bataryasının (akü) bağlantısının kesilmesi gerekmektedir, bu anlamda 12 V / 24 V akünün negatif (-) ucundan kablonun yerinden çıkarılması uygun olacaktır (Topal, 2023).
- Ayrıca yüksek gerilim tahrik bataryasının, sistemden izolasyonunu sağlamak için ise sistemde yer alan Interlock hattının tespit edilerek, bağlantısının kesilmesi ve MSD çıkarılması (varsa) çıkarılması gerekmektedir. Böylelikle sistem koruma tedbirleri devreye girerek, gerekli acil müdahaleye uygun koşullar sağlanmış olacaktır (Topal, 2023).

Elektrikli ve hibrit araçlarda acil durum müdahale süreçlerine başlamadan önce yukarıdaki prosedürlerin uygulanması sonrası, en az 5 dakika boyunca müdahale etmeksizin beklenilmesi gerekmektedir. Böylelikle yüksek gerilim sistemlerinde yer alan kapasitanslarda deşarjlar gerçekleşecektir. Bu süreçte açıkta yer alan kablolara elektrik akımına kapılma riskini barındırdığı göz önünde bulundurularak, kesinlikle temas edilmemelidir. Sonrasında söz konusu araca dair hiçbir bileşenin ve kablonun bağlantısına, interlock hattı devre dışı bırakılmadan veya MSD açılmadan müdahale edilmemelidir (Topal, 2023).

Ardından batarya paketi ile ilgili güvenlik risklerinin tespiti yapılmalıdır. Elektrikli araçların büyük bir kısmında kaza öncesini, olması halinde ve sonrasında araç durumunu kayıt altına alan bir cihaz (ing. event data recorder-EDR) bulunmaktadır. Bu ekipman ile aracın kaza anındaki genel durumu, batarya voltajı, sıcaklığı, bu değerlerin değişim hızı hakkında bilgi alınabilir. Ayrıca araç tanım numarasına (ing. vehicle identification number-VIN) bakılarak ya da QR kod okutularak batarya durumu öğrenilebilir (Zhang ve diğerleri, 2022).

Batarya durumunun ve güvenlik risklerinin tespiti sonrasında bataryanın kaza alanında deşarjı –batarya şarj durumunun %50'nin altına indirilmesi- görevliler tarafından gerçekleştirilmelidir. Deşarj uygulaması kaza alanının, hava durumunun, zamanın elverişli olup olmamasına, bataryaya erişimin uygun olup olmamasına ve bataryadaki birikmiş enerji miktarına bağlıdır (Zhang ve diğerleri, 2022).

Deşarj işleminin ardından elektrikli aracın daha güvenli bir bölgeye taşınması ve imhası ya da geri dönüşümü gereklidir. Bataryadaki termal kaçağın yangın oluşturma riskine karşılık aracın bir konteyner içerisinde taşınması gerekir (Zhang ve diğerleri, 2022). Aracın güvenliği ve ölümcül bir tehlikenin yaşanmaması için taşınması sırasında benzer önlemler alınabilir. Öte yandan aracın imhası ya da geri dönüşümü için taşındığı bölgenin yerleşim alanından ve yanıcı, patlayıcı maddelerin bulunduğu ortamdan uzak, güvenli bir yer olması önemlidir.

Yüksek gerilim tahrik bataryalarında meydana gelen yangınlar söndürme işlemleri sonrasında yeniden alevlenme durumunun da söz konusu olabileceği unutulmamalıdır. Kaza mahallini terk etmeden önce bir termal kamera kullanarak, yüksek gerilim batarya grubunun tamamen soğuduğundan emin olunması gerekmektedir. Diğer müdahale ekiplerine de yüksek gerilim tahrik bataryasının yeniden yanma riskine sahip olduğunu mutlaka bildirilmelidir. Bu duruma esas yüksek gerilim tahrik bataryalarının açık bir alanda, belli bir süre zarfında, 15-20 metre çevresinde tehlike arz etmeyecek şekilde konumlandırılması ve mutlaka gözetim altında tutulması gerekmektedir. Elektrikli ve hibrit aracın olası kaza sonrası yüksek gerilim batarya grubundan dökülen elektrolit sıvısına doğrudan temas edilmesi veya oluşan bu sıvı birikintisi üzerine basılabileceği

benzer şekilde kimyasal gazların da yayılımından kaynaklı riskler de dikkate alınmalıdır. Müdahale edecek personellerin ilgili standartlara haiz, uygun nitelikte kişisel koruyucu donanımlara (baret, vizör, oksijen maskesi, eldivenler ve ayakkabılar) sahip olması gerekmektedir (Topal, 2023).

Literatürde elektrikli araç yangın modellemeleri ve yangın söndürme yöntemleri üzerine deneysel ve sayısal pek çok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Zhang ve diğerleri (2023), su püskürtme sisteminde bulunan farklı boyutlardaki su parçacığının lityum-iyon bataryada meydana gelen termal kaçağı azaltmadaki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. $1{,}5\ m \times 1\ m\ \times 0.6\ m$ boyutlarındaki yanma odasında gerçekleştirilen deneyler sonucunda farklı boyutlardaki su parçacıklarının bulunduğu su püskürtme sisteminin (sprey nozul basıncının 0,5 MPa ve 0,2 MPa olması durumunda) hem bataryanın termal kaçak sonucunda ulaştığı en yüksek sıcaklığı azalttığı hem de batarya soğuma süresini 204 s'ye kadar kısalttığı gözlenmiştir (Zhang ve diğerleri, 2023).

İki kese tipi hücre arasına yerleştirilen silika aerojel plakalarının batarya termal kaçak oluşumunu önlemeye etkisi Tang ve diğerleri (2023) tarafından incelenmiştir. Deneylerde beş adet kese tipi hücreden meydana gelen bataryada hücreler arasına yerleştirilen silika aerojel plakalarının ısı transferine etkisi gözlenmiştir. Tek plaka yerleştirilmesi durumunda termal kaçağın önlenmesinin çok zor olduğu ve diğer hücrelere 208 W'lık ısı transferi meydana geldiği tespit edilmiştir. Üç plaka yerleştirilmesi durumunda bu miktarın 68 W'a gerilediği dolayısıyla iyi bir yalıtkan görevi gördüğüne ulaşılmıştır (Tang ve diğerleri, 2023).

Gao ve diğerleri (2019), aşırı ısınan lityum-iyon bataryanın soğutucu akışkan ile soğutulması ve oksijen ile söndürülme performansını incelemişlerdir. Üç tip spreyleme yöntemi; sürekli spreyleme, sabit aralıklı sprey uygulaması ve sabit olmayan aralıklı sprey uygulaması deneysel olarak araştırılmış ve kıyaslanmıştır. Eşit miktarda soğutucu akışkan kullanımında sürekli spreylemenin diğer sprey uygulamalarına göre bataryanın

soğutulmasında daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer sprey uygulama yöntemlerinde sprey uygulama sıklığının etkisi incelenmiş ve sprey uygulama sıklığı arttıkça bataryanın soğutulma veriminin arttığı gözlenmiştir (Gao ve diğerleri, 2019).

Zhang ve diğerleri (2020), gaz halindeki yangın söndürme ajanları ($C_6F_{12}O$, CO_2, HFC-227ea) ile su püskürtme sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Bataryanın söndürülmesinde önce her bir ajan tek tek uygulanmış ardından kombinasyon şeklinde uygulanmıştır. Su püskürtme sistemi ile gaz ajanının birlikte daha etkili bir söndürme performansı gösterdiği gözlenmiştir. $C_6F_{12}O$'nun yangını kısa sürede söndürdüğü, CO_2'nin ise daha uzun sürede yangını söndürdüğü, HFC-227ea'nın ise söndüremediği tespit edilmiştir. Kombinasyonlar arasında en etkili yangın söndürme sisteminin su püskürtme sistemi ile $C_6F_{12}O$'nun birlikte kullanıldığı sistem olduğu da çalışmada ifade edilmiştir (Zhang ve diğerleri, 2020).

Liu ve diğerleri (2019), termal kaçak sürecindeki 18650 lityum iyon bataryaya su püskürtme uygulanmasının yarattığı etkiyi incelemişlerdir. Batarya kritik sıcaklığa ulaşmadan su püskürtme sisteminin etkili olduğu gözlenmiştir. Su püskürtme uygulaması ile batarya sıcaklığı 20℃ daha düşüktür. Su püskürtme sistemi ile batarya sıcaklığının 186,5℃ olduğu tespit edilmiştir. %25'lik şarj durumunda su püskürtme sisteminin soğutma miktarı, batarya ısınma miktarının 1,87 katıdır. %100 şarj durumunda bu oran 4,98'dir. Bu çalışma ile su püskürtme sisteminin lityum-iyon batarya termal kaçak sürecini kontrol altına alabildiği sonucuna ulaşılabilir (Liu ve diğerleri, 2019).

