

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELETRİKLİ ARAÇLARDAKİ
YANGINLAR VE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ**

HÜSEYİN ALYAR

KOCAELİ 2022

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELETRİKLİ ARAÇLARDAKİ
YANGINLAR VE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ**

HÜSEYİN ALYAR

Dr. Öğr. Üyesi Necmi Cemal ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Nuran YÖRÜKEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 17.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

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

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

beyan ederim.

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

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

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

(İmza)

Hüseyin ALYAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

(İmza)

Hüseyin ALYAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, elektrikli araçlardaki yangınlar ve müdahale yöntemlerinin neler olduğunu açıklamıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, tecrübelerini her fırsatta aktaran, bana güvenen ve motive eden değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Necmi Cemal ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2022

Hüseyin ALYAR



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİ GENEL BİR BAKIŞ	2
2.1. Elektrikli Araçların Tarihi	2
2.2. Elektrikli Araba Çeşitleri ve Çalışma Esasları	4
2.2.1. Batarya Elektrikli Araç (BEV)	5
2.2.2. Hibrit Elektrikli Araç (HEV).....	7
2.2.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araç (PHEV).....	7
2.2.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (FCEV)	8
2.3. Batarya Çeşitleri	9
2.3.1. Lityum İyon Piller	9
2.3.2. Nikel Kadmiyum	15
2.3.3. Nikel Metal Hidrür	16
2.3.4. Kurşun Asit.....	16
2.3.5. Karşılaştırma Tablosu.....	18
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA AKÜ YANGINLARININ İNCELENMESİ	19
3.1. EA Pilleri ve Yangın Riskleri.....	19
3.2. EA Yangınlarının Tehlikeleri	24
3.3. Yangınla Mücadele Testleri.....	28
3.4. BEV'leri İçeren Tipik Yangın Kazaları	33
3.5. Batarya ile İlgili Geçmiş EA Yangın Kazalarından Dersler.....	38
4. YANGIN GÜVENLİĞİ	40
4.1. Pil Hücresi Seviyesi.....	41
4.2. Pil Modülü Seviyesi	42
4.3. Pil Paketi Seviyesi	42
4.4. Araç Seviyesi	43
5. YANGINDAN KORUNMA VE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ.....	44
5.1. Lityum İyon Pilin Yangından Korunması	44
5.1.1 Doğal Korunma Yöntemleri	44
5.1.2. Güvenlik Cihazları.....	46
5.1.3. Yangın Algılama.....	48
5.2. Müdahale Yöntemleri	50
5.2.1. Söndürme Sistemleri	52
5.2.2. Elektrikli Araçların Belirlenmesi.....	59
5.2.3. Elektrik Risklerini Azaltma	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR.....	64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	73



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	1899 Yılı lohner-porsche electric coupe.....	2
Şekil 2.2.	1912 Yılı columbus electric coupe.....	3
Şekil 2.3.	Geçmişten günümüze elektrikli araçlar.....	4
Şekil 2.4.	Elektrikli araçların mimarisi.....	5
Şekil 2.5.	Batarya elektrikli araç yapısı.....	6
Şekil 2.6.	BEV yapılandırması.....	6
Şekil 2.7.	Hibrit elektrikli araç yapısı.....	7
Şekil 2.8.	Plug-in hibrit elektrikli araç yapısı.....	8
Şekil 2.9.	Yakıt hücreli elektrikli araç yapısı.....	9
Şekil 2.10.	LIB ilkesinin şeması.....	10
Şekil 2.11.	Silindirik ve prizmatik LIB konfigürasyonlarının şekillerini ve bileşenlerini gösteren şematik çizim.....	12
Şekil 2.12.	Farklı hücre konfigürasyonlarına sahip pil takımı tasarımının şemaları.....	12
Şekil 2.13.	Kurşun asitli akünün şarj ve deşarjı sırasındaki reaksiyonları.....	17
Şekil 3.1.	Tipik EA pil hücreleri.....	21
Şekil 3.2.	Litum iyon bataryalar optimum ömür ve güvenliği garanti etmek için sınırlı bir sıcaklık ve şarj aralığında çalışmalıdı.....	23
Şekil 3.3.	a) LIB'ler tipik olarak güvenli bölge b)Nissan leaf için pil düzeni.....	24
Şekil 3.4.	LIB'lerin depolanan enerjisi ve kütlesi.....	26
Şekil 3.5.	Yangınla mücadele testi.....	29
Şekil 3.6.	N-heptan ile 8. dakikada görülen ark parlaması.....	30
Şekil 3.7.	Destekleyici heptan ateşi hala varken LIB 2'nin bir PRD'sinin açılmasından sonra alev parlamasının meydana gelmesi.....	31
Şekil 3.8.	LIB Muhafazasına (mavi) monte edilen sensörün sıcaklık özellikleri ve muhafazanın altına monte edilmiş sensör (kırmızı).....	32
Şekil 3.9.	LIB 2 alevlerini söndürdükten sonra beyaz duman/buhar meydana geldi.....	32
Şekil 3.10.	Bir Lifan 650 EV'nin araç şasisine takılı pil takımında yangının başladığı ve EA'nın etkin yangın söndürme olmadan yangınla yok olma durumu.....	35
Şekil 3.11.	Şarj esnasında yanan bir elektrikli araç.....	35
Şekil 3.12.	Tesla Model S Seattle, ABD yakınlarında bir çarpışmadan sonra alev aldı.....	36
Şekil 3.13.	Son yıllardaki tipik EA yangın kazaları: (a) Renault-Samsung elektrikli araç modeli 'SM3.Z.E' 15 Ocak 2016'da Kore'de sürüş sırasında alev aldı (Moon, 2016) (b) 26 Nisan 2015'te Shenzhen, Çin'de bir şarj istasyonunda tamamen pilli bir elektrikli otobüs alev aldı ve bu elektrikli otobüs alev aldığında şarjda değildi (Pecht, 2015); (c) Bir Tesla Model S, 15 Haziran 2018'de ABD, Kaliforniya'da sürüş esnasında duman çıktı. Yangında 1135 L su ve köpük enjekte edilerek söndürüldü (NTSB, 2018) ; ve (d) EA yangın kazası 20 Mayıs 2018'de Hangzhou, Çin'de bir otoparkta meydana geldi.....	38

Şekil 4.1. EA'lar için pil yangın güvenlik sistemi seviyelerinin şematik diyagramı	40
Şekil 5.1. Bir araç modeli içindeki EA pil takımlarının tam ölçekli yangın söndürme testi	55
Şekil 5.2. Elektrikli araç üzerinde kurulu durumdaki yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürücüler	56
Şekil 5.3. Batarya paketi içerisine monte edilmiş aerosol yangın söndürücü.....	57

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. PHEV'ler için pil türlerinin karşılaştırması	18
Tablo 3.1. Üç tipik pil hücresinin temel parametreleri	22
Tablo 3.2. Belirli bir model ve aralık testi ile seçilen BEV için pil takımı bilgileri	22
Tablo 3.3. Tam ölçekli EA yangın testlerinden kaynaklanan zehirli gaz emisyonlarının listesi	28
Tablo 3.4. Son birkaç yılda bazı LIB yangın ve patlama kazaları	34
Tablo 3.5. 2018 yılında meydana gelen bazı elektrikli araç yangınlarının listesi.....	37
Tablo 4.1. BYS'nin akü sistemini koruyamadığı/koruyamadığı kötüye kullanım durumlarına ilişkin basitleştirilmiş bir genel bakış	47
Tablo 5.1. Bir araç modelinde iki Li-ion EA pil takımı için yangın söndürme testi	54
Tablo 5.2. LIB'nin güvenli bir şekilde bağlantısını kesmek için alınacak önlemlere ilişkin genel yönergeler.....	60
Tablo 5.3. EDUCAM'a göre EA'lar üzerinde çalışırken gerekli olan kişisel ve toplu koruma ile güvenlik ekipmanı	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Yüzey alanı (m ²)
Ah	: Amper-saat
E	: Enerji
I	: Akım
m	: Kütle (kg)
q	: Isıl yük (W)
r	: Silindir, küre yarıçapı (m)
T	: Sıcaklık (°C veya K)
t	: Zaman (sn)
V	: Gerilim
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
η	: Verim
%SOC	: Şarj durumu, (%)

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
ARN	: Automotive Recycling in the Netherlands (Hollanda'da Otomotiv Geri Dönüşümü)
BEV	: Battery Electric Vehicle (Batarya Elektrikli Araç)
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EA	: Elektrikli Araç
EDUCAM	: Electrical Car Training (Elektrikli Araba Eğitimi)
FCEV	: Fuel Cell Vehicle (Yakıt Hücreli Elektrikli Araç)
HEV	: Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Araç)
ICAO	: International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)
ICE	: Internal Combustion Engine (İçten Yanmalı Motor)
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
LIB	: Lityum-İyon Batarya
Li-ion	: Lityum İyon
LMO	: Lityum Mangenez Oksit
LTO	: Lityum Titanat Oksit
NFPA	: National Fire Protection Association (Ulusal Yangından Korunma Kurumu)
NiCd	: Nikel Kadmiyum
NiMH	: Nikel Metal Hidrat
NMC	: Lityum Nikel Mangenez Kobalt Oksit
PHEV	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in Hibrit Elektrikli Araç)
PTC	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı
SAE	: Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
SOC	: State of Charge (Şarj Durumu)

ELETRİKLİ ARAÇLARDAKİ YANGINLAR VE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ

ÖZET

Bu çalışma, mevcut literatürün gözden geçirilmesiyle lityum iyon pilli karayolu taşıtlarının yangın güvenliği konusundaki endişeleri ele alınmıştır. Elektrikli araçlar (EA) ve lityum iyon bataryalar (LIB) hakkında temel bilgiler sunuldu. Lityum iyon pillerin kullanımı, uygun performans ve menzile sahip elektrikli araçlar geliştirmenin anahtarı olmuştur. Bu teknolojinin birçok avantajı vardır. Ancak yangın ve gaz emisyonlarına ilişkin riskler, geleneksel yanmalı motorlara sahip araçlardan farklıdır. Çalışmada; ısı salınımı, yangın, gaz patlamaları, yanıcı ve zehirli gaz emisyonu ile ilgili konular ile akü arızası durumunda aracı ve çevresini koruma yolları anlatılmaktadır. Yangın riskleri ve güvenlik çözümleri ile ilgili konular araştırıldı. Elektrikli araçlarda (EA) son zamanlarda meydana gelen pil yangınlarının yanı sıra ilgili yangın güvenliği konularını ve yangından korunma stratejilerini incelemektedir. Li-ion pilin (LIB) yangın riski ve tehlikesi, sürüş performansı ve şarj hızındaki yüksek talepler, kaçınılmaz trafik kazaları, pil paketlerinin artan ölçmeği ve enerji yoğunluğu nedeniyle özellikle elektrikli araçlarda önemlidir. EA yangınının risk ve tehlikesine ilişkin niteliksel bir anlayış sağlamak için EA'lara ait yangın kazaları gözden geçirilmiştir. Elektrikli araçların pazar payı önümüzdeki yıllarda da sürekli artacağı düşünüldüğünde elektrikli araç yangın kazalarında artışın meydana gelmesi muhtemeldir. Şimdiye kadar, yüksek maliyet ve ticari sınırların kısıtlanması nedeniyle sınırlı sayıda tam ölçekli EA yangın testi yapılmıştır. Bununla birlikte, mevcut test sonuçları, EA yangınının ısı yayma oranının fosil yakıtlı araç yangınınınkiyle karşılaştırılabilir olduğunu, EA yangınının ise yanan Li-ion pillerden HF gibi daha fazla zehirli gaz salabileceğini ortaya koydu.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Lityum İyon Piller, Yangın Güvenliği, Yangın Riskleri.

FIRE IN ELECTRIC VEHICLES AND RESPONSE METHODS

ABSTRACT

This study addressed the fire safety concerns of road vehicles with lithium-ion batteries through a review of the available literature. Basic information about electric vehicles (EA) and lithium-ion batteries (LIB) was presented. The use of lithium-ion batteries has been key to developing electric vehicles with appropriate performance and range. This technology has many advantages. However, the risks associated with fire and gas emissions are different from vehicles with conventional combustion engines. In the study; issues related to heat release, fire, gas explosions, flammable and toxic gas emissions and ways to protect the vehicle and its environment in case of battery failure are explained. Issues related to fire risks and security solutions were investigated. It examines recent battery fires in electric vehicles (EV) as well as related fire safety issues and fire protection strategies. The fire risk and danger of the Li-ion battery (LIB) is especially important in electric vehicles due to high demands on driving performance and charging speed, inevitable traffic accidents, increased scaling of battery packs and energy density. Fire accidents of battery powered EVs are reviewed to provide a qualitative understanding of the risk and hazard of EV fire. Considering that the market share of electric vehicles will increase continuously in the coming years, it is likely that an increase in electric vehicle fire accidents will occur. To date, a limited number of full-scale EV fire tests have been conducted due to the high cost and restriction of trade secrets. However, the current test results revealed that the heat release rate of EV fire is comparable to that of fossil fuel vehicle fire, while EV fire can release more toxic gases such as HF from burning Li-ion batteries.

Keywords: Electric Vehicles, Lithium-Ion Batteries, Fire Safety, Fire Risks.

1. GİRİŞ

Giderek artan yakıt sorunlarıyla birlikte, insanların arabalarını sürmek için daha iyi enerji formları kullanmaları gerekli hale gelmiştir. Günümüzün elektrikli otomobillerinin ortaya çıkmasının nedeni de budur. Çok verimli olmaları ve çok daha az enerji tüketmeleri ile bilinen çevre dostu otomobillerden biridir. Elektrikli otomobil kullanma fikri, tüm dünyada yaşanan yakıt kıtlığı nedeniyle zorunlu hale gelmiştir.

Elektrikli araç teknolojisi şu anda gelişiminin üçüncü yüzyılındadır ve muhtemelen önümüzdeki yıllarda çok daha hızla ilerleyecektir.

Elektrikli kara taşıtları, içten yanmalı motorlu taşıtların sahip olduğu ticari başarıyı yakalayamamıştır. Ancak pil teknolojisi artık o noktaya kadar gelişmiştir. Gelecekteki pil gelişmeleri önümüzdeki birkaç yıl içinde elektrikli karayolu araçlarının kullanımını hızlandırması muhtemeldir.

Elektrikli araçların çevresel faydaları arasında; sıfır egzoz emisyonu, fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması ve genel karbon emisyonlarının azaltılması sayılabilir (Larminie J. ve Lowry J 2003).

Elektrikli araçlar, bir elektrik motoru kullanır ve tahrik için elektrik gücüne dayanır. EA terimi genellikle karayolu taşıtlarını ifade eder. Ancak daha genel olarak raylı taşıtları, yüzey ve su altı gemilerini ve havacılık uygulamalarını da içerebilir. Bu çalışmada, bu terim, tamamen veya kısmen bir li-ion pil ile çalışan elektrikli otomobillerle sınırlandırılmıştır. Bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler) yalnızca elektrik enerjisine dayanırken, plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler) ve hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) ayrıca içten yanmalı bir motorla çalıştırılabilir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİ GENEL BİR BAKIŞ

2.1. Elektrikli Araçların Tarihi

Elektrikli otomobillerin tarihi 19. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Elektrikli otomobilin icadı birden fazla mucitlere atfedilir. 1828'de bir Macar olan Ányos Jedlik o zamanlar yeni motor tipiyle çalışan küçük bir araba modeli üretti. 1834'te ilk elektrikli araç Thomas Davenport tarafından icat edilmiştir. 1859'da Gaston Plante şarj edilebilir bataryayı icat etmiş ve o zamanki EA'ların en büyük sorunlarından biri olan sürekli batarya değişimi problemine çözüm getirerek maliyetlerin azaltılmasını sağlamıştır (Sulzberger, 2004).

İçten yanmalı motorun geliştirilmesinden önce, elektrikli otomobiller bu konuda hız ve menzil gibi birçok rekora sahipti. Bu rekorların en önemlilerinden biri, 29 Nisan 1899'da 100 km/s rekoruydu. Şekil 2.1'de 1899 yılına ait bir elektrikli araç gösterilmektedir. Thomas Davenport, bir araca elektrik motoru takan ilk kişilerden biri olmasına rağmen, geleneksel anlamda elektrikli otomobil 1891 yılına kadar geliştirilmemiştir (URL-1).



Şekil 2.1. 1899 Yılı lohner-porsche electric coupe

Teknik sınırlamalar nedeniyle, bu ilk elektrikli otomobillerin maksimum hızı yaklaşık olarak 32 km/s. 1900'lerin başında, nispeten düşük hızlarına rağmen, elektrikli arabaların bir dizi özelliği, rakiplerine göre avantajları vardı. Titreşim, kokulu ve gürültülü değillerdi. Benzinli arabalarda vites değiştirmek sürüşün en zor kısmıydı, elektrikli arabalarda vites değişimine gerek yoktu. Elektrik arabalar ayrıca, sürüşe başlamak için manuel çaba gerektirmediği için de avantajlıydı. Elektrikli arabalar, daha kolay olması nedeniyle genellikle kadın sürücülere uygun araçlar olarak satıldı. İlk

elektrikli arabalar “kadın arabaları” olarak bile tanıtıldı. Şekil 2.2’de 1912 yılına ait bir elektrikli araç gösterilmiştir (URL-1).



Şekil 2.2. 1912 Yılı columbus electric coupe

1900'lü yıllarda, yakıt kıtlığı ve çevre krizleri nedeniyle EA'ların talep edildiği kısa bir dönem vardı. Bununla birlikte, 1930'lardan sonra petrol ve benzinin ucuzlaması ve kolay bulunmasıyla elektrikli araçlara olan ilgi azaldı ve benzinle çalışan araçların daha hızlı ve daha uzağa seyahat etmesini sağladı (Grauers ve diğ., 2013). Bugün, petrolün yaklaşık %87'sini veya küresel enerjimizin yaklaşık %33'ünü tüketen milyarlarca içten yanmalı motorlu araç kullanılmaktadır (Dudley ve Dale, 2018). Bununla birlikte, sınırlı doğal enerji kaynakları, artan dünya nüfusu ve küresel ısınma, insanların enerji kırılganlığı algısını ve daha sürdürülebilir ulaşım çözümlerine duyulan ihtiyacı arttırmaktadır.

1990'lardan bu yana LIB'nin hızlı gelişimi ile birlikte, EA'lar 21. yüzyılda küresel sahneye geri döndü. Günümüzde EA'lar sadece yeşil ulaşımın bir sembolü değil, aynı zamanda olağanüstü sürüş performansı da sunmaktadırlar (Matulka, 2019). Bununla birlikte, geçen yüzyılda sürekli kullanım ve gelişme gösteren içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında, EA'lar, özellikle de algılanan yangın güvenliği söz konusu olduğunda, hala olgunlaşmaktan uzaktır. Bu güvenlik endişesi, elektrikli otomobilin hakim ulaşım sistemi haline gelmesine engel olmaktadır (Bisschop ve diğ., 2019).

EA'ların önümüzdeki yıllarda çok daha yaygın kullanılacağı beklentisi egemen durumdadır. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, birçok firma EA konusunda büyük atılımlar yapmaya başlamıştır.

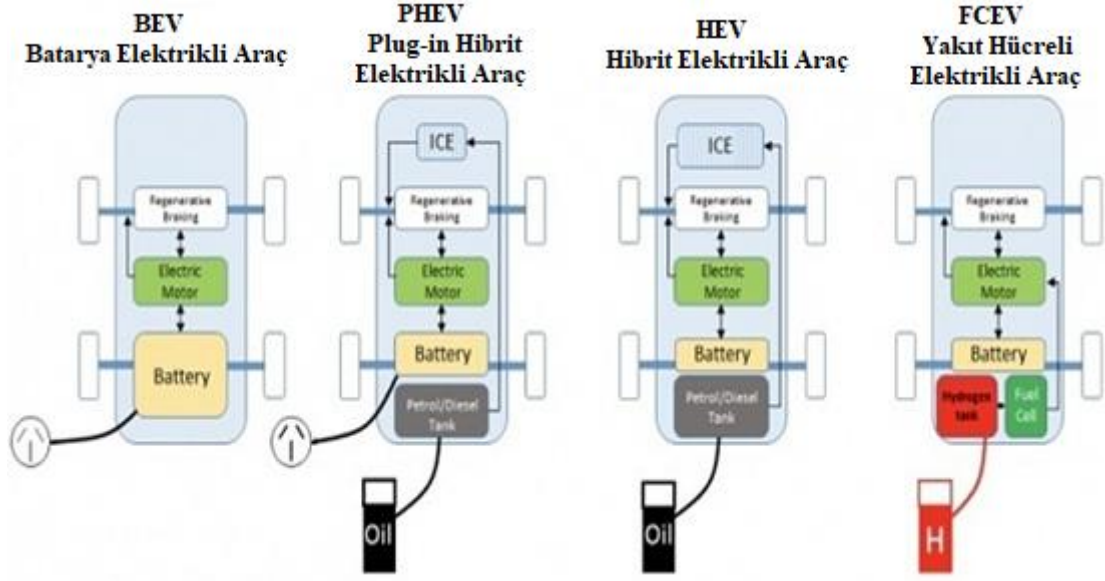


Şekil 2.3. Geçmişten günümüze elektrikli araçlar

2.2. Elektrikli Araba Çeşitleri ve Çalışma Esasları

Kompakt otomobiller ve sedanlardan spor arazi araçlarına ve kamyonetlere kadar çeşitli araç tiplerinde sunulan modellerle elektrikli araç pazarı hızla gelişmektedir. Elektrik Araçlardan bazıları yalnızca pille çalışır, bazıları ise hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motora sahip hibrit modellerdir.

Elektrikli otomobil türleri dört ana başlıkta değerlendirilebilir. Bunlar; Batarya Elektrikli Araç (BEV), Plug-in Hibrit Elektrikli Araç (PHEV), Hibrit Elektrikli Araç (HEV) ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (FCEV). Bahsedilen elektrikli otomobillere ait sistem mimarisi Şekil 2.4'de görülebilir.