Liu ve diğerleri (2020), lityum iyon bataryada termal kaçak oluşması durumunda çıkan yangının söndürülmesi ve bataryanın soğutulması için yangın söndürücü gazlardan dodekaflor-2-metilpenta-3-1 ($C_6F_{12}O$) in ve su püskürtmeli soğutma sisteminin, söndürme ve soğutma etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler; $C_6F_{12}O$ ve suyun bir arada olduğu sistem, sadece $C_6F_{12}O$ nun yer aldığı sistem ve hiçbir söndürme sisteminin yer almaması halinde tekrarlanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Düzenek, 2x2x3,9 m boyutlarında oda içerisinde $C_6F_{12}O$ tankı, su sistemi, kızılötesi görüntüleyici, video kamera, batarya modülü, havalandırma, yangın tespit tüpü, PLC, basınç sensörü,

HF ölçüm cihazı ve termokupllardan oluşmaktadır. 7 adet termokupldan sıcaklık ölçümü alınmıştır. Suyun püskürtüldüğü nozul ve yangın tespit tüpü, bataryadan 60 mm yukarıda bulunacak şekilde yerleştirilmiştir. Su püskürtme sisteminin devreye girme zamanındaki değişimin soğutma performansına etkisi $C_6F_{12}O$ ve su uygulamaları için tespit edilmiştir. $C_6F_{12}O$ uygulamasının ardından su sisteminin devreye girme zamanının 0-30 s arasında değişimi sonucunda en hızlı soğutma uygulamasının 10 s'lik gecikme olduğu çalışmada belirtilmiştir. Gecikme zamanının artmasının batarya soğutma performansını olumsuz etkilediği sonucuna da ulaşılmıştır. Sadece $C_6F_{12}O$ sisteminde bataryanın ulaştığı maksimum yüzey sıcaklığının 536℃, $C_6F_{12}O$-su sisteminde ise 466℃ olduğu ve $C_6F_{12}O$-su sisteminde yaklaşık 1100 s'de batarya sıcaklığının yaklaşık 100℃'ye kadar soğutulduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca su püskürtmeli sistemde basınçtaki değişimin (1, 2, 3 MPa) etkisi de incelenip basınç arttıkça daha hızlı bir soğuma gerçekleştiği ifade edilmiştir. Su sisteminde $KHCO_3$ ve $K_2C_2O_4•H_2O$ gibi katkıların bulunmasıyla söndürme ve soğutma sisteminin geliştirilebileceği de çalışmada saptanmıştır (Liu ve diğerleri, 2020).

Un ve Aydın (2021), kese tipi lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC – $Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$), prizmatik lityum titan oksit (LTO – $Li_4Ti_5O_{12}$) ve silindirik lityum demir fosfat (LFP – $LiFePO_4$) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA - $Li(Ni_xCo_yAl_z)O_2$) bataryaların yangın söndürme ve soğutma testlerini açık alanda 10 kW ve 400 kW gücünde propan gaz ocağının üzerine gerçekleştirmiştir. Toplamda 10 deney üzerinde çalışarak manuel olarak çalıştırılan su söndürme sistemini ve bor bazlı sıvı otomatik söndürme sistemini, var olan yangını söndürme hızı ve sonrasında olası yangını önleme performansları bakımından karşılaştırmıştır. A grubundaki deneylerde NMC, LTO, NCA ve LFP bataryalara manuel su sistemi uygulanmıştır. B grubundaki deneylerde 15 adet 18650 tipi silindirik lityum kobalt oksit (LCO – $LiCoO_2$) bataryalara 1,4 kW gücündeki ısı kaynağından ısı verilerek otomatik bor bazlı sıvı sistemi uygulanmıştır. LCO bataryaların termal kaçak sürecinin yaklaşık 13 dk sürdürdüğü ve bataryanın 8 dk 46 s'de ulaştığı maksimum sıcaklığın 286,7℃ olduğu gözlenmiştir. Aynı deney bor bazlı yangın söndürücünün performansını tespit etmek için tekrarlanmış, batarya 75℃'ye ulaştığında otomatik söndürme sistemi devreye girmiştir, yaklaşık 26 dk sonra batarya sıcaklığının 48℃'ye düştüğü gözleniştir. A grubu

deneyleri sonucunda genel olarak, çok fazla miktarda söndürücü su kullanılmasının söndürme hızını arttırdığı ve sonrasında olası bir yangın riskini önlediği tespit edilmiştir (Un ve Aydın, 2021).

Funk ve diğerleri (2023), yarı kapalı alanda park halindeki 8 adet içten yanmalı motorlu araçla çevrili üç farklı modeldeki (Renault Fluence ZE, Tesla Model 3, Nissan Leaf) elektrikli aracın yangın deneyini gerçekleştirmiştir. Açıklıklar 7,1 m genişliğinde ve 2,4 m yüksekliğinde 2 olup kapalı kısmın uzunluğu 12,2 m'dir. Yangının kaynağı kısa devre olarak tanımlanıp toplamda 9 deney yapılmıştır. Gaz sıcaklık ölçümleri 4 adet K-tipi termokupldan alınmış ve duman yayılımı kızılötesi kameralarla görüntülenmiştir. Yangın söndürme sistemi olarak yangın battaniyesi, su püskürtme sistemi ve su perdesi sistemleri kullanılmıştır. Söndürme sistemleri arasında yangın battaniyesinin söndürme ve batarya soğutmasında en kötü performansı gösterdiği ve batarya soğutulması da göz önüne alındığında en iyi sistemin su püskürtmeli sprinkler sistemi olduğu çalışmada belirtilmiştir. Yangının ilk 5 dakikasında havalandırılan yarı kapalı alanın yalıtılmış tavanına ulaşan duman sıcaklığının 1000°C'nin üzerinde olduğu gözlenmiştir. Deneyler sırasında alev yayınım zamanının 3 dk ile 46 dk arasında değişim gösterdiği ve rüzgar yönünün duman tespit zamanına etkisi de 2 dk olarak ölçülmüştür (Funk ve diğerleri, 2023).

Gavryliuk ve diğerleri (2023), park halindeki Tesla S model elektrikli aracın yangın modellemesini FDS (Fire Dynamics Simulator) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yangının termal etkisinin ve elektrikli araç ile duvar veya park halindeki bir diğer araç arasındaki güvenlik mesafesinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli aracın boyutları $4976 \times 1963 \times 1435$ mm (uzunluk, genişlik, yükseklik), toplam ağırlığı 2100 kg olarak modellenmiştir. Duvar ise yoğunluğu 1950 kg/m^3, ısıl kapasitesi 1,04 kJ/kg.K, birim uzunluk için ışınım yayma oranı 0,9, yutma oranı 0,65 olan tuğladan modellenmiştir. Çalışmada yanma sonu gazlarının maksimum ısı kapasitesi 5200 kW/m^2, alev hızı 0,21 m/s olarak belirtilmiştir. Yangının gelişme zamanı 720 s ve duvarın kritik sıcaklığı 120°C olarak belirlenmiştir. Analizin ilk 12 dakikasında açığa çıkan ortalama ısı miktarı 3 MW olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, yangın gelişme zamanının 600 s olması durumunda elektrikli aracın bina güvenliği için duvar

ile arasındaki mesafenin en az 3 m olması gerektiği sonucuna da ulaşılmıştır (Gavrylluk ve diğerleri, 2023).

Kim ve diğerleri (2024), yanma öncesi ve sırasında lityum iyon bataryaların termal kaçak sürecindeki sıcaklık ve açığa çıkan ısı miktarındaki değişimi sayısal olarak incelemişlerdir. ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde kese tipi lityum iyon bataryanın yanmadan önce termal kaçak sürecinde batarya sıcaklığı 190℃'ye ulaşana kadar sıcaklıktaki artışın yavaş olduğu, bu sıcaklıktan 500℃'ye keskin bir geçiş gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Bataryanın üst yüzeyinde yanmanın gerçekleşmesiyle daha düşük batarya sıcaklığında yaklaşık 60℃'den sonra yaklaşık 450℃'ye ani bir geçiş gözlenmiştir. Yanmanın batarya iç reaksiyon bozunmalarına etkisi çalışmanın bir diğer konusudur. Düşük sıcaklıklarda açığa çıkan ısı miktarının %90'nı katı elektrolit arayüz (ing. solid electrolyte interface-SEI) bozunması kaynaklı, 170-200℃ arasında ısı üretiminde anot-elektrolit reaksiyon bozunmasının daha baskın, 200℃ üzerinde ise katot-elektrolit bozunmasının etkili olduğu tespit edilmiştir. Yanma sonrasında 60℃'de maksimum ısı üretimi -yaklaşık $5 \times 10^6\ W/m^3$ - SEI bozunması tarafından sağlanırken, Anot-elektrolit reaksiyonu, süreç boyunca batarya sıcaklığının artmasında etkili olmuştur (Kim ve diğerleri, 2024).

Gao ve diğerleri (2023), 300 m uzunluğunda, 9 m genişliğinde, 4,5 m yüksekliğinde dikdörtgen kesitli tünel içerisinde gerçekleşen elektrikli araç yangınında salınan duman gazlarının dinamiğini FDS yazılımı üzerinden sayısal olarak incelemişler, blokaj oranındaki ve su püskürtme sisteminin parametrelerindeki değişimin gaz sıcaklığına, yangın kaynağına yakın 3 bölgedeki akışa etkisini tespit etmiştir. Analizler, 20℃ ortam sıcaklığı, tünelin ortasında bulunan gücü 10 MW ve 20 MW olan iki farklı yangın kaynağı, 80 m uzunluğundaki blokaj alanının farklı kesit alanı oranları (0, %10, % 20, %25, %30, %40), farklı nozul açıları (30°, 60°, 90°, 120°, 150°) ve havalandırma hızı 1.25 m/s ve 1.5 m/s için tekrar edilmiştir. Debisi 60 L/dk ve damlacık boyutları 100 μm olan 7 adet nozul tünelin tavanına aralarında 2 m mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Isıl gücün sabit, nozul açısının dikkate alınmadığı durumda tünel içerisinde hiçbir engelin bulunmaması halinde havalandırmanın etkisiyle sıcaklığın en düşük seviyede olduğu, blokaj oranının %10 olması durumunda maksimum sıcaklık, blokaj oranı

arttıkça sıcaklıkta belirgin bir azalma gözlenmiştir. Duman hızındaki değişim incelendiğinde, farklı nozul açılarında hızda belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Blokaj oranı arttıkça duman hızının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın bir diğer konusu ise sabit ısıl güçte blokaj oranı değiştikçe duman gazlarının yayılım uzunluğu olup, blokaj oranı arttıkça uzunluğun arttığı, oran %25 olduğunda uzunluğun sabit kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca boyut analizi ile blokaj oranı ve nozul açısı arasındaki ilişkiyi açıklayan bir bağıntı Gao ve diğerleri (2023) tarafından bulunmuştur. Boyut analizi ile boyutsuz blokaj oranına bağlı boyutsuz kritik hız formülünü elde etmişlerdir (Gao ve diğerleri, 2023).