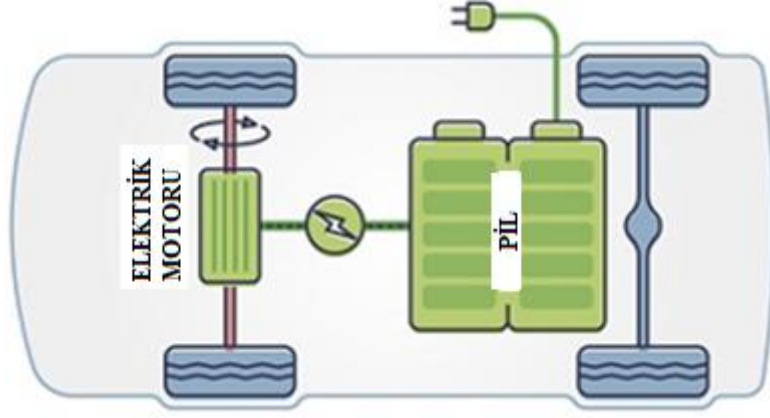
Şekil 2.4. Elektrikli araçların mimarisi

2.2.1. Batarya Elektrikli Araç (BEV)

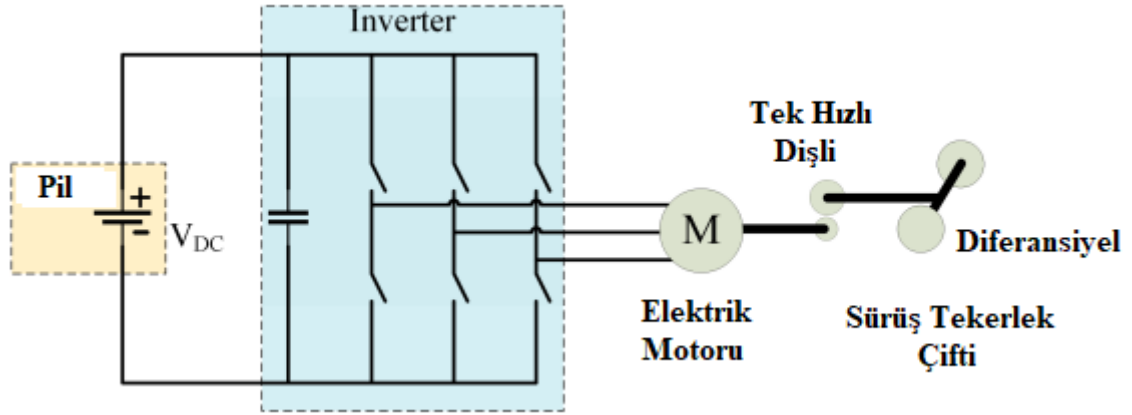
Tamamen pille çalışan bir elektrikli aktarma organı üzerinde çalışır. Aracı sürmek için kullanılan elektrik, elektrik şebekesine bağlanarak şarj edilebilen büyük bir pil paketinde depolanır. Şarj edilmiş pil takımı daha sonra elektrikli arabayı çalıştırmak için bir veya daha fazla elektrik motoruna güç sağlar. Ana bileşenler; Elektrik motoru, İnverter, Akü, Kontrol Modülü, Aktarma organlarıdır.

BEV'ler içten yanmalı motorları yoktur ve herhangi bir sıvı yakıt kullanmazlar. Bir BEV'nin teknik yapısı ICEV'e kıyasla daha basittir. Çünkü marş, egzoz veya yağlama sistemi yoktur. Çoğunlukla dişli kutusu yoktur ve bazen bir soğutma sistemine bile ihtiyaç duyulmaz. BEV'ler, kabul edilebilir bir performans sağlamak için normalde büyük pil paketleri kullanır. Bunlar hibrit ve plug-in hibritlere göre daha verimlidir.

Tipik bir BEV'in menzili 160 ile 250 km arasındadır. Ancak bazılarıyla tek bir şarjla 500 km'ye kadar seyahat edilebilir. Bu tip araçlara bir örnek olarak %100 elektrikli olan ve şu anda 62 kWh pil sağlayan Nissan Leaf verilebilir (URL-3). Şekil 2.5'de batarya elektrikli araç yapısı görülmektedir. Şekil 2.6'da BEV'ler için temel konfigürasyonu gösterir. Tekerlekler elektrik motor(lar)ı tarafından tahrik edilir, piller tarafından bir güç dönüştürücü devresi aracılığıyla çalıştırılır.



Şekil 2.5. Batarya elektrikli araç yapısı



Şekil 2.6. BEV yapılandırması. Pilin DC gücü, pili çalıştırmak için invertör tarafından AC'ye dönüştürülür

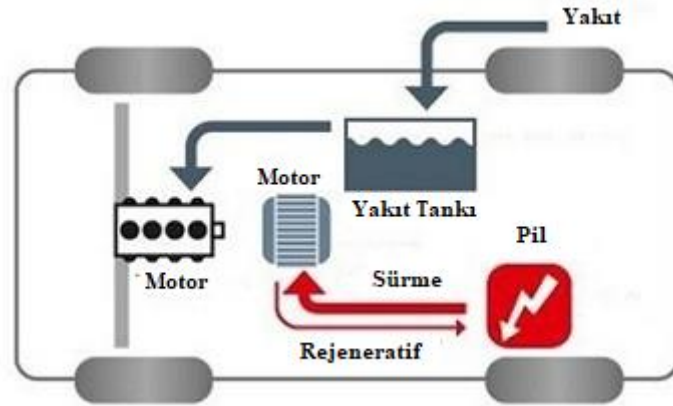
Çalışma Prensipleri; Elektrik motorunun gücü DC Bataryadan AC'ye dönüştürülür. Hızlandırıcıya basıldığında, kontrolöre bir sinyal gönderilir. Kontrolör, inverterden motora giden AC gücünün frekansını değiştirerek aracın hızını ayarlar. Motor daha sonra bağlanır ve bir dişli çark aracılığıyla tekerleklerin dönmesine yol açar. Frenlere basılırsa veya elektrikli araba yavaşlarsa, motor bir alternatör haline gelir ve aküye geri gönderilen gücü üretir (URL-4).

Batarya elektrikli araçlara örnek olarak; MG ZS, TATA Nexon, Mahindra E20 plus, Mahindra Verito, Volkswagen e-Golf, Chevy Bolt, Nissan LEAF, Hyundai Ioniq, Kia Soul, Mitsubishi i-MiEV, Tesla X, Tesla Model 3, BMW i3, Toyota Rav4 verilebilir.

2.2.2. Hibrit Elektrikli Araç (HEV)

Araç hem içten yanmalı (genellikle benzinli) motoru hem de pille çalışan motor güç aktarma organını kullanır. Benzinli motor, akü boşken hem sürmek hem de şarj etmek için kullanılır. HEV'ler, tam elektrikli araçlar veya plug-in hibrit araçlar kadar verimli değildir.

HEV'de hem ICE hem de elektrik motoru bulunmaktadır. Şanzıman, hem motor hem de elektrik motoru tarafından aynı anda döndürülür. Sonra tekerlekleri hareket ettirir. BEV ve PHEV ile karşılaştırıldığında, aralarındaki en büyük fark; HEV'deki pillerin yalnızca ICE, tekerleklerin hareketi veya her ikisinin bir kombinasyonu ile şarj edilebilmesidir. Pilin sistemin dışından, örneğin elektrik şebekesinden şarj edilememesi için şarj portu yoktur. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere HEV Bileşenleri; motor, elektrik motoru, kontrolör ve invertörlü pil takımı, yakıt tankı ve kontrol modülünden oluşur.



Şekil 2.7. Hibrit elektrikli araç yapısı

Hibrit elektrikli araçlara örnek olarak; Honda Civic Hybrid, Toyota Prius Hybrid, Honda Civic Hybrid, Toyota Camry Hybrid verilebilir.

2.2.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araç (PHEV)

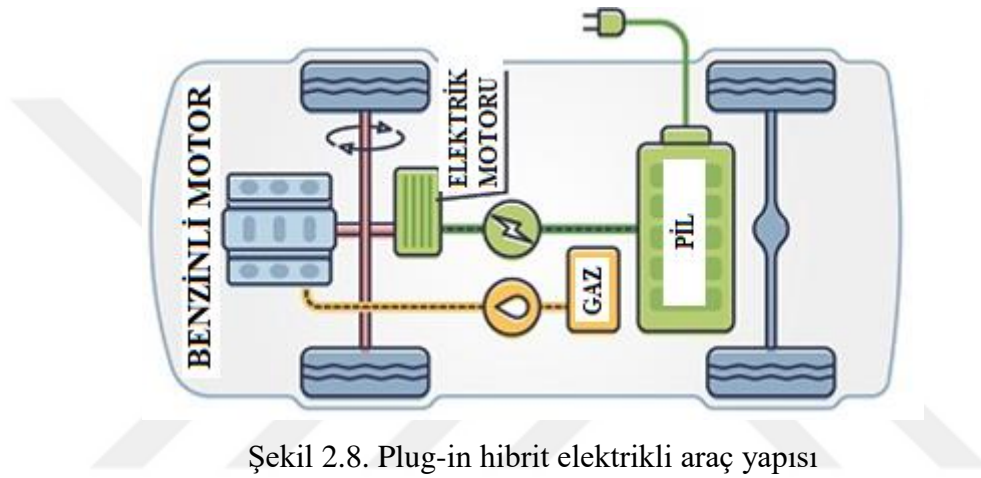
PHEV, hem ICE hem de elektrik motoruna sahiptir. Yakıtlar, geleneksel yakıt (benzin gibi) veya alternatif yakıt (biyodizel gibi) arasından seçim yapılabilir. Ayrıca şarj edilebilir bir pil takımı ile çalıştırılabilir. Pil harici olarak şarj edilebilir. PHEV'ler en az 2 modda çalışabilir:

- Motorun ve pilin otomobilin tüm enerjisini sağladığı Tamamen Elektrik Modu

- Hem elektriğin hem de benzin/dizelin kullanıldığı Hibrit Mod

PHEV'in avantajları; emisyon yok, gaz veya yağ değişimi yok, evde rahatça şarj edebilme, hızlı ve sarsıntısız hızlanma olarak gösterilebilir. PHEV'in dezavantajları; benzinli araçlara göre daha kısa menzile sahip olması, diğer araçlara göre daha pahalı olması söylenebilir (URL-5).

PHEV'in Ana Bileşenleri Şekil 2.8'de görüldüğü gibi; Elektrik motoru, Motor, İnverter, Akü, Yakıt deposu, Kontrol modülü, Akü Şarj Cihazı (yerleşik model ise)



Şekil 2.8. Plug-in hibrit elektrikli araç yapısı

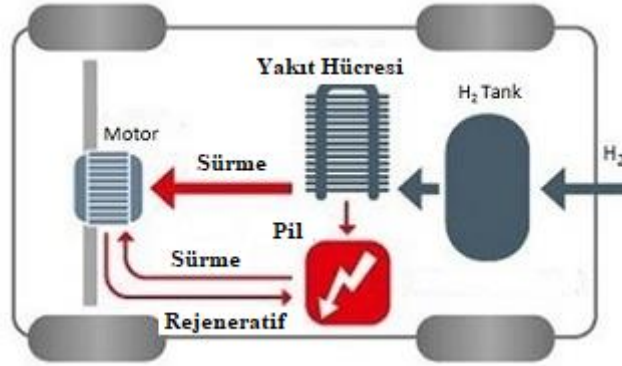
Plug-in hibrit elektrikli araçlara örnek olarak; Porsche Cayenne S E-Hybrid, Audi A3 E-Tron, Mercedes C350e, Mini Cooper SE Countryman, BMW i8, Fiat 500e, Volvo XC90 T8, Mercedes GLE550e verilebilir.

2.2.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (FCEV)

Sıfır Emisyonlu Araç olarak da bilinen FCEV'ler, aracı çalıştırmak için ihtiyaç olan elektriği üretmek için 'yakıt hücresi teknolojisini' kullanan elektrikli araç türleridir. Bu tip araçlarda Kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üretilir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV'ler), hidrojeni bir elektrik motoruna güç sağlayan elektriğe dönüştürmek için oldukça verimli bir elektrokimyasal süreç kullanır. Bugün piyasada bulunan FCEV'ler, pillerini harici bir kaynaktan şarj etmek için tasarlanmamıştır. Bunun yerine, araçtaki bir tankta depolanan sıkıştırılmış hidrojen gazıyla beslenirler.