Ding ve diğerleri (2023), tünel yangınlarında mobil havalandırma ünitesindeki $3 \times 10^5\ m^3/h$'e kadar çıkan fan üfleme hızının duman sıcaklığı dağılımına etkisini ısıl gücün 1-30 MW arasında değişim gösterdiği durum için sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışma alanının 7 m yüksekliğinde, 305 m uzunluğunda olması, yangın kaynağının tünel girişinden 180 m'ye yerleştirilmesi halinde optimum havalandırma hızını, açığa çıkan ısı miktarını, güvenli sayılabilecek minimum tünel yüksekliğini bulmak için FDS'de analizler yapılıp, boyut analizi ile matematiksel model geliştirilmiştir (Ding ve diğerleri, 2023).

Yao ve diğerleri (2024), elektrikli otobüs yangını üzerinde farklı havalandırma koşullarının –farklı rüzgar hızları (0, 2, 4, 6, 8 m/s) ve farklı pencere açıklık durumları (%0, %25, %50, %75, %100)- etkisini FDS yazılımını kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı yangın modelleri oluşturularak sıcaklık ve alandaki karbon monoksit oranları analiz edilmiştir. Analizler sonucunda otobüsün pencere açıklığının %100, rüzgar hızının 8 m/s olması ve otobüsün arka pencerelerinin açık olmasının yangın riskini azalttığı tespit edilmiştir (Yao ve diğerleri, 2024).

Barré ve diğerleri (2024), 2011 Nissan LEAF model park halindeki elektrikli aracın yangın karakteristiklerinden lityum manganez oksit (LMO) bataryadan açığa çıkan ısı miktarını, basınç ventinden geçen gazın içeriği ve gaz miktarını sayısal olarak incelemişlerdir. Aracın tavanı incelendiğinde ısı akısının 200 s'de $72 \pm 3\ kW/m^2$

miktarında stabilize olduğu, en yüksek sıcaklık miktarı $510 \pm 20℃$ olarak bulunmuştur (Barré ve diğerleri, 2024).

Bai ve diğerleri (2024), lityum iyon bataryaya sahip ve yakıtlı araçların tünel içerisindeki yangınını sayısal olarak incelemişlerdir. Geleneksek yakıtlı araçların açığa çıkardığı ısı miktarının elektrikli araca göre daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tünel içerisinde yangın kaynağına yakın bölgelerde yüksek olan sıcaklığın tavana gidildikçe azaldığı, elektrikli aracın yangını sırasında daha fazla miktarda duman ve karbon monoksit çıktığı çalışmada ifade edilmiştir (Bai ve diğerleri, 2024).

Kumar ve diğerleri (2024), 9 adet 26650 tip silindirik lityum-iyon pilden meydana gelen batarya paketinin termal analizini ANSYS Fluent yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada lityum-iyon bataryanın elektrokimyasal modelinde MSMD (Multi-Scale Multi-Domain) yaklaşımının alt modellerinden biri olan NTGK (Newman, Tiedemann, Gu ve Kim) yöntemi kullanılarak 3C deşarj oranında farklı kesitlerdeki (dairesel ve dikdörtgen kesitli) mikro kanalların ve soğutucu sıvı olarak su ve üçlü hibrit nano akışkan türlerinin THNF1 (Al_2O_3 (0,5%), Cu (0,5%), MWCNT (1%)/su) and THNF2 (Al_2O_3 (0,5%), Cu (0,5%), Grafin (1%)/su) batarya soğutma performansına etkisini incelemişlerdir. Enerjinin yanı sıra ekserji analizini de yapmışlardır. Analizler sonucunda optimum mikro kanal tasarımının dikdörtgen kesit ve soğutucu akışkanın THNF2 olarak seçildiği sistem olduğu tespit edilmiştir. Bu sistemde maksimum batarya sıcaklığı 305.237 K ve en düşük sıcaklık farkı 5,23 K olarak hesaplanmıştır. Diğer sistemlere kıyasla, dikdörtgen kesitli mikro kanallı THNF2 sisteminin toplam entropisinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Kumar ve diğerleri, 2024).

Elektrikli araç yangın modellemeleri haricinde literatürde lityum iyon batarya modelleme yaklaşımları üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır.

Zhang ve diğerleri (2023), farklı şarj-deşarj oranlarında (1C, 2C, 3C ve 5C) lityum demir fosfat bataryanın (LF50K) termal analizi yapılmış ve 5C deşarj oranında gerçekleştirilen deneysel çalışma ile sonuçlar doğrulanmıştır. NTGK modeli ile

analizleri gerçekleştirilen lityum-iyon bataryanın maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı değerleri ile GPR-NTGK (ing. Gaussian Process Regression) algoritması ile modellenen bataryanın sonuçları karşılaştırılmıştır (Zhang ve diğerleri, 2023).

Cho ve diğerleri (2023) çalışmalarında, eşdeğer devre modelini enerji dengesine integre ederek yüksek kapasiteli dört adet lityum-iyon bataryanın (57,6 Ah) farklı sabit akım oranlarında (0,5C, 1C, 2C ve 3C) sıcaklığını hesaplayan pil modelini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Batarya modeli olarak iki kapasitörlü ikinci mertebeden ECM'yi seçmişlerdir (Cho ve diğerleri, 2023). Öncelikle, deşarj kapasitesini göz önünde bulundurarak şarj durumunu hesaplamışlar ardından akım değerindeki her artışla hesaplanan direnç değerleri doğrulanmıştır. Şarj durumu, zamana bağlı potansiyel düşüşlerinin iki kapasitörün deneysel verileri ile ifade edildiği prensibe dayanarak hesaplanmıştır. Son olarak çalışmada, termal ECM parametreleri, deneysel veri ve genetik algoritma kullanılarak belirlenmiştir (Cho ve diğerleri, 2023).

Tahir ve Merten (2022) çalışmalarında, lityum-iyon bataryanın faklı akımlarda (1C, 2C, 5C) ve çalışma koşullarında (-10℃ ile 50℃ arası ortam sıcaklıklarında) termal davranışını elektrokimyasal-termal dinamik analizlerle incelemişlerdir. Lityum-iyon bataryanın elektrokimyasal modelinde P2D ve termal olarak 3D modellemeyi esas almışlardır. Ortam sıcaklığının düşük olması halinde elektrolit direnci arttığı için elektrolit viskozitesinin arttığı, bu durumun batarya içerisindeki ısının dolayısıyla batarya sıcaklığının artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Termal model yöntemlerinden ROHC (ing. Reduced Order Horizontal Coupling) yaklaşımının VCM'e (ing. Vertical Coupling Method) göre daha iyi bir doğruluğa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Tahir ve Merten, 2022).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Literatürde yer alan bilgiler ışığında, istatistiki veriler kullanılarak Dünya'da ve Türkiye'de elektrikli araç sayılarının yıllara göre değişimi ve gelecekteki provizyonu grafikler halinde oluşturulmuştur. Dünya çapında 2013 ve 2023 yılları arasındaki trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı verilerine ve 2020 ile 2040 yılları arasında elektrikli araç sayısındaki beklenen gelişmeye yer verilmiştir. Ardından benzer çalışma Türkiye özelinde yapılmıştır.

Aynı zamanda bu çalışmada, elektrikli araç yangın riskleri; şarj istasyonunda bulunma, aracın evden şarj edilmesi ve kapalı otoparkta park halinde bulunması durumunda gruplandırılmıştır. Tanımlanan bu riskler, literatürdeki risk analizi yöntemlerinden risk değerlendirme döngüsü kullanılarak yangın tehlikesi, risk altındaki grupların belirlenmesi, yangın riskinin değerlendirilmesi ve eyleme geçilmesi, planlama ve gözden geçirme adımlarında belirtilmiştir. Öte yandan risk analiz yöntemlerinden risk matrisinden yararlanılarak elektrikli aracın trafikte kaza durumunda, kullanımı sırasında, şarj istasyonunda, otoparkta bulunması halinde yangın risklerinin olabilirliği ve şiddet dereceleri kapsamında risk olasılık çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.1. Risk Analizi

Yangın riski tahmini için temel olarak "Ne olabilir?", "Olsaydı ne kadar kötü olurdu?" ve "Gerçekleşme olasılığı nedir?" sorularının cevaplanması gerekir. Riskin maruz kalma ve istenmeyen sonuçlar olmak üzere iki temel bileşeni vardır. Maruz kalma, belirsizlikle gerçeğe dönüşen potansiyel bir risktir ve bu nedenle maruz kalma, yangın gibi potansiyel risklerdir (Fenerli, 2023).

Neler olabileceğine bağlı olarak olaylar dizisi belirlenir, senaryolar oluşturulur ve yangın ile sonuçlanan bir dizi olay potansiyeline sahip durumlar belirlenir. Olsaydı ne kadar kötü olurdu sorusu ile kayıp potansiyeli tahmin edilir ve genellikle sonuç ya da tehlike olarak adlandırılır. Gerçekleşme olasılığı nedir sorusu ile olayın meydana gelme olasılığı göreceli ya da mutlak bir şekilde tespit edilebilir. Olasılık, objektif olarak kabul

edilebilir ve objektif olarak ölçülebilir; objektif olarak kabul edilebilir ancak sübjektif olarak ölçülebilir; sübjektif olarak kabul edilebilir ve ölçülebilir (Fenerli, 2023).

3.1.1. Risk Değerlendirme Döngüsü

Risk değerlendirme döngüsü; yangın tehlikeleri, risk altındakiler, yangın risk değerlendirme-eyleme geçme, planlama ve gözden geçirme aşamalarından meydana gelmektedir. Yangın tehlikeleri aşamasında yangını oluşturan yanıcı, sıcaklık ve yakıcı (oksijen) üçgenini meydana getiren unsurlar yer almaktadır. Risk altındakiler başlığı ilgili yangının risk grubundan meydana gelir. Değerlendirme ve eylem aşamasında yangının gerçekleştiği yerde olası yangın durumunda yangın söndürücülerin sayısı, otomatik söndürücü sistemler (sprinkler, otomatik gazlı söndürücüler, vb.), konumları, acil çıkış noktalarının, yangın merdivenlerinin sayısı, nerede konumlandırıldıkları, çıkış noktalarının yangın güvenliğinin sağlanıp sağlanmadığı ele alınmaktadır. Planlama aşamasında elektrikli araç yangınıyla mücadele planı, acil durum planı, tahliye planları ve bu planların kayıt altına alınması yer almaktadır. Gözden geçirme başlığı altında yangın risk değerlendirmesinin tamamen gözden geçirilmesi, planların yeni risklere karşı güncellenmesi bulunmaktadır.

3.1.2. Risk Matrisi

Matrisler olasılık yöntemlerinden biridir ve tipik olarak, bir satır boyunca göreceli sonuçlar ve bir sütun boyunca göreceli olasılıklar bulunur. Matris başka yöntemlerin de temelini oluşturan, kullanımı basit ve uygulaması en yaygın yöntemlerden birisidir. Risk olabilirlik ve şiddetin derecesi olmak üzere iki bileşenden oluşur. Bahse konu her bir risk (R) için; riskin zaman bağlı meydana gelme ihtimali “olabilirlik” (O) ve riskin meydana gelmesi durumunda ortaya çıkabilecek sonucun “şiddet derecesi” (Ş) belirlenebilmektir. Risk değeri, olasılık ve şiddetin değerlerinin çarpılmasıyla elde edilen değerdir. Risk seviyeleri bu değerlere göre belirlenir. Belirlenen şiddet dereceleri ve olasılık değerlerinin çarpımı sonucunda elde edilen değer 1- 6 arası düşük seviye risk; 8-12 arası orta seviye risk; 15-25 arası ise çok yüksek seviye risk olarak belirlenir (Fenerli, 2023).

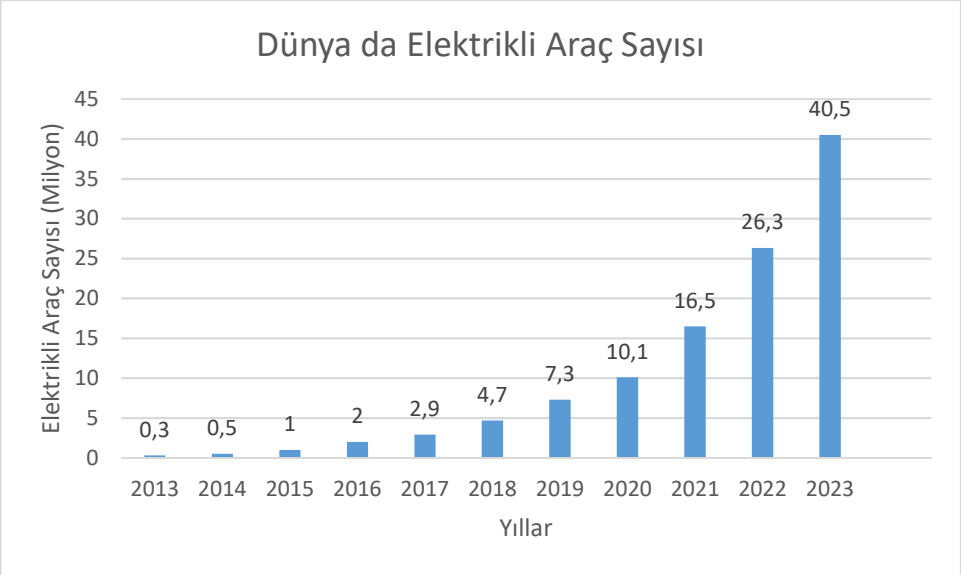
Olabilirlik tablosu, bir olayın meydana gelme ihtimalini tespit edebilmek amacıyla kullanılır. Olabilirlik tablosunda olayın meydana gelme sıklığına göre nitel ve nicel derecelendirmeler yapılmaktadır (Fenerli, 2023). Olabilirlik tablosu elektrikli aracın yangın risk olasılığını derecelendirmektedir. Tabloda 1'den 5'e kadar derecelendirme yapılmış olup bunlar nitel olarak çok küçük, küçük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde belirtilebilir.

Gerçekleşmesi olası bir olay sonucundan beklenen zararın derecesini belirlemek için şiddet dereceleri belirlenir. Çok hafif, hafif, orta, ciddi, çok ciddi olmak üzere 1' den 5' e kadar şiddet derecelendirmesi yapılır (Fenerli, 2023).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

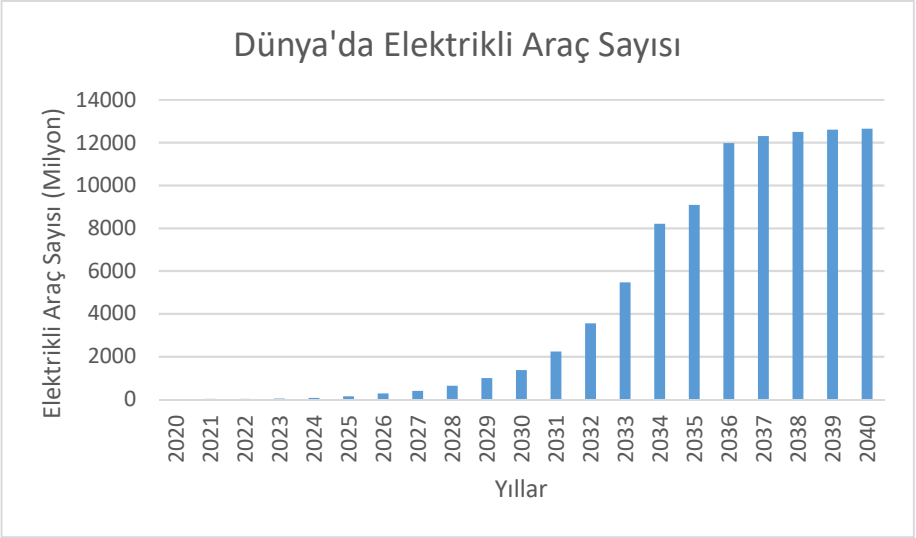
4.1. Elektrikli Araç İstatistiği

Dünya'da ve Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayılarının yıllara göre değişimi ve gelecekteki beklenti grafik olarak Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3 ve Şekil 4.4.'te gösterilmektedir. Şekil 4.1.'de 2013-2023 yılları arasında Dünya'daki elektrikli araç sayılarındaki değişim verilmektedir. Bu grafiğe göre elektrikli araç sayısındaki en yüksek artış 2022 ve 2023 yılları arasında %54'lük bir değer ile gerçekleşmiştir.



Şekil 4.1. Dünya'da trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı (IEA, 2024).

Şekil 4.2.'de Dünya çapında 2013-2023 yılları arasındaki var olan elektrikli araç sayısı ve 2030 yılında kullanımda olması beklenen elektrikli araç sayısı gösterilmektedir. Şekil 4.2.'deki grafiğe göre 2030 yılında Dünya genelinde yaklaşık 1,36 milyar, 2040 yılında 12,65 milyar elektrikli aracın kullanımda olması beklenmektedir. 2036 ve 2040 yılları arasında elektrikli araç sayısındaki artışın azaldığı belirtilebilir.

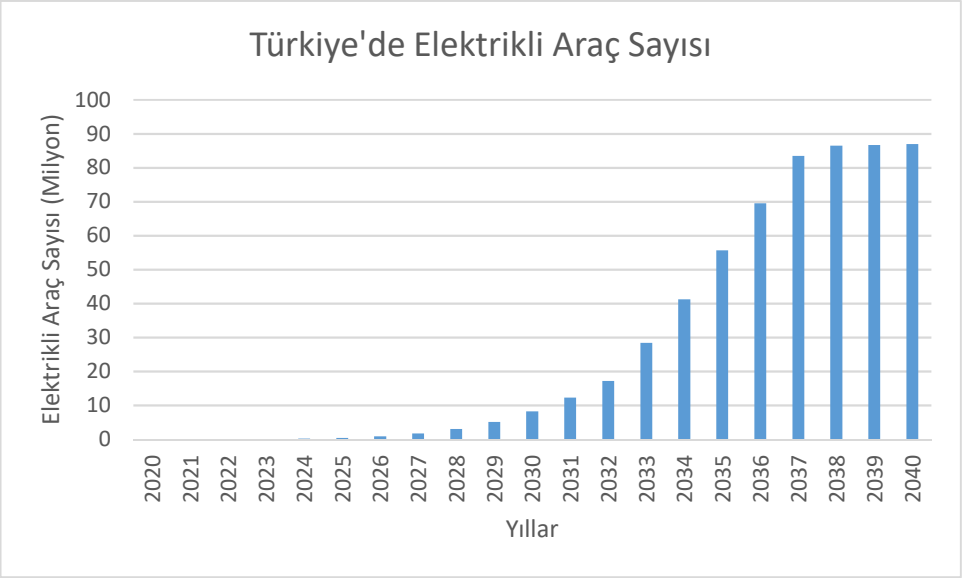


Şekil 4.2. Dünya'da trafiğe kayıtlı elektrikli araç provizyonu.