Çalışma prensibi, PHEV elektrikli arabanın çalışma şeklinden farklıdır. FCEV'nin bu aracı çalıştırmak için ihtiyaç olan elektriği aracın kendisinde üretmesidir. FCEV

bileşenleri Şekil 2.9’da görüldüğü üzere; elektrik motoru, hidrojen depolama tankı, dönüştürücü, yakıt hücresi yığını ve denetleyicili pilden oluşur.



Şekil 2.9. Yakıt hücreli elektrikli araç yapısı

Yakıt hücreli elektrikli araçlara örnek olarak; Toyota Mirai, Honda Clarity Fuel Cell, Hyundai Nexo verilebilir.

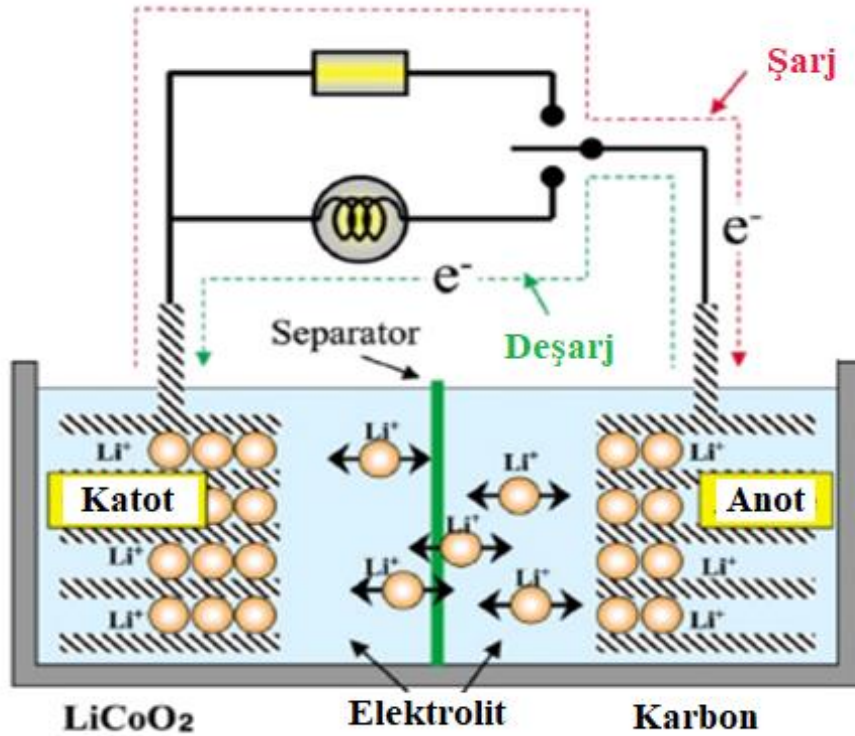
2.3. Batarya Çeşitleri

2.3.1. Lityum İyon Piller

Sony şirketi 1991 yılında LIB'yi (anot olarak karbon ve katot olarak $LiCoO_2$ (LCO)) ticarileştirdiğinden beri taşınabilir elektronikler ve çeşitli diğer büyük elektrikli cihazlar için milyarlarca LIB hücresi üretildi. Bir LIB'nin dört ana bileşeni; katot, elektrolit, ayırıcı ve anottur. Anot, şarj sırasında lityum iyonlarını depolar ve lityum iyonları, elektrik uygulamalarını çalıştırmak için deşarj sırasında katoda doğru hareket eder. Bu nedenle, lityum iyonları katot ve anot arasında değiş tokuş edildiğinden, LIB'ye "Sallanan sandalye pili" 'de denir. LIB çalışma mekanizmasının şeması Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Geleneksel katotlar, LCO, $LiMn_2O_4$ (LMO), $Li(Ni_xCo_yAl_z)O_2$, (NCA) ve $Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$ (NMC) gibi geçiş metali oksitlerini içerir. Co'ya göre daha az kategorize edilebilir ve daha ucuzdur. LMO, yüksek termodinamik kararlılığa ve yüksek voltaja sahip ancak nispeten düşük kapasiteli spinel benzeri bir yapıya sahiptir. $LiFePO_4$ (LFP) katot malzemesi, kararlı bir olivin yapısına sahiptir. NMC ve LCO'dan daha güvenlidir. Ancak düşük kapasite ve düşük şarj/deşarj oranlarına sahiptir.

Geleneksel anot, grafit veya $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO)'den yapılır. Grafit ve $Li_4Ti_5O_{12}$ için teorik kapasiteler sırasıyla 372 ve 175 mAh g^{-1} 'dir. $Li_4Ti_5O_{12}$ 'ye lityum eklenmesi için gereken potansiyel, karbon bazlı anot için olandan daha yüksek olan Li/Li^+ 'ya karşı 1.5V'tur. Bu nedenle $Li_4Ti_5O_{12}$ anotlu tam hücrenin voltajı belirli bir süre için azalır. Katot malzemesi ve $Li_4Ti_5O_{12}$ ile LIB'nin enerji yoğunluğu da sonuç olarak grafit hücre ile karşılaştırıldığında sınırlıdır (Belharouak ve diğ., 2011). Bununla birlikte, $Li_4Ti_5O_{12}$ anot, grafit anoda kıyasla yüksek sıcaklıkta daha iyi çevrim performansına ve daha iyi termal stabiliteye sahiptir (Yao ve diğ., 2005). Bu nedenle $Li_4Ti_5O_{12}$ anotlu LIB'ler, enerji yoğunluğunun o kadar önemli olmadığı sabit enerji depolama gibi bazı alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang ve diğ., 2016).



Şekil 2.10. LIB ilkesinin şeması (Nishi, 2001)

Elektrolit, lityum iyon pilin kanı olarak kabul edilir ve ayırıcı ve elektrotların gözenek boşluğu sıvı elektrolit ile doldurulur. Şarj (deşarj) işlemi sırasında, lityum iyonları katottan (anot) deinterkalasyona uğrar ve elektrolit yoluyla anoda (katot) aktarılır. Başka bir deyişle, lityum iyonları elektrolit içinde serbestçe akar. Bu nedenle, elektrolit

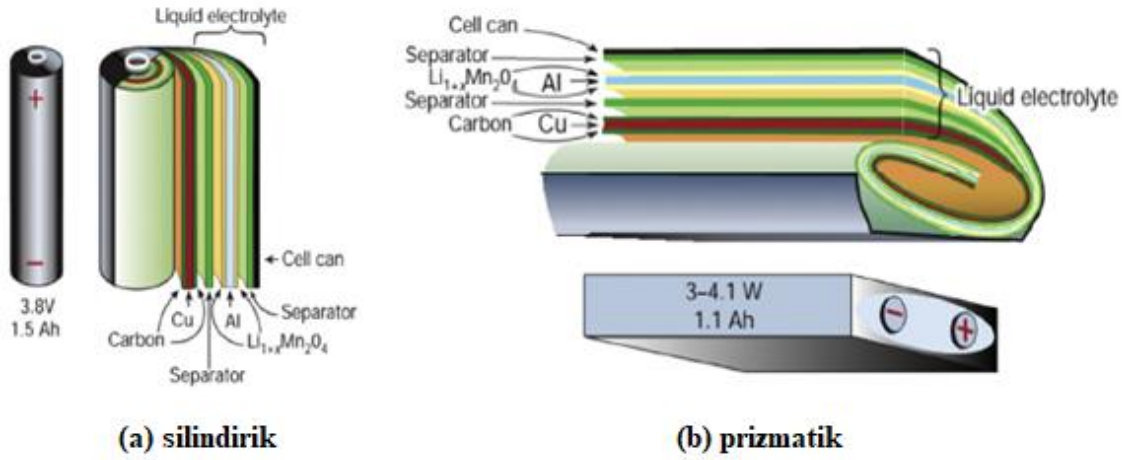
çözücülerin hızlı lityum iyon iletimini sağlamak için iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması, elektrotlarla uyumlu ve aynı zamanda kimyasal inert olması gerekir.

Serbest lityum iyonlarının transferine izin verirken dahili kısa devreyi önlemek, katot ve anodu ayırmak için bir ayırıcı kullanılır (Zhang ve diğ., 2015). Ayırıcı, elektrokimyasal olarak aktif bir malzeme değildir. Ancak güvenliği garanti etmek için çok önemli bir bileşendir. Ayırıcı bozulursa, pil dahili kısa devre nedeniyle termal kaçak durumuna geçebilir (OrendorffCJ, 2012). Ayrıca ayırıcı, iyon taşınımında da önemli bir rol oynar. Hız performansını ve hücre ömrünü etkiler.

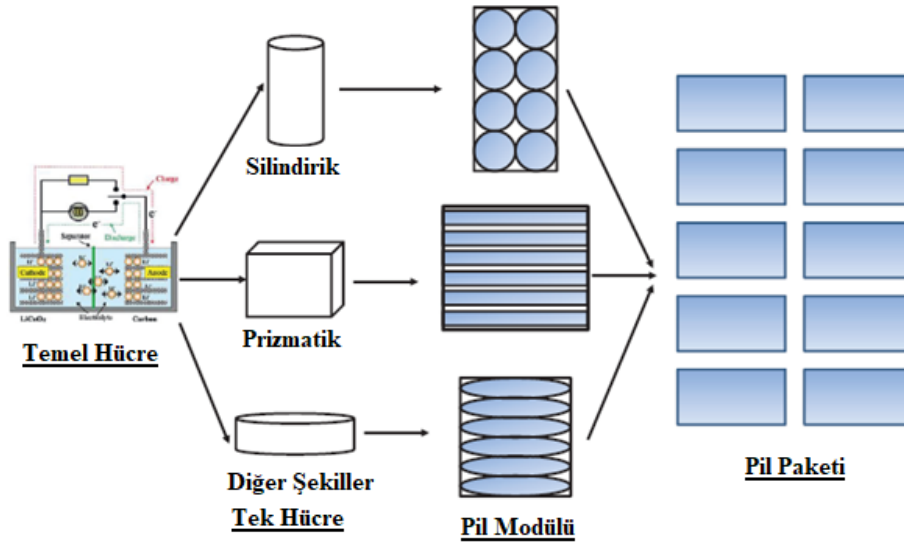
İyi bir ayırıcı bazı gereksinimleri karşılamalıdır. Kimyasal ve termal olarak kararlı, ayarlanan sıcaklıkta kapatma işlevine sahip, iyi ıslanabilirlik ve elektrolit ile ince geçirgenlik. Yapı ve bileşime bağlı olarak, sıvı elektrolit LIB için ayırıcılar genel olarak üç gruba ayrılabilir: mikro gözenekli polimer membranlar (incelikleri ve termal kapatma işlevi ile öne çıkar), dokumasız kumaş paspaslar (yüksek gözeneklilik ve düşük maliyet) ve inorganik kompozit membranlar (çok iyi ıslanabilirlik ve ince termal kararlılık) (Zhang, 2007).

Tek hücre ve pil takımı; her bir hücrenin içinde, katot ve anot malzemeleri bağlayıcı, iletken karbon ve solvent ile karıştırılarak macun elde edilir. Daha sonra macun akım toplayıcı üzerine boyanır (genellikle grafit anot Cu folyo üzerine boyanır; katot Al folyo üzerine boyanır). Katot ve anot daha sonra silindirik bir hücre için bir spiral halinde sarılır veya kesilip kese hücreleri için bir yığın halinde düzenlenir. Silindirik ve prizmatik LIB konfigürasyonlarının şekilleri ve bileşenleri Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Burada katot $Li_{1+x}Mn_2O_4$ 'tür ve anot örnek olarak karbondur.

EA'lar veya elektrik şebekesinde kullanılan enerji depolama sistemi gibi bazı durumlarda, birden fazla hücre bir modül oluşturmak için çeşitli konfigürasyonlarda (paralel ve/veya seri olarak bağlanmış) bir araya getirilerek paketlenir. Modüller, voltaj ve kapasite talebini karşılamak için birleştirilir. Pil paketlerinin tipik organizasyonu Şekil 2.12'de sunulmaktadır (Wang ve diğ., 2012). Pil modülü birden çok tek hücreden oluşur ve pil takımı birden çok pil modülünden oluşur.



Şekil 2.11. Silindirik ve prizmatik LIB konfigürasyonlarının şekillerini ve bileşenlerini gösteren şematik çizim (Tarascon, 2001)



Şekil 2.12. Farklı hücre konfigürasyonlarına sahip pil takımı tasarımının şemaları (Al-Hallaj ve Selman, 2002)

LIB'nin optimum çalışma sıcaklığı aralığı 20 °C ile 40 °C'dir (Ye ve diğ., 2015). Ortam sıcaklığı normal çalışma koşullarını aşarsa, bir LIB hücresinin termal kaçak geçirme ihtimali artar. Öte yandan, pilin sıcaklığı istenen ayar noktasının altındaysa, pil takımının sıcaklığını yükseltmek için ısı elemanlarına da ihtiyaç duyulur (Zhai ve Cui., 2019). Bu nedenle, pil paketindeki maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımını uygun bir aralıkta kontrol etmek için etkili bir termal yönetim sistemi tasarlamak önemlidir.

Konvansiyonel soğutma yöntemleri arasında havayla soğutma, sıvıyla soğutma, faz değiştiren malzeme soğutması, ısı borulu soğutma sistemi veya bunların kombinasyonları bulunur. Hava soğutması en basit yöntemdir ancak verimliliği düşüktür. Sıvı soğutma etkilidir ancak pil paketinin ağırlığını artırır ve sızıntı riski vardır. Faz değiştiren malzemenin gizli ısısı yüksektir ancak ısı iletkenliği düşüktür. Bu da etkinliğini sınırlar (Weng ve diğ., 2011).

Isı borusu, ısıyı iki katı arayüz arasında etkin bir şekilde aktarmak için termal iletim ve faz geçişini birleştiren bir ısı transfer cihazıdır. Bir ısı borusunun sıcak ara yüzeyinde, termal olarak iletken katı yüzey ile sıvı teması, ısıyı emerek buharlaşır. Daha sonra buhar, ısı borusu boyunca soğuk ara yüze akar ve gizli ısıyı serbest bırakmak için tekrar bir sıvıya yoğunlaşır. Sıvı daha sonra yerçekimi, merkezkaç kuvveti, kılcal hareket veya diğer kuvvetler yoluyla sıcak arayüze geri döner ve böylece döngü çalışır. Kaynama ve yoğuşma sırasındaki çok yüksek ısı transfer katsayıları nedeniyle ısı boruları ısı transferinde oldukça etkilidir. Öte yandan, ısı borusu soğutma yöntemi, LIB soğutma sistemi için nispeten karmaşık ve maliyetlidir. Dolayısıyla etkin, güvenilir ve ucuz bir LIB soğutma sistemleri geliştirmek için çalışmalar sürmektedir (Ye ve diğ., 2015).

2.3.1.1. Lityum kobalt oksit

Lityum kobalt oksit (LiCo) piller, anot olarak kobalt oksit (CoO₂) kullanır. Yarı hücre reaksiyonlarının gösterimi Denklem (2.1) ve (2.2)'deki gibi (Roussel, 2009) ;

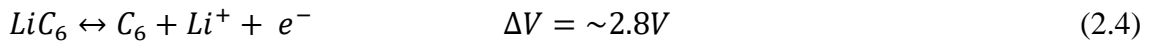
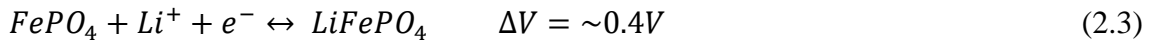


Lityum kobalt oksit piller, piyasada bulunan 448Wh/kg teorik özgül enerjiye sahiptir. Pillerin özgül enerjileri 200Wh/kg civarındadır (Linden ve diğ., 2010). 1991 yılında Sony tarafından piyasaya sürülen lityum iyon pil türü LiCo en eski ve en yaygın kullanılanıdır. *LiCoO₂* mevcut üreticileri piller Sony ve Panasonic'i içerir (Oswall ve diğ., 2010; Robb J., 2013).

LiCo piller özellikle aşırı şarj ve aşırı ısınmadan kaynaklanan termal kaçaklara eğilimlidir. Bu durum dizüstü bilgisayarlarda ve cep telefonlarında birden fazla tüketicinin geri çağırılmasıyla sonuçlanmıştır (Doughty ve Pesaran, 2012).

2.3.1.2. Lityum demir fosfat

Lityum demir fosfat (LFP) piller, katot olarak demir fosfat ($FePO_4$) kullanır. Yarı hücre reaksiyonlarının gösterimi Denklem (2.3) ve (2.4)'deki gibi;

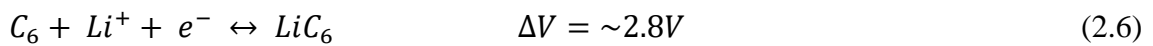
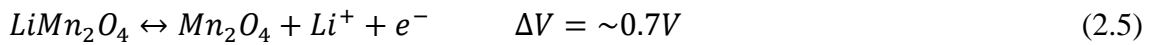


LFP pillerin teorik özgül enerjisi 544Wh/kg'dır. Piyasada bulunan pillerin kapasitesi 120-160Wh/kg aralığındadır (Linden ve diğ., 2010). Katodun kararlılığı, daha yüksek akımların kullanılmasına izin verir. Diğer li-ion tiplerine göre daha yüksek özgül güç ve daha düşük şarj süresi sağlar (Doughty ve Pesaran, 2012).

LFP piller, katottaki fosfatın kararlılığı nedeniyle aşırı şarj edildiğinde kararlıdır. Farklı diğer malzemeler aşırı ısındığında veya aşırı şarj edildiğinde oksijen açığa çıkmaz. Bu kararlılık da azalır. Deşarj sırasında ve düşük şarj durumlarında yan reaksiyonlar, çevrim ömrünü arttırır.

2.3.1.3. Lityum mangan oksit

Lityum mangan (LiMn) piller bir Mn_2O_4 katot kullanır. Yarı hücre reaksiyonlarının gösterimi Denklem (2.5) ve (2.6)'deki gibi;



LiMn hücreleri, 1001Wh/kg teorik enerjiye sahiptir. Ticari olarak temin edilebilen hücreler 120Wh/kg özgül enerjiye sahiptirler (Linden ve diğ., 2010).

LiMn piller, termal kaçaklara karşı LiCo hücrelere göre daha dayanıklıdır. Bu onun kübik bir sonucudur. Lityum mangan piller, elektrolitte manganezin çözünmesinin bir

sonucu olarak sınırlı çevrim ömrüne sahiptir. Chevrolet Volt ve Hyundai Sonata Hybrid'de lityum manganer piller kullanılmaktadır (Kim ve diğ., 2012).

2.3.1.4. Lityum nikel-kobalt-manganer

Lityum nikel-kobalt-manganer (Li-NCM) piller, anot olarak oksitlenmiş metallere oluşan bir alaşım kullanır. Herhangi bir metal oksitten daha iyi özellikler sağlar. Nikel-kobalt-alüminyum dahil farklı metal alaşımları da kullanılabilir (Lu ve diğ., 2010).

Lityum NCM pillerin, Chevrolet Volt'taki lityum manganer pillerin yerini alması planlanıyor Tesla Model S'de lityum nikel alaşımlı piller de kullanılmaktadır.

2.3.1.5. Lityum titanat

Bir lityum titanat hücresinin anot reaksiyonu Denklem (2.7)'deki gibi;



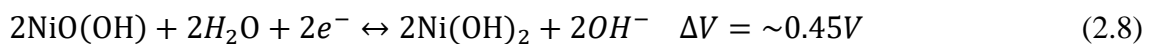
Lityum titanat, performans düşüşü nedeniyle düşük sıcaklıklarda performansı iyileştirmiştir. Honda Fit EV ve Mitsubishi i-MiEV'de lityum titanat piller kullanılmaktadır.

2.3.2. Nikel Kadmiyum

Nikel kadmiyum pillerin teorik özgül enerjisi 244Wh/kg'dır. Mevcut pillerin kapasiteleri 40Wh/kg'dır (Linden ve diğ., 2010).

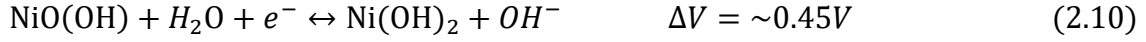
Nikel kadmiyum piller, tıbbi ekipman ve elektrikli aletler gibi acil durum sistemleri dışında Avrupa Birliği'nde yasaklanmıştır (URL-2).

NiCd piller, nikel oksit-hidroksit ve kadmiyum arasındaki mobil iyonlar olarak hidroksil iyonlarını kullanır (Linden ve diğ., 2010). Yarı hücre reaksiyonlarının gösterimi Denklem (2.8) ve (2.9)'daki gibi;



2.3.3. Nikel Metal Hidrür

Nikel metal hidrit (NiMH) piller, nikel kadmiyum hücrelerinde bulunanla aynı nikel oksihidroksit (NiOOH) anodunu kullanır. Kadmiyum katot, hidrojen emici bir alaşım ile değiştirilir. Deşarj sırasındaki reaksiyonlarının gösterimi Denklem (2.10) ve (2.11)'deki gibi;



NiMH pillerin teorik özgül enerjisi 240Wh/kg'dır. Mevcut pillerin özgül enerjileri 100Wh/kg 'dır (Linden ve diğ., 2010).

Nikel metal hidrit piller ilk olarak 1997 yılında Honda EV Plus'ta otomobiller için kullanıldı (Herron, 2021). Son zamanlarda Lexus gibi düşük pil kapasitesine sahip CT200h ve Toyota Prius C hibrit otomobillerde kullanılmaktadırlar.

2.3.4. Kurşun Asit

Yakın zamana kadar EA'lar için en iyi bilinen ve en yaygın olarak kullanılan pil kurşun asit pilleridir. Ancak bu pilleri üretmek oldukça maliyetlidir.

Kurşun asit hücrelerinde, pozitif plakalar aktif bir kurşun dioksit malzemesine sahipken negatif plakaların aktif maddesi olarak süngerimsi bir kurşun vardır. Plakalar seyreltik sülfürik asit elektroliti içinde daldırılır. Sülfürik asit kurşun ile birleşir ve kurşun sülfat ve su üretmek için kurşun oksit, sırasında elektrik enerjisi serbest bırakılır. Genel reaksiyon Denklem (2.12)'deki gibi;

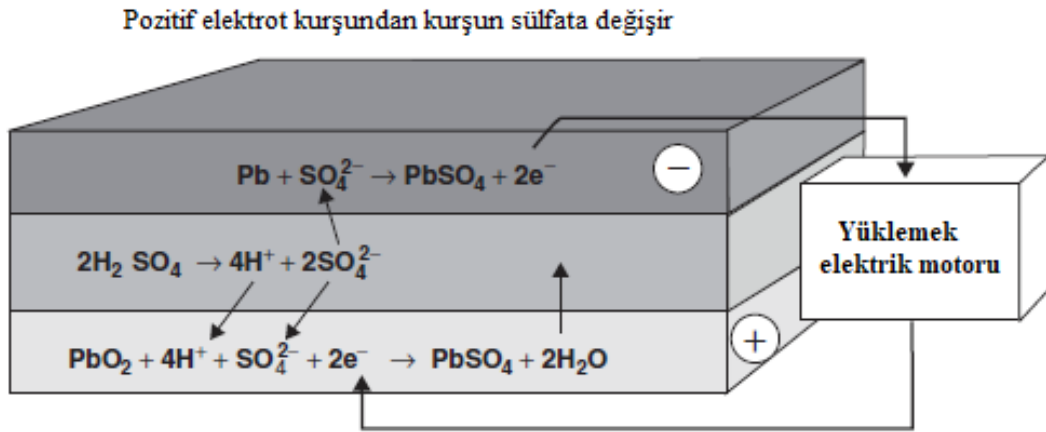


Pilin her bir elektrotundaki reaksiyonlar Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Üstte pilin boşaldığı diyagram gösterilmiştir. Her iki elektrot reaksiyonu da kurşun oluşumuyla sonuçlanır. Elektrolit yavaş yavaş sülfürik asidi kaybeder ve daha seyreltik hale gelir.