2011-2024 yılları arasında Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı Şekil 4.3.'teki grafikte verilmektedir. Bu grafiğe göre 2023-2024 yılları arasında elektrikli araç sayısında yaklaşık %130'luk bir artış gerçekleşmiştir. Son bir yılda gerçekleşen bu artış en yüksek değerdir.



Şekil 4.3. Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı (TÜİK, 2025).



Şekil 4.4. Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç provizyonu.

Şekil 4.4.'te Türkiye'deki kayıtlı elektrikli araç sayısındaki değişim ve 2030 yılı öngörüsü grafik olarak gösterilmektedir. Grafiğe göre 2030 yılında var olan elektrikli araç sayısının yaklaşık 8,2 milyona ulaşabileceği ve 2040 yılında bu değerin yaklaşık 87 milyona ulaşabileceği ifade edilebilir. Elektrikli araç sayısındaki artışın 2037 ve 2040 yılları arasında dengelendiği keskin bir artışın yaşanmadığı söylenebilir.

4.2. Elektrikli Araç Yangın Riskleri

Elektrikli araçta meydana gelebilecek yangın riskleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Aracın maruz kalacağı yüksek gerilimden dolayı oluşacak ısı ve bataryadaki yüksek sıcaklık.
- Bataryadaki yüksek sıcaklık sonucu termal kaçağın oluşması.
- Akım atlaması, elektrik çarpması ve kıvılcım riski.
- Bataryanın söndürülmesinin ardından tekrar alevlenme riski.
- Bataryada mekanik hasar sonucu meydana gelebilecek elektrolit sızıntısı ve batarya ile temas edilmesi durumunda ciltte reaksiyon oluşması.
- Yanma sırasında araç bataryasından zehirli gaz çıkışı sonucunda solunumda sıkıntı yaşanması.

- Elektrikli aracın trafikte ya da park halinde olması durumunda meydana gelen yangının diğer araçlara yayılabilmesi.
- Yangının şarj istasyonunda meydana gelmesi halinde yangının önlenememesi durumunda enerji besleme noktasında ateşlenme ve patlamaların meydana gelmesi.
- Şarj istasyonunda yüksek gerilim hattının izolasyonunun yüksek ısı nedeniyle hasar görmesi.
- Kapalı otoparkta gerçekleşen elektrikli araç yangını sırasında açığa çıkan toksik gazların güvenli bir şekilde bölgeden uzaklaştırılamaması.

4.2.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Yangın Riskleri

4.2.1.1. Evden Şarj Riskleri

Elektrikli araçların evden şarj edilebilmesine yönelik riskler:

- Araçların evden şarj edilmesi sırasında yüksek gerilim farkından dolayı ev prizinde kıvılcım ve alevlenme riski, kısa devre oluşumu.
- Hasar görmüş elektrik aksam, kablolar, yüksek gerilim bataryaları ile şarj işlemi sırasında ortaya çıkabilecek yüksek voltaj şoku.
- Aşırı şarj sonucu batarya hücresinde lityum dendrit büyümesi ve iç kısa devre oluşumu.
- Aşırı ısınma sonucu batarya hücresinde separatörün bozunması, elektrolit buharlaşması, anot ve katot bozunması, iç kısa devre oluşumu.
- Şarj kablolarının hasar görmesi sonucunda kısa devre oluşumu.
- Evin kapalı garajında gerçekleştirilen şarj işlemi sırasında olası sel riski, elektrik çarpması ve devamında yangın riski.
- Akımdaki dalgalanmalar nedeniyle batarya çevrim ömrünün azalması ve elektrik kaynaklı yanlış kullanım, termal kaçak riski.
- Evden şarj sırasında aşırı şarj nedeniyle ortaya çıkabilecek bataryadaki aşırı ısınma, yangın ve bataryanın patlama riski.

4.2.1.2. Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarındaki Riskler

Türkiye'de elektrikli araç şarj istasyonlarındaki riskler:

- Şarj istasyonunda özellikle hızlı şarj modunda elektrikli araç bataryasında iç kısa devre riski ve bunun sonucunda termal kaçak riski.
- Şarj bağlantı noktasında nem kaynaklı kısa devre oluşumu.
- Açık ortamda bulunan şarj istasyonunun enerji besleme noktasının aşırı ısınması ve patlama riski.
- Açık ortamda bulunan şarj istasyonuna yıldırım çarpma riski, şarj istasyonunun hasar görmesi, kısa devre oluşumu.
- Aşırı şarj esnasında batarya hücresinde iç kısa devre oluşumu.
- Şarj istasyonunda termal kaçak sonucunda meydana gelen yangının çevredeki araçlara yayılması, yangının önlenemez hale gelmesi.
- Elektrikli aracın şarj istasyonuna çarpması sonucu enerji besleme noktasının hasar görmesi.
- Açık alanda bulunan şarj noktalarının dış ortam koşulları nedeniyle hasara uğraması ve yangın olasılığının bulunması.
- Hasara uğrayan şarj kablolarının kullanımıyla ortaya çıkan kısa devre ve elektrik çarpma riski.
- Şarj noktalarında akımda meydana gelen dalgalanmaların elektrikli araç bataryasının çevrim ömrünü beklenen zamandan önce azaltması ve bu durumun iç kısa devreyi tetiklemesi, yangın riski.

4.2.1.3. Kapalı Otoparklardaki Riskler

Kapalı otopark ve garajlara yönelik riskler:

- Elektrikli araçta meydana gelen yangının park halindeki diğer araçlara ve otopark binasına yayılması.
- Elektrikli araç yangını sırasında lityum iyon hücrelerin, batarya paketinin, plastiğin yanması ile meydana gelen hidrojen florür ve hidrojen klorür gibi

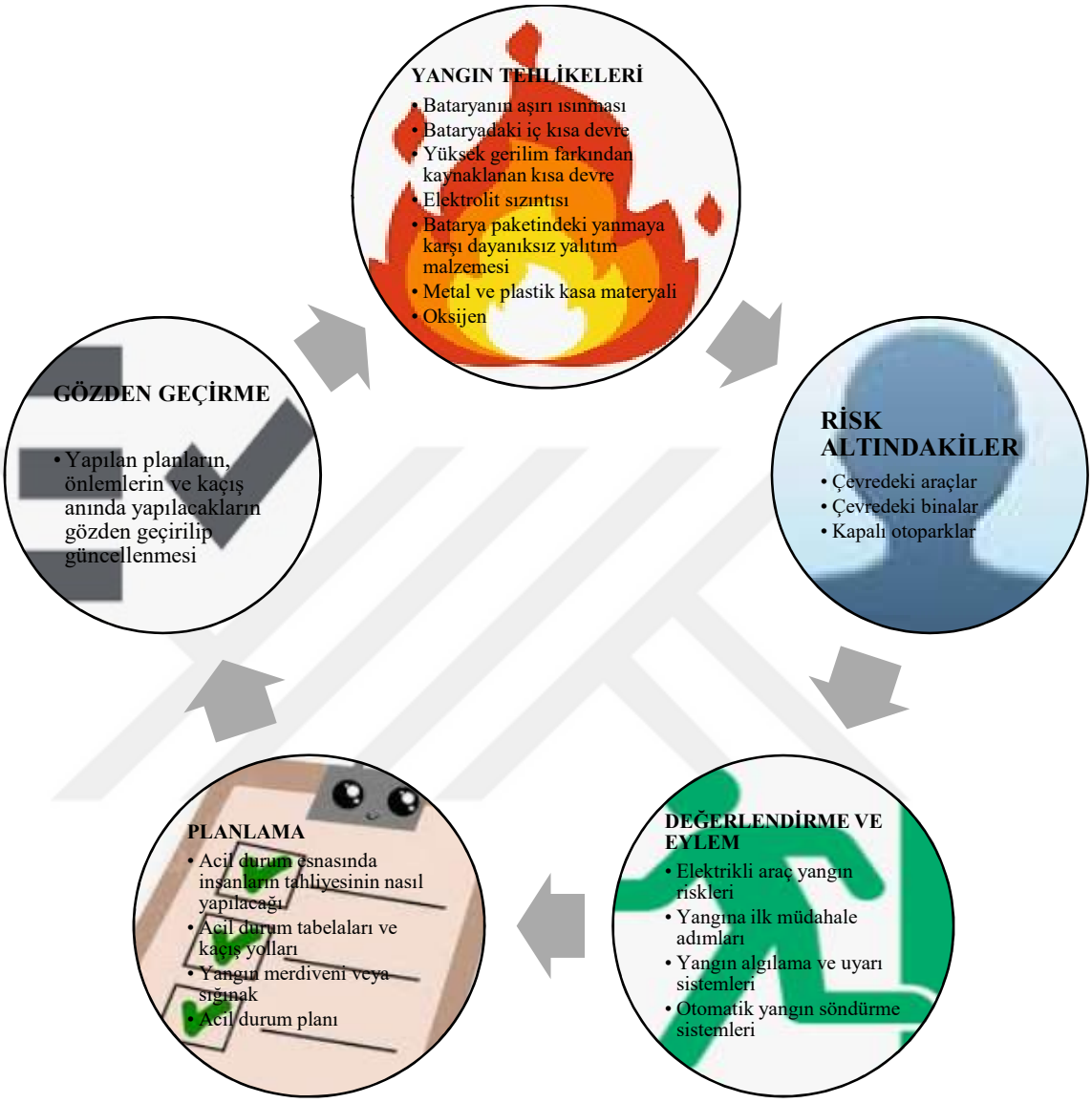
zehirli gazların yeterince tahliye edilememesi sonucunda olası zehirlenmeler, batarya hücrelerinde meydana gelen patlamalar.