Şekil 2.13'nin alt diyagramında olduğu gibi, şarj edilirken elektrotlar kurşuna döner ve Elektrolit ayrıca sülfürik asidini geri kazanır ve kararlılık artar.

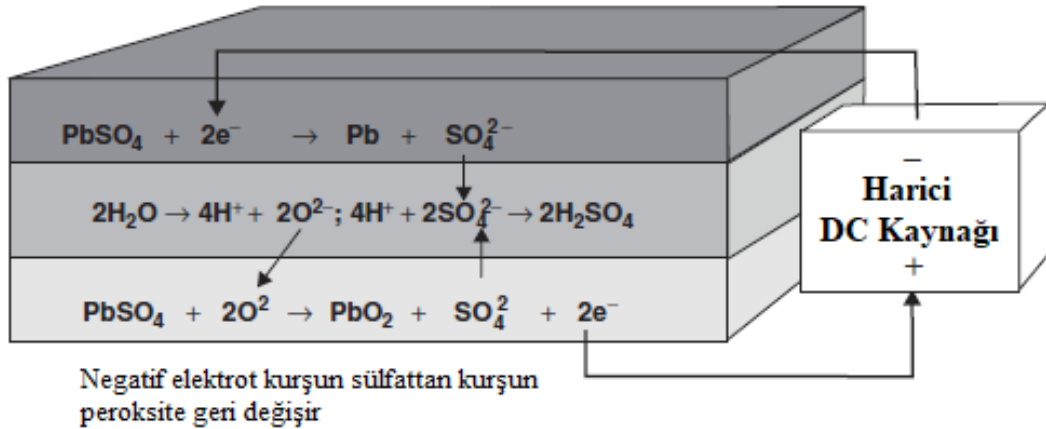
Kurşun asit pil, en yaygın olarak kullanılan şarj edilebilir pildir. Bunun başlıca sebebi, ana bileşenleri (kurşun, sülfürik asit, plastik bir kap) pahalı değildir, güvenilir bir şekilde çalışır ve hücre başına yaklaşık 2V'luk nispeten yüksek bir voltaja sahiptir.

Bir kurşun asit akünün şarj edilmesi sırasında çok dikkatli olunmalı aksi halde pili hızla bozar ve ömrünü kısaltır. Şarj işlemi çok yüksek voltajda yapılmamalı veya su kaybı meydana gelmemelidir.



Kurşun asit akünün boşalması sırasındaki reaksiyonlarda elektrolit sülfürik asit kaybederken su kazanır.

Pozitif elektrot kurşun sülfattan kurşuna dönüşür.



Kurşun asitli akünün şarj edilmesi sırasında elektrolit sülfürik asit kararlılığının arttığına dikkat edilmeli

Şekil 2.13. Kurşun asitli akünün şarj ve deşarjı sırasındaki reaksiyonları

Kilovat saatlik şarj başına en ucuz şarj edilebilir pillerdir. Ancak özgül enerjileri düşüktür. General Motors EV1, başlangıçta kurşun asitli piller kullanmıştır. Ancak daha

sonra NiMH'ye geçti. Bugün, kurşun asitli aküler, otomobillerdeki marş motorlarına güç sağlamak ve yedekleme sağlamak için yaygın olarak kullanılır.

2.3.5. Karşılaştırma Tablosu

Tablo 2.1' de yukarıda ele alınan tüm pil türlerinin kısa bir karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 2.1. PHEV'ler için pil türlerinin karşılaştırması

	Avantajları	Dezavantajları
Lityum Kobalt Oksit	Yüksek özgül enerji Yerleşik üretim	Yüksek termal kaçak riski
Lityum Demir Fosfat	Uzun çevrim ömrü Yüksek şarj/deşarj akımları	Düşük nominal voltaj Daha düşük özgül enerji Silindirik hücreler gerektirir
Lityum Manganez Oksit	Yüksek özgül enerji	Daha düşük çevrim ömrü
Lityum Nikel Alaşım	Yüksek özgül enerji Li-Ni'den daha uzun çevrim ömrü	Yüksek fiyat
Lityum Titanat	Yüksek şarj/deşarj akımları Uzun çevrim ömrü	Düşük nominal voltaj Düşük ticari kullanılabilirlik
Nikel metal hidrür	Li-ion'dan daha düşük maliyet	Yüksek kendi kendine ısınma Silindirik hücreler gerektirir
Nikel kadmiyum	Düşük maliyetli	AB'de kadmiyum yasaklandı Silindirik hücreler gerektirir
Kurşun asit	İyi kurulmuş geri dönüşüm altyapı En düşük maliyet	Kazalar sırasında asit sızıntısı riski En düşük özgül enerji

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA AKÜ YANGINLARININ İNCELENMESİ

Elektrikli araçlar son on yılda, li-ion pil teknolojisinin hızlı gelişimi sayesinde dünya çapında otomobil endüstrisini önemli ölçüde değiştirdi. Bununla birlikte, bu tür yüksek enerjili pillerle ilişkili yangın riski ve tehlikesi, EA'lar için büyük bir güvenlik endişesi haline geldi. Bu bölümde, li-ion pillerdeki termal kaçak ve yangınla ilgili EA'ların yangın güvenliği sorunlarına odaklanmaktadır. Trafik kazaları sonrası; termal kaçak veya yangın meydana gelebilir. Pilin arızalanmasına zehirli gazlar, yangınlar, jet alevleri ve patlamalar eşlik edebilir. Ayrıca, çeşitli EA yangın senaryolarında yer alan ve test yoluyla elde edilen önemli pil yangın özellikleri analiz edilmektedir.

Tam ölçekli EA yangın testi için sınırlı veriler bulunmaktadır. Yerleşik pil bir kez yangına karıştığında, EA yangınlarını söndürmede büyük zorluklar yaşanmaktadır. Çünkü içerideki yanan pil paketine harici olarak uygulanan söndürme işlemiyle erişilemez ve yeterli soğutma olmazsa yeniden tutuşabilir. Sonuç olarak, pili soğutmak, yangını söndürmek ve yeniden tutuşmayı önlemek için aşırı miktarda söndürme maddesine ihtiyaç duyulur. Bu bölümde, bu sorunları ele alarak, piller, elektrikli araçlar ve yangın güvenliği konularına değinilecektir.

3.1. EA Pilleri ve Yangın Riskleri

Yangın olayları, araçları çevreleyen risklerden biridir. EA'ların sayısı arttıkça elektrikli araçlar da daha görünür hale gelmeye başladılar. BEV ve PHEV yangın kazalarının çoğunda özellikle kendi kendine tutuşma olaylarında, yangın pil güç sisteminde başlar. Tahrik açısından, pil kapasitesi, bir ICEV'nin yakıt deposundaki benzin kapasitesine benzetilebilir. Bu nedenle elektrikli araç yangını, pil hücresi ve güç sistemi ile ilişkili yangın riski ve tehlikesinin yanı sıra pil paketinin boyutu ve kapasitesi ile bağlantılıdır. Genel olarak, pil sayısı ve içerebilecekleri enerji miktarı arttıkça, elektrikli araç için yangın riski de artar (Wang ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2015; Liu ve diğ., 2016).

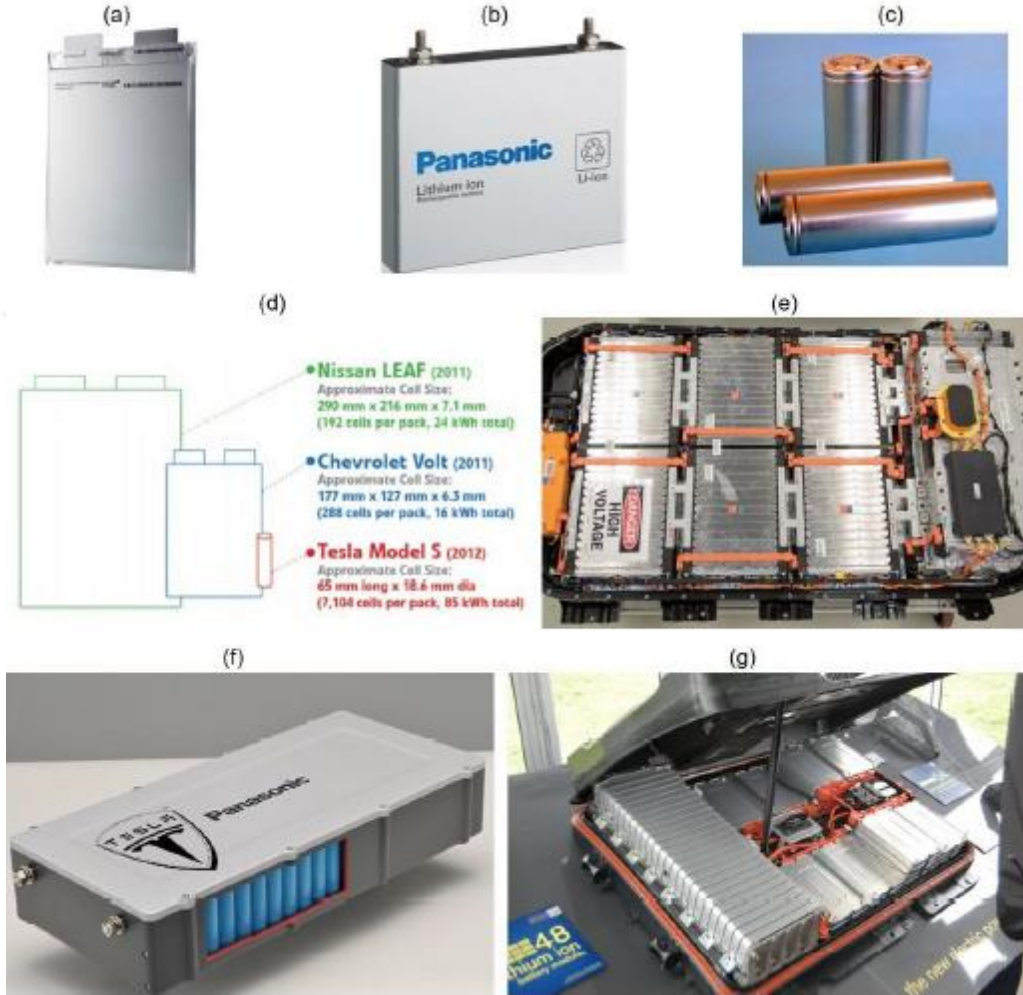
EA'lar tarafından kullanılan pil sayısı çok fazla olabilir. Normal bir EA tarafından tüketilen güç, sıradan bir akıllı telefondan binlerce kat daha fazla ve daha hızlı olduğu için bu gereklidir. EV pilleri çok fazla güç (yüz kW'a kadar) ve yüksek enerji kapasitesi (onlarca kWh'ye kadar) sunmalıdır. Aynı zamanda, uygun bir fiyatı korurken alan

sınırlamaları ve ağırlık kısıtlamaları ile ilgili önemli zorluklarla karşılaşılır. Genellikle EA pilleri; hücreler, modüller ve bir paketten oluşur. Bir LIB'nin temel birimi olan pil hücreleri, bir pil modülü oluşturmak için seri veya paralel olarak bağlanır. Hücreleri birbirine sabitlemek ve onları dış şoklardan, ısıdan ve titreşimden korumak için bir çerçeve kullanılır. Bu altyapı, yapısal bileşenleri, kablolamayı, soğutma döngülerini ve güç elektroniklerini içerir. Ayrıca güç, şarj/deşarj ve sıcaklığı yöneten sistemlerle birlikte birkaç modül kurulur. Bunlar tipik olarak Bataya Yönetim Sistemi (BYS) olarak adlandırılır. Bu yoğun montaj, EA'nın çok fazla enerji depolamasını sağlar. Ancak bu aynı zamanda paketin içindeki sıcaklıkları yönetmeyi de zorlaştırır (Hao ve diğ., 2018).