- Çevredeki araçlardan birinde yakıt sızıntısının meydana gelmesi ve bunun sonucunda oluşabilecek yangın riski.
- Elektrikli araçta soğutma sisteminin arızalanması sonucu soğutma sıvısındaki sızıntının araç elektrik aksamına teması ile kısa devre oluşumu.
- Elektrikli araç bataryasında mekanik kaynaklı yanlış kullanım sonucunda elektrolit sızıntısının meydana gelmesi, yangın riski.
- Ortamda yanıcı patlayıcı ürün veya aracın bulunması durumunda oluşacak patlamalar.
- Kapalı otoparkta meydana gelebilecek sel riski ve sel sonucunda elektrikli araç bataryasında kısa devre oluşumu, elektrik çarpma riski.

4.3. Risk Değerlendirmesi ve Risk Matrisi

Şekil 4.5.'te elektrikli araç yangınları için oluşturulan risk değerlendirme döngüsü gösterilmektedir. Bu döngüde ilk adım olası yangın tehlikelerinin belirlenmesidir. Elektrikli araç yangınlarında bataryanın dış ortam kaynaklı aşırı ısınması, batarya içerisinde aşırı şarj veya deşarj kaynaklı iç kısa devrenin meydana gelmesi ve batarya kimyasının bozulması, mekanik hasar kaynaklı elektrolit sızıntısı, bataryanın kısa devreye uğraması, batarya paketinin yalıtım malzemesi, koruyucu çerçeve ve yanıcı gaz olan oksijenle temas başlıca yangın tehlikelerini oluşturur. İkinci adım, risk altındaki grupların tanımlanması. Elektrikli araç yangınları özelinde bu grupta öncelikle çevredeki araçlar, eğer yangın kapalı otoparkta meydana geliyorsa yapı elemanları yer alır. Yangın risk değerlendirmesi ve eylem üçüncü adımı oluşturur. Bu adımda şarj istasyonlarında, kapalı otoparklarda veya trafikteki elektrikli araç yangın riskleri incelenmekte yangına ilk müdahale adımları, güvenlik gerekliliklerinin neler olduğu, yangın algılama, uyarı sistemleri, yangın söndürme sistemleri belirlenmektedir. Dördüncü adım, acil durum anında yapılacakların planlanmasıdır. Acil durum anında yapılacaklar arasında tahliye yollarının nerede konumlandırıldığı, acil durum tabelalarının nerede bulunduğu, kaç kaçış yolunun bulunduğu, sığınak veya yangın merdiveninin yer alıp almadığı incelenmektedir. Son aşama tüm bu risk

değerlendirmelerinin, planlamanın gözden geçirildiği, değiştirildiği ve güncellendiği gözden geçirme aşamasıdır.



Şekil 4.5. Elektrikli araç yangın güvenliği risk değerlendirmesi.

Elektrikli aracın kazaya karışması durumunda yangının olabilirlik tablosu Çizelge 4.1.'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Kazaya bağlı olabilirlik tablosu.

OLABİLİRLİK-NİCEL	OLABİLİRLİK-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Küçük	Olay yerinde yangının olmaması ve elektrikli aracın bataryasında sorun olmaması
2	Küçük	Bataryada hasar olması fakat yangının gerçekleşmemesi
3	Orta	Bataryanın hasarlı olması ve yangının başlaması
4	Yüksek	Elektrikli aracın yanması ve bataryanın yangına dahil olmaması
5	Çok Yüksek	Elektrikli araç yangınına bataryanın dahil olması

Kazaya yönelik şiddet derecesi tablosu Çizelge 4.2.'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.2. Kazaya bağlı şiddet derecesi tablosu.

ŞİDDET-NİCEL	ŞİDDET-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Hafif	Müdahale gerektirmeyen durum
2	Hafif	Gözlem altında bulunulan durum
3	Orta	Yangına ilk müdahalenin gerçekleştirildiği, yangının başlangıçtaki durumu
4	Ciddi	Yangının elektrikli aracın tamamını kapladığı durum
5	Çok Ciddi	Yangının kazaya karışan diğer araca sirayet etmesi

Çizelge 4.3.'te kazaya bağlı risk matrisi gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Kazaya bağlı risk matrisi.

Risk Matrisi	ŞİDDET				
OLABİLİRLİK	1	2	3	4	5
1	Çok hafif seviye risk 1	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 5
2	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 10
3	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 9	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 15
4	Düşük seviye risk 4	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 16	Yüksek seviye risk 20
5	Düşük seviye risk 5	Orta seviye risk 10	Yüksek seviye risk 15	Yüksek seviye risk 20	Yüksek seviye risk 25

Trafikte elektrikli aracın kullanımı sırasında risk olabilirlik tablosu Çizelge 4.4.'te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Trafikteki elektrikli aracın risk olabilirlik tablosu.

OLABİLİRLİK-NİCEL	OLABİLİRLİK-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Küçük	Titreşim sonucunda bataryada mekanik hasar meydana gelmesi
2	Küçük	Batarya soğutma sisteminin arızalanması
3	Orta	Bataryanın anot, katot ve separatörünün bozunması
4	Yüksek	Bataryadan elektrolit sızıntısının gerçekleşmesi
5	Çok Yüksek	Bataryanın yüksek sıcaklığa maruz kalması sonucu bataryanın aşırı ısınması

Elektrikli aracın kullanımı esnasında risk şiddet derecelendirmesi Çizelge 4.5.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Kullanım esnasında elektrikli aracın risk şiddet derecesi tablosu.

ŞİDDET-NİCEL	ŞİDDET-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Hafif	Müdahale gerektirmeyen durum
2	Hafif	Yangının başlangıcında ilk müdahalenin gerçekleştirilmesi
3	Orta	Elektrikli aracın sadece batarya modülünde yangının meydana gelmesi
4	Ciddi	Aracın kullanılamaz hale gelmesi
5	Çok Ciddi	Yangının diğer araçlara yayılması ve can kaybı

Çizelge 4.6.'da trafikteki elektrikli aracın normal kullanımı sırasında risk olabilirlik ve şiddet derecesi tabloları kullanılarak risk matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.6. Trafikteki elektrikli araca yönelik risk matrisi.

Risk Matrisi	ŞİDDET				
OLABİLİRLİK	1	2	3	4	5
1	Çok hafif seviye risk 1	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 5
2	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 10
3	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 9	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 15
4	Düşük seviye risk 4	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 16	Yüksek seviye risk 20
5	Düşük seviye risk 5	Orta seviye risk 10	Yüksek seviye risk 15	Yüksek seviye risk 20	Yüksek seviye risk 25

Şarj istasyonundaki elektrikli aracın şarj esnasında karşılaşabileceği risk olasılıkları Çizelge 4.7.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk olabilirlik tablosu.

OLABİLİRLİK-NİCEL	OLABİLİRLİK-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Küçük	Şarj bağlantı noktasında nem kaynaklı kısa devre oluşumu
2	Küçük	Yüksek gerilim hattı izolasyonunun hasar görmesi sonucu elektrik çarpması
3	Orta	Açık ortamda bulunan şarj istasyonunun enerji besleme noktasının aşırı ısınması
4	Yüksek	Aşırı şarj sonucunda elektrikli araç bataryasında kısa devre oluşumu
5	Çok Yüksek	Kapalı garajda bulunan şarj istasyonunda patlama riski

Çizelge 4.8.'de şarj istasyonuna yönelik risk şiddet derecelendirmesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.8. Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk şiddet derece tablosu.

ŞİDDET-NİCEL	ŞİDDET-NİTEL	DERECELENDİRME
1	Çok Hafif	Müdahale gerektirmeyen durum
2	Hafif	Gözlem altında bulunulan durum
3	Orta	Termal kaçak oluşumunun batarya modülüne yayılması
4	Ciddi	Bataryadaki yangının batarya paketine yayılması
5	Çok Ciddi	Şarj istasyonu enerji besleme noktasının büyük hasar görmesi, şarj noktasında yangın ve patlama, yangının elektrikli aracın tamamını kapladığı durum

Şarj istasyonundaki elektrikli araca bağlı risk matrisi Çizelge 4.9.'da verilmektedir.

Çizelge 4.9. Şarj istasyonundaki elektrikli araca yönelik risk matrisi.