Bireysel pil hücrelerinin özellikleri, bir EA'nın sürüş performansını belirler. Kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) gibi geleneksel pil teknolojilerinin tümü EA'larda kullanılmıştır. LIB'lere göre daha düşük yangın riski oluşturmalarına rağmen, enerji yoğunlukları ve kapasiteleri ile şarj vedeşarj oranları çok daha sınırlıdır. Bu, onları modern EA'lar için uygun hale getirmez. Dr Goodenough, 1980'de LIB'yi icat ettiğinden ve Sony bunu 1991'de ticarileştirdiğinden beri LIB, EA'lar da dahil olmak üzere her türlü elektrikli cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bugün, LIB elektrikli araç pazarına hakimdir ve önümüzdeki yıllarda da etkisini devam edeceği beklenmektedir (Evarts, 2015). LIB'lerin popüleritesi, temel olarak, geleneksel pil teknolojilerine kıyasla yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömürlerinden kaynaklanmaktadır (Kolly, 2014). Ek olarak, daha düşük ağırlık, taşıma verimliliğini arttırabileceğinden LIB'yi araçlar için en uygun hale getirir.

Pil hücreleri konfigürasyon ve üretim sürecine bağlı olarak, üç tipi vardır: Şekil 3.1'de gösterildiği gibi silindirik hücreler, prizmatik hücreler ve kese hücreleri. Bu üç hücre tipinin tümü gerçek araçlarda kullanılır. Tablo 3.1'de üç temel ortak pil hücrelerini listelenmiştir. Tipik olarak, EA'larda kullanılan LIB hücrelerinin kapasitesi, farklı tipler ve üreticiler için 3 ila 300 Ah arasında değişebilir. Araç seviyesinde, tipik enerji yoğunluğu, Tablo 3.2'de gösterildiği gibi 100 Wh/kg'ın üzerindedir. Bu enerji, LIB hücrelerinin kimyası ve yapısı ile ilgilidir. Örneğin Tesla, hücre başına 3.4 Ah veya 248 Wh/kg gibi etkileyici bir özgül enerji sağlayan silindirik 18650 hücrede NCA (nikel, kobalt ve alüminyum oksit) kullanır. Yolcu EA'larında bulunan en yüksek enerji kapasitesi, yaklaşık 100 kWh sağlayan Tesla Model S'dir. Bu enerji kapasitesi, tek bir

şarjla 380 km'nin üzerinde bir sürüş menzili sunabilir (Tesla, 2019). Bununla birlikte, potansiyel yakıt yükü de arttığından, pillerin (veya yakıtın) sayısı ve kapasitesi arttıkça bir EA yangını tehlikesi de artar (Wang ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2016; Drysdale, 2011).



Şekil 3.1. Tipik EA pil hücreleri: (a) kase hücre; (b) prizmatik hücre; (c) silindirik hücre; (d) popüler EA'ların yaklaşık pil hücresi boyutu (e) 60 kWh pil takımı, 288 prizmatik kase hücreyi kullanan Kore'de LG Chem tarafından tamamen monte edilmiştir; (f) Tesla'nın yüzlerce silindirik hücreden oluşan pil modülü; (g) Nissan LEAF pil takımı (Davidson, 2016; Miles, 2018).

Li-ion pil on yıl önce EA'lar için baskın güç kaynağı haline geldiğinden, yangın riski ve LIB önemli bir güvenlik sorunu haline gelmiştir. Bu, pil paketinin artan dağıtım ölçüğü ve enerji yoğunluğu ile ilgilidir. Lityum kelimesinin (kimyasal bir element olarak) kendisine etiketlenmiş güvenlik soruları vardır (Wang ve diğ., 2019; Balakrishnan ve diğ., 2005).

Tablo 3.1. Üç tipik pil hücresinin temel parametreleri (Andrea, 2018)

Üretici	Biçim	Geometri	Gerilim (V)	Kapasite (Ah)	Özgül Güç (W/kg)	Ağırlık (g)
Panasonic	Silindirik	Ø18.5x65.3	3.6	3.2	120	48.5
Hitachi	Prizmatik	148x91x26.5	3.6	28	2300	720
Kokam	Kese	462x327x15.8	3.6	240	360	4780

Tablo 3.2. Belirli bir model ve aralık testi ile seçilen BEV için pil takımı bilgileri (Offer, 2015)

Marka	Kapasite (kWh)	Hücre Yoğunluğu (Wh/kg)	Hücre Tipi	Menzil (km)
Nissan Leaf S (2017)	40	229	Kese	243
Renault Zoe 40 (2017)	41	228	Kese	400
BMW i3 (2016)	42.2	230	Prizmatik	246
Tesla Model S (2017)	90	250	Silindirik	509

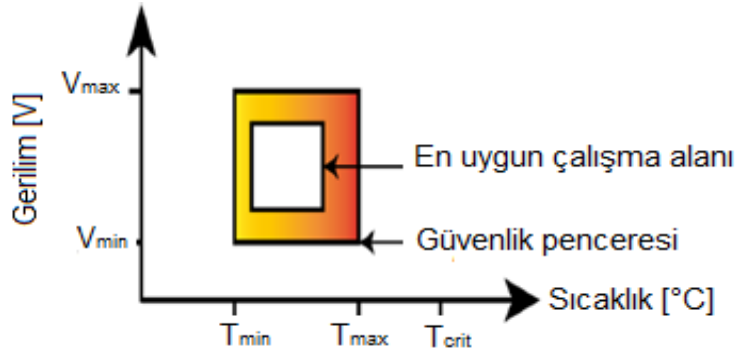
Li-ion pil on yıl önce EA'lar için baskın güç kaynağı haline geldiğinden, yangın riski ve LIB önemli bir güvenlik sorunu haline gelmiştir. Bu, pil paketinin artan dağıtım ölçeği ve enerji yoğunluğu ile ilgilidir. Lityum kelimesinin (kimyasal bir element olarak) kendisine etiketlenmiş güvenlik soruları vardır (Wang ve diğ., 2019; Balakrishnan ve diğ., 2005).

Normal bir akü sisteminin kendi kendine tutuşma olasılığı düşük olmasına rağmen aşırı çalışma koşulları veya olayları sırasında oluşabilecek harici termal, mekanik ve elektriksel etkilere karşı savunmasızdır (Liu ve diğ., 2020). Nispeten, elektrik çarpmaları ve aşırı çalışma koşulları, dizüstü bilgisayar ve akıllı telefon gibi çoğu taşınabilir elektronik cihazlar için nadirdir. Ancak bunlar normal çalışma koşulları olarak kabul edilir. Buna karşılık, karmaşık yol ve trafik koşullarında sık sık hızlanma ve yavaşlama göz önüne alındığında, bir EA pili için çalışma koşulu daha ağırdır. Ayrıca, EA'nın pil kapasitesi veya yakıt yükü, taşınabilir elektronik cihazlardan binlerce kat daha fazladır. Bu da termal kaçak ve tutuşma durumunda daha ciddi bir yangın tehlikesi anlamına gelir. Öte yandan, EA ve pil takımı tasarımına dahil edilen güvenlik

önlemleri daha ileri düzeydedir ve kendiliğinden arıza olasılığını azaltır. Bu nedenle, taşınabilir elektronik cihazlarda pil yangın riski izlenimine dayanarak EA'larda pil yangın riskini değerlendirmek uygun değildir.

Termal Etki: Kullanıcılar, elektrikli araçlarını tıpkı bir geleneksel içten yanmalı araç gibi, yani aşırı soğuk ve sıcak ortamlarda bile çalıştırabilmeyi beklerler. Örneğin, EA'ların yaz sıcaklıklarının 45°C 'nin üzerinde olabileceği Kaliforniya'da veya günlük kış sıcaklığının -5°C 'nin altında ve bazen -15°C 'nin altında olduğu Norveç ve Kanada sokaklarında kullanılması bekleniyor. İnsanlar gibi pil de en iyi performansı oda sıcaklığında ($20\sim 30^{\circ}\text{C}$) gösterir. Aşırı sıcak ve soğuk sıcaklıklar pilin performansı için olumsuzdur ve ömrünü kısaltır. Şekil 3.2'deki gibi Litum iyon bataryalar optimum ömür ve güvenliği garanti etmek için sınırlı bir sıcaklık ve şarj aralığında çalışmalıdır.

Yüksek sıcaklık koşullarında bazı istenmeyen kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilir ve pillerin aşırı ısınmasına neden olabilir. Zayıf bir termal yayılma yeteneği ile sonunda bir elektrikli araç yangınına yol açabilecek bir termal kaçak tetiklemek mümkündür. Soğuk havalarda pilin iç direnci artar. Bu direnç metalik dendritlerin büyümesini teşvik edebilir (Matulka, 2019). Ayrıca pil içinde ek ısıtma etkilerinin oluşmasına neden olabilir. Bu da pil yangınının tetiklenme ihtimalini artırır (Wang ve diğ., 2019).



Şekil 3.2. Litum iyon bataryalar optimum ömür ve güvenliği garanti etmek için sınırlı bir sıcaklık ve şarj aralığında çalışmalıdır (Bisschop ve diğ., 2019)

Mekanik Etki: Çoğu ticari LIB hücresi, bir EA yapısının ve/veya pil modülünün ve paket muhafazasının koruması olmadan nispeten kırılgandır. Diğer herhangi bir geleneksel araç gibi trafik kazası da bir EA'nın ömrü boyunca karşılaşılabileceği bir olaydır. Bununla birlikte, LIB'lerin ve EA'nın modern tasarımıyla, çarpışmaların büyük çoğunluğu aküye zarar vermeyecektir (Justen ve diğ., 2011). LIB paketleri, çarpışma

koşulları sırasında delinme riskini ortadan kaldırmak amacıyla Şekil 3.3’de görüldüğü gibi genellikle aracın oldukça güçlendirilmiş alanlarına entegre edilir.



Şekil 3.3. LIB'ler için tipik güvenli bölge

EA'lar için yüksek sürüş performansı ile birlikte hızlı şarj ve deşarj arayışı, yangın riskleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Zheng ve diğ., 2017). LIB'ler, önceden tanımlanmış miktarda enerjiyi belirli bir süre içinde almak ve depolamak için yapılmıştır. Çok hızlı şarj etmenin veya aşırı şarj etmenin sonucu olabilecek bu sınırların aşılması, performanslarının düşmesine veya erken arızaya neden olabilir. Bu kötüye kullanıma Joule ısınması ve dahili kimyasal reaksiyonlar eşlik eder. Birincisi ısı üretirken ikincisi zamanla dahili bir kısa devreye neden olabilir. Bazı EA yangınları, kısa devre, aşırı şarj, aşırı ısınma ortamı gibi uygun olmayan çalışma koşulları ve dahili arızalardan kaynaklanabilir.

3.2. EA Yangınlarının Tehlikeleri

EA yangınlarıyla ilgili endişeler çoğunlukla bir LIB'nin kullanımıyla ilgilidir. EA üreticileri daha fazla elektrikli sürüş menzili izledikçe ve daha fazla LIB uyguladıkça, bir yangın meydana geldiğinde EA'dan salınan potansiyel ısıyı da artırırlar. Yangın riskindeki bu artış, pilin (veya yakıtın) kütlesi ve kapasitesindeki artışla orantılıdır. LIB'lerin yanması sırasında hidrojen (H_2), metan (CH_4), karbon monoksit (CO) ve hidrojen florür (HF) gibi yanıcı/patlayıcı gazların ve zehirli dumanların oluşması ilgililer için bir tehdit oluşturabilir (Larsson, 2017; Colella, 2016). EA'larla ilgili yangın güvenliği sorunları, kapsamlı bir değerlendirme gerektiren bir konudur. Bununla birlikte, bu temel yangın parametrelerinin daha iyi anlaşılması, EA yangınının sistematik bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olur.

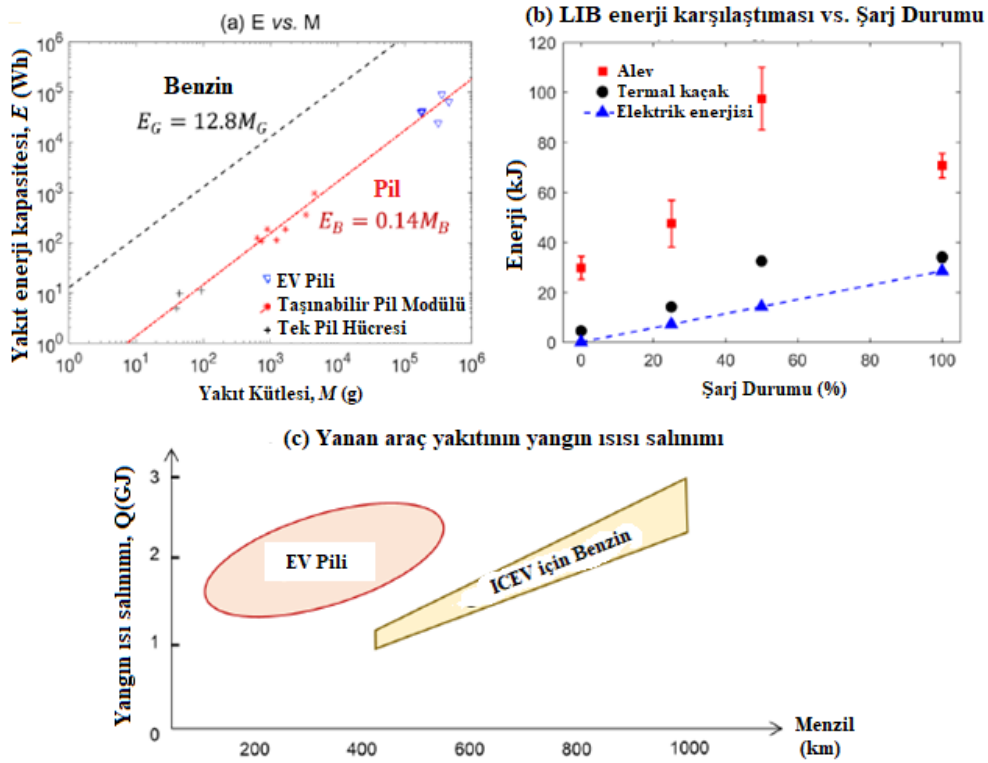
Termal Kaçak ve Pil Yangını: Termal kaçak, tek bir pil hücresi arızasının komşu hücrelere yayıldığı durumu ifade eder. İlgili hücre sayısı arttıkça, salınabilecek gaz ve enerji miktarı da artar. Önemli ölçüde yangın yayılma riski buna bağlı olarak artar. Tek bir hücreden kaynaklanabilecek ve büyük bir hücre paketinin termal kaçmasına neden olabilecek bu başarısızlığı anlamak ve önlemek çok önemlidir EA yangınlarına pil arızası neden olabilir ve LIB'nin en yaygın arızası termal kaçaktır. Termal kaçak, ekzotermik zincir reaksiyonlarının meydana geldiği ve soğutmanın üstesinden geldiği aşırı ısınma durumunda yaygın olarak gözlenen bir olgudur (Drysdale, 2011). LIB için, termal kaçak genellikle önemli ölçüde artan pil sıcaklığı (10°C/dk'dan) veya ekzotermik termokimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların tetiklendiğini gösteren güvenlik havalandırmasının etkinleştirilmesi anlamına gelir (Doughty ve diğ., 2012). Akü termal kaçaklarına genellikle büyük miktarda koyu dumanın, sıcak kıvılcımların ve güçlü jet alevlerinin püskürtülmesi eşlik eder (Larsson, 2017). Bu süreç tek tek hücreler içinde gerçekleştiğinden, bir pil boyunca termal kaçak veya yangının yayılmasına izin verildiğinde risk potansiyeli artar (Wang ve diğ., 2019).

Termal kaçak başladıktan sonra, emniyet valfinden veya akü yüzeyindeki çatlaklardan duman çıkar. Bu duman, yanıcı ve zehirli gazların bir karışımından oluşur. Yanıcı gazlar, yangın, kıvılcım ve elektrik arkları gibi yakındaki tutuşturma kaynakları tarafından tutuşabilir hatta kötü soğutma koşulu nedeniyle daha sonra kendi kendine de tutuşabilir. Ortaya çıkan alev daha sonra pili daha da ısıtabilir. Pil yüzeyinden çıkan gaz salınım hızı, dahili gaz üretim hızından düşükse, pil hücresi de patlayabilir. Emniyet valfi, tipik olarak ateşleme öncesi termal kaçak işlemi sırasında üretilen birikmiş gazın bir kısmını serbest bırakabilir. Ancak hücrenin, alev radyasyonu veya yakındaki yanan bir pil gibi harici ısınmasını engelleyemeyebilir. Ek olarak, salınan gazın kapalı bir alanda birikmesine ve çevredeki oksijenle karışmasına izin verilirse, bir kıvılcım ile bir gaz patlaması meydana gelebilir (Wang ve diğ., 2019; Drysdale, 2011).

EA pil yangınından enerji salınımı: Hem ICEV hem de EA, güç sistemi veya yakıt (sıvı petrol yakıtı veya pil) ve yanıcı plastik bileşenler dahil olmak üzere büyük miktarda yanıcı malzeme içerir. Modern araçlar için, araçta kullanılan plastiklerin kütlesi 100 ile 200 kg arasında değişmektedir (Kumar, 2015). Bu da benzinden daha büyüktür (50 kg'dan az). Alev geciktirici içermeyen yaygın plastiklerin yanma ısısı benzinden çok

farklı olmadığından, yanan plastik bileşenlerden toplam ısı salınımı olabilir (Iguchi, 2015). Özellikle benzin deposu dolu değilse araç yangınına büyük katkı sağlar. Bununla birlikte, plastik bileşenler açısından ICEV ve EA arasında büyük bir fark yoktur, bu nedenle en büyük fark güç sistemleri ve yakıttır.

LIB birçok farklı yanıcı bileşen içerdiğinden, yanma ısısı kimyaya, paketlenmeye, kapasiteye ve şarj durumuna (SOC) bağlıdır. Örneğin; 2,9 Ah (11 Wh) ticari kese tipi LIB için, yanma ısısı yaklaşık 4 MJ/kg iken, 18650 silindirik bir pil için yaklaşık 2 MJ/kg (Wang ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2016). Genel olarak, LIB için yanma ısısı, benzinden bir büyüklük sırası daha küçüktür. Bununla birlikte, pilin küçük (kimyasal veya elektriksel) enerji yoğunluğu nedeniyle, EA pil takımının ağırlığı, ICEV için benzinden en az bir büyüklük sırası daha büyüktür. Farklı ölçeklerdeki ticari LIB'lerin sınırlı verilerine dayanarak, enerjinin (Wh olarak E_B) ağırlığa (M_B g olarak) oranı, Şekil 3.4(a)'da özetlendiği gibi $E_B=0.14M_B$ 'ye uygun olabilir.



Şekil 3.4. (a) LIB'lerin depolanan enerjisi ve kütlesi, (b) pil yangınından kaynaklanan alev ısısı, termal kaçak iç ısısalınımın karşılaştırması , ve bir 18650 NMC pilinin SOC'ye karşı depolanan elektrik enerjisi ve (c) yanan araç yakıtının yangın ısısalınımı ile menzile karşı salınımı (Liu ve diğ., 2015)

Bataryada depolanan elektrik enerjisiyle karşılaştırıldığında, hem bataryanın içindeki termal kaçak ısı (yani dahili ısı) hem de bataryadan püskürtülen yanıcı gazların (yani, alev ısısı), çok daha yüksektir (Wang ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2016). Şekil 3.4.(b)'de özetlendiği gibi, pil yangını, SOC'ye bağlı olarak depolanan elektrik enerjisinin (veya kinetik enerjinin) 5~10 kat daha fazla enerjisini serbest bırakabilir.

Duman ve Zehirlilik: Pil sıcaklığı yaklaşık 150°C'yi aştığında, termal kaçak için büyük bir risk vardır. Termal kaçak başlatıldığında, hücre veya güvenlik valfi patlayacak ve zehirli gaz salacaktır. Termal kaçak yayılımı arttıkça, daha fazla pil hücresi daha fazla duman ve zehirli gaz üretmez. Bu zehirli gazlar, örneğin hidrojen florür (HF), hidrojen siyanür (HCN), karbon monoksit (CO), vb dir (Ribièreve diğ, 2012). Bu gazların solunması baş dönmesi, baş ağrısı, koma, bilinç kaybı ve hatta ölümlerle sonuçlanabilir (Larsson, 2016). LIB hücresi içindeki flor içeriği, HF'den daha toksik olabilen fosfor oksiflorürü (POF₃) de oluşturabilir. HF ve POF₃ üretimi için reaksiyon formüllerinin gösterimi Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)'deki gibi;



Hem ICEV hem de EV yangınlarında açığa çıkan zehirli gazların miktarına ilişkin bilgiler çok sınırlıdır. Lecocq ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen testler Tablo 3.3'de gösterildiği gibi bu konu hakkında biraz bilgi verir (Lecocq ve diğ., 2016). EA'lar tarafından salınan toplam HF miktarının, dikkate alınan ICEV'ler için ölçülenin kabaca iki katı olduğu bulunmuştur (Lecocq, 2012). LIB yanmaya başladığında tespit edilen HF miktarları, aracın başka bir bölümünde yangın başladıktan 30 dakika sonrasına kadar artış göstermemiştir. Yangın LIB'de başlamışsa, bu katkı daha erken fark edilebilir. Bununla birlikte bu emisyonun riski, büyük ölçüde olayın senaryosuna bağlıdır. Dış senaryolar için, HF muhtemelen yükselecek ve hızla dağılacaktır. Oysa kapalı