Risk Matrisi	ŞİDDET				
OLABİLİRLİK	1	2	3	4	5
1	Çok hafif seviye risk 1	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 5
2	Düşük seviye risk 2	Düşük seviye risk 4	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 10
3	Düşük seviye risk 3	Düşük seviye risk 6	Orta seviye risk 9	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 15
4	Düşük seviye risk 4	Orta seviye risk 8	Orta seviye risk 12	Yüksek seviye risk 16	Yüksek seviye risk 20
5	Düşük seviye risk 5	Orta seviye risk 10	Yüksek seviye risk 15	Yüksek seviye risk 20	Yüksek seviye risk 25

4.4. Önlemler

4.4.1. Batarya

- Batarya üretim sürecinde etkili bir batarya termal yönetim sisteminin batarya paketine entegrasyonu. Bunlar hava soğutmalı, sıvı soğutmalı, PCM, ısı borusu ve termoelektrik eleman ile soğutma olarak gruplandırılmaktadır.
- Uluslararası standartlara uygun batarya testlerinin gerçekleştirilmesi.
- Batarya termal yönetim sisteminde yer alan pompa, kompresör, fan gibi ekipmanların periyodik olarak bakım ve kontrollerinin yapılması, herhangi bir sıvı sızıntısının meydana gelip gelmediğinin saptanması.
- Yüksek gerilim tahrik batarya sistemlerinde ilgili güvenlik anahtarlamalarının (MSD konektörü) ve ilave DC devre kesicilerin elektrikli araçlarda yer alması.

4.4.2. Şarj İstasyonu

- Şarj istasyonunun yetkili firmalar ve uzmanlar tarafından kurulmalıdır.
- Kurulumu uzmanlarca yapılan şarj istasyonunun periyodik bakım ve denetimlerinin uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmelidir.
- Yangın algılama sistemlerinin örn. duman dedektörü şarj istasyonu bölgesinde konumlandırılmalıdır. Alarm sistemlerinin TS-EN 54 standardına göre kurulumu ve düzenli olarak bakımları yapılmalıdır. Yangın kaçış yollarında yangın uyarı butonları bulunmalıdır.
- Yangın riskine karşı elektrikli araç içerisindeki batarya sıcaklığını tespit eden termal kameraların da şarj istasyonlarına harici ışık kaynağına maruz kalmayacak şekilde yerleştirilmesi.
- Şarj istasyonuna çarpma riskine yönelik şarj istasyonu enerji besleme noktası bariyer ile korunmalıdır.
- Yüksek gerilim riskine bağlı olarak şarj istasyonlarında topraklama ve yeterli yalıtımın sağlandığından emin olunmalıdır.
- Yüksek gerilim şoku nedeniyle şarj noktalarında uzatma kablosu kullanılmamalıdır, elektrikli aracın ve şarj besleme noktasının su ile temasından kaçınılmalıdır.
- Şarj istasyonlarına yangının bir süre ilerlemesini durdurmak amacıyla araçlar arasına yerleştirilecek biçimde yangına en az 90 dakika dayanıklı yangın duvarları kurulmalıdır.
- Şarj noktalarının yakınında yangın söndürücüler ve özel elektrikli araç yangın battaniyelerinin sağlanması gerekmektedir.
- Şarj kabloları, güç bağlantı noktaları yağmur, aşırı sıcak ve soğuk gibi dış ortam koşullarından zarar görmesini engelleyecek şekilde korunmalıdır.
- Elektrikli araç şarj noktalarında yangın veya duman algılama sistemleriyle bağlantılı olarak çalışan şarj noktasının güç kaynağı ile bağlantısını devre dışı bırakan otomatik ayırma anahtarı sağlanmalıdır.
- Şarj noktaları aşırı akım korumasına, eğim/darbe ve sıcaklık sensörlerine, hasar arıza raporlamasına sahip olmalıdır.

- Elektrikli araçlar arasındaki güvenli mesafenin bilgisayar destekli sayısal çalışmalarla tespit edilmesi, buna göre mesafenin arttırılması gerekmektedir.
- Kapalı otoparkta bulunan şarj istasyonunda olası sel riskine karşı elektrikli araç park yerinin yerden daha yüksek bir yerde konumlandırılması gerekmektedir.
- Açık alanda bulunan şarj noktalarına yıldırım çarpma riskine karşı paratoner yerleştirilmelidir.

4.4.3. Otopark

- Kapalı otoparklar yangına dayanıklı malzemeden yapılmış yangın bölgelerine ayrılmış yapıda tasarlanmalıdır. Elektrikli araçlar bu bölgelere yerleştirilmelidir.
- Yapıda yangın duvarları, duman perdelerinden yararlanılarak elektrikli araçta çıkan yangının diğer araçlara yayılması önlenebilir.
- TS-EN 54'e göre yangın algılama ve uyarı sistemlerinin örn. siren, flaşör ve acil anons sistemleri kurulumu ve periyodik bakımlarının gerçekleştirilmelidir. Yangın uyarı butonları zeminden en az 110 cm, en fazla 130 cm yüksekliğe yerleştirilmelidir.
- Elektrikli araçlarda termal kaçak durumunun gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edebilen termal görüntüleme kameraları yerleştirilmelidir.
- Yangın söndürme sistemlerinden sprinkler yağmurlama sistemi, otomatik gazlı söndürme sistemi, kimyasal kuru toz ve yangın battaniyesi uygulamaları gerçekleştirilmeli, periyodik olarak denetlenmelidir.
- Kapalı otoparklarda duman tahliyesi için basınçlandırma, duman tahliye fanları ve ventilasyon kapakları uygulanabilir.
- Yangın anında ısıtma soğutma havalandırma ekipmanları, yangın damperi devreye alınabilir.
- Araçlar arasındaki mesafe yangın güvenliği açısından yapay zeka uygulamalarından makine öğrenmesi kullanılarak arttırılmalıdır.
- Otoparklarda yer alan elektrikli araç şarj istasyonlarına çarpışma koruması kurulmalıdır.

- Çarpışma olasılığını azaltan bir otopark düzeni için iyi görülebilen çizgiler ve aydınlatma, araçların manevra kabiliyetine uygun mesafeler, sütunlara kauçuk pedler sağlanması gerekmektedir.
- Sel riskine karşı özellikle elektrikli araç park yerleri yerden yüksekte bulunmalıdır, bariyer ile korunmalıdır.

4.4.4. Eğitim

- Sprinkler sistem gerekliliklerinin ve diğer yangın güvenlik ölçütlerinin yer aldığı bina kodlarının ve standartların güncellenerek bina sakinlerinin ve özellikle elektrikli araç kullanıcılarının bilgilendirilmesi ve bu standartların, kodların rahatlıkla görülebilecek bölgelere asılması.
- Site sakinlerinin acil durum müdahale yöntemleri, tahliye anı hakkında bilgilendirilmesi.
- Acil durum tatbikatlarının düzenli olarak yapılması.
- Acil çıkış kısımlarının ve varsa yangın merdiveni tabelalarının uygun yerlere asılması ve standartlara uygun olarak ışıklandırılması.

5. SONUÇ

Çevre dostu elektrikli araçlarda bulunan lityum iyon bataryaların termal, mekanik veya elektriksel hasara uğraması durumunda yangına yol açan termal kaçak süreci meydana gelmektedir. Bataryanın çivi penetrasyonuna maruz kalması mekanik kötüye kullanım, bataryanın çevre koşulları nedeniyle aşırı ısınması termal kötüye kullanım, bataryada aşırı şarj ve deşarj elektriksel kötüye kullanım olarak adlandırılır. Mekanik, termal ve elektriksel kötüye kullanım bataryanın anodunda, separatöründe, elektrolitte, katodunda kimyasal bozunmalara devamında iç kısa devreye, bataryanın aşırı ısınmasına ve uygun ortamın bulunması halinde yangına sebep olmaktadır.

Lityum iyon bataryalarda çıkan yangının söndürülmesi diğer yangınlara göre zor olup batarya içerisinde kimyasal reaksiyonlar devam ettiği için yeniden alevlenmesi kaçınılmazdır. Elektrikli araç yangınlarında söndürme performansı bakımından en kötü madde karbondioksit olup en etkili söndürücü HFC-227ea'dır. Su bazlı yangın söndürücüler de iyi bir performans göstermektedir fakat su reaksiyona girip zehirli bir gaz olan hidrojen florürü açığa çıkarır ve etkili bir söndürme için su kullanımı oldukça fazla olmalıdır.

Şarj istasyonlarının yaygınlaşmasıyla elektrikli araçlar pek çok yangın riski barındırmaktadır. Bunlar; yüksek gerilim hattı izolasyonunun hasar görmesi, elektrik çarpma riski, şarj istasyonu enerji besleme noktasının hasar görmesi durumunda yangının meydana gelmesi, yangının diğer araçlara yayılması, toksik gazların açığa çıkması, zehirli dumanın tahliyesinin zorlaşması ve zehirlenme riski, elektrikli araç bataryasında aşırı ısınma veya aşırı şarj kaynaklı iç kısa devre oluşumu, termal kaçak riski olarak ifade edilebilir. Bu riskleri azaltmanın yollarından biri şarj istasyonun bulunduğu yarı kapalı alanın veya kapalı otoparkların yangına dirençli yapı elemanlarından inşa edilmesi, yangının yayılmasını önleyen yangın duvarları ve duman perdelerinin yerleştirilmesidir. Bir diğer önlem, otomatik yangın söndürme sistemlerinin devreye alınmasıdır. Öte yandan, yangın algılama ve uyarı sistemlerinin kontrolü, şarj istasyonlarının denetimi periyodik olarak yapılmalı, çevreye açık ortamda yer alan şarj noktalarında dış ortamdan koruyucu bariyer kurulumu yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Bai, Z. P., Yu, Y. Y., Zhang, J. Y., Hu, H. M., Xing, M. Y., & Yao, H. W. (2024). Study on fire characteristics of lithium battery of new energy vehicles in a tunnel. *Process Safety and Environmental Protection*, *186*, 728-737.

Barré, P. A., Carlotti, P., & Guibaud, A. (2024). Numerical investigation of the influence of thermal runaway modelling on car park fire hazard and application to a Lithium-ion manganese oxide battery. *Fire Safety Journal*, *150*. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104284

Batmaz, Ü. (2023). Elektrikli araçlarda batarya teknolojileri. *Mühendis ve Makina*.

Baturar, O. (2023). *Lityum iyon bataryaların termal performansının sayısal incelenmesi ve optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Erciyes Üniversitesi.

Cho, H., Hong, C., Hong, D., Oh, S., & Kim, Y. (2023). Thermal Equivalent Circuit Model and Parameter Estimation For High-Capacity Li-Ion Cell. *Journal of Electrochemical Society*, *170*.

Coşgun, İ. (2022). *Havaalanlarında yangın riskleri ve yangın güvenliği: havalimanı örneği* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Rumeli Üniversitesi.

Dilbaz, F. (2023). *Lityum iyon bataryaların termal yönetimi için sayısal çalışmalar* [Yüksek Lisans Tezi]. Manisa Celal Bayar Üniversitesi.

Ding, Y., Mei, J., Zhang, J., Li, X., Lu, K., & Li, C. (2023). Study of Temperature Distribution and Smoke Movement by Mobile Ventilation During Emergency Rescue in Tunnel Fires. *Thermal Science and Engineering Progress*, *46*.

Eğin, G. (2019). *Elektrikli araçların batarya sistemlerinde ısı yönetimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Fenerli, B. (2023). *Sanayi bölgelerinde risk analizi ve değerlendirmesi odaklı yangın güvenliği tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi.

Funk, E., Flecknoe-Brown, K. W., Wijesekere, T., Husted, B. P., & Andres, B. (2023). Fire Extinguishment Tests of Electric Vehicles in an Open Sided Enclosure. *Fire Safety journal*, *141*.

Gao, Q., Liu, Y., Wang, G., Deng, F., & Zhu, J. (2019). An experimental investigation of refrigerant emergency spray on cooling and oxygen suppression for overheating power battery. *Journal of Power Sources*, *415*, 33-43. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.052

Gao, Y., Jiang, C., Cui, K., Fu, Q., & Li, Y. (2023). Numerical Study On The Effects of Blockage Ratio and Spraying Angle On The Smoke Flow Characteristics of New Energy Vehicle Fires in Tunnels. *Thermal Science and Engineering Progress*, *42*.

Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., Rudyk, Y. (2023). Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*, *11*(3). 421-434. doi:10.4271/09-11-03-0013

IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024*.

Indu, K., & Aswatha Kumar, M. (2023). Electric Vehicle Control and Driving Safety Systems: A Review. *IETE Journal of Research*, *69*(1), 482-498.

Kaptan, D. (2016). *Energy efficiency increase at the electric vehicles* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Karamangil, M. İ., Sürmen, A., & Tekin, M. (2023). Elektrikli Araçlarda Batarya Yangınlarına Genel Bakış. *Fuels, Fire and Combustion in Engineering Journal*, *11*(1), 29-40. Doi: 10.52702/fce.1224612

Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2019). Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied thermal engineering*, *149*, 192-212.

Kim, R. H., Lee, D. H., Kim, Y. K., Chu, C. H., & Lee, Y. G. (2024). Numerical Analysis of Thermal Runaway Process of Lithium-Ion Batteries Considering Combustion. *Journal of Energy Storage*, *78*.

Kong, L., Li, C., Jiang, J., & Pecht, M. G. (2018). Li-ion battery fire hazards and safety strategies. *Energies*, *11*. doi:10.3390/en11092191

Kumar, K., Sarkar, J., & Mondal, S. S. (2024). Analysis of Ternary Hybrid Nanofluid in Microchannel-cooled Cylindrical Li-ion Battery Pack Using Multi-Scale Multi-Domain Framework. *Applied Energy*, *355*.

Li, Z., Cong, J., Ding, Y., Yang, Y., Huang, K., Ge, X., Chen, K., Zeng, T., Huang, Z., Fang, C., & Huang, Y. (2024). Strategies for Intelligent Detection and Fire Suppression of Lithium-Ion Batteries. *Electrochemical Energy Reviews*, *7*(32). https://doi.org/10.1007/s41918-024-00232-x

Liu, B., Tang, X., & Gao, F. (2020). Joint Estimation of Battery State-of-charge and State-of-health Based On a Simplified Pseudo-two-dimensional Model. *Electrochimica Acta*, *344*.

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*.

Liu, T., Liu, Y., Wang, X., Kong, X., & Li, G. (2019). Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist. *Energy Conversion and Management*, *199*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111969

National Transportation Safety Board. (2020). *Safety risks to emergency responders from lithium-ion battery fires in electric vehicles.* https://www.ntsb.gov/safety/safety-studies/Documents/SR2001.pdf

Sun, P., Huang, X., Bisschop, R., & Niu, H. (2020). A review of battery fires in electric vehicles. *Fire Technology*, *56*, 1361-1410.

Tahir, M. W., & Merten, C. (2022). Multi-Scale Thermal Modelling Experimental Validation and Thermal Characterization of a High-power Lithium-ion Cell For Automobile Application. *Energy Conversion and Management*, *258*.

Tang, J., Wu, X., Ren, J., Min, H., Liu, X., Kong, Y., Che, P., Zhai, W., Yang, H., & Shen, X. (2023). Suppressing thermal runaway propagation of nickel-rich Lithium-ion battery modules using silica aerogel sheets. *Process Safety and Environmental Protection*, *179*. 199-207. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.100

TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2024). *Elektrikli araçların kullanımı ve yangın güvenliği.* https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/ELEKTR%C4%B0KL%C4%B0%20ARA%C3%87LARIN%20KULLANIMI%20VE%20YANGIN%20G%C3%9CVENL%C4%B0%C4%9E%C4%B0_rapor_tammetin.pdf

Topal, O. (2023). Türkiye'de Elektrikli ve Hibrit Araçlar için Acil Müdahale Yaklaşımları. *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, *2*(3). 190-206.

TÜİK. (2025). *Trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı*.

Un, C., & Aydın, K. (2021). Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*, *3*(3).

Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, *73*, 95-131.

Yao, H., Xing, M., Song, H., Zhang, Y., Luo, S. & Bai, Z. (2024). The Impact of Different Ventilation Conditions on Electric Bus Fires. *Fire*, *7*(182). https://doi.org/10.3390/fire7060182

Yıldırım, M. (2022). *Elektrikli araçlarda güvenlik önlemleri* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi.

Yılmaz, E. B. (2023). *Lityum iyon batarya paketi tasarımı ve termal kaçak simülasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Yu, Q., Nie, Y., Peng, S., Miao, Y., Zhai, C., Zhang R., Han, J., Zhao, S., & Pecht, M. (2019). Evaluation of the safety standards system of power batteries for electric vehicles in China. *Applied Energy*, *349*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121674

Zhang, B., Bewley, R. L., Tanim, T. R., & Walker, L. K. (2022). Electric vehicle post-crash Recovery-Stranded energy issues and mitigation strategy. *Journal of Power Sources, 552.* https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232239

Zhang, J., Zhang, L., Sun, F., & Wang, Z. (2018). An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application. *IEEE, 6,* 23848-23863. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2824838

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.* https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101801

Zhang, Y., Peng, W., Liu, X., Ren, J., Zang, X., Xie, Q., & Li, J. (2023). Experimental study on suppression of thermal runaway in lithium-ion battery by mixed particle size water mist. *Process Safety and Environmental Protection, 179.* 189-198. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.084

Zhang, Y., Liu, H., Liu, S., Pan, S., Tian, C., Hu, J. & Li, C. (2023). Prediction Model of Termal Behavior of Lithium Battery Module Under High Charge-Discharge Rate. *Journal of Energy Storage*, *74*.

Zhao, J., Lv, Z., Li, D., Feng, X., Wang, Z., Wu, Y., Shi, D., Fowler, M., & Burke, A. F. (2024). Battery engineering safety technologies (BEST): M5 framework of mechanisms, modes, metrics, modeling, and mitigation. *eTransportation*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.etran.2024.100364

https://worldmetrics.org/electric-vehicle-fire-statistics/ (Erişim Tarihi: 11/10/2024)

https://news.metal.com/newscontent/101541585/there-have-been-6462-electric-vehicle-fire-accidents-across-the-country-this-year-and-the-market-penetration-of-lithium-electric-plates-has-increased (Erişim Tarihi: 11/10/2024)

https://www.mynrma.com.au/electric-vehicles/basics/understanding-electric-vehicle-fires (Erişim Tarihi: 11/10/2024)

https://www.bbc.com/news/uk-england-66866327 (Erişim Tarihi: 11/10/2024)

https://www.hurriyet.com.tr/gundem/son-donemde-tartismalara-konu-oldu-elektrikli-araclarda-yangin-riski-diger-araclara-gore-daha-mi-yuksek-arastirmalar-ve-uzmanlar-ne-diyor-42369172 (Erişim Tarihi: 11/10/2024)

https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars (Erişim Tarihi: 04/02/2025)
https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/turkiyede-elektrikli-otomobil-sayisi-bir-yilda-yuzde-130-artti/3461020#:~:text=Trafi%C4%9Fe%20kay%C4%B1tl%C4%B1%20elektrikli%20otomobil%20say%C4%B1s%C4%B1nda,artarak%20183%20bin%20776%20oldu. (Erişim Tarihi: 04/02/2025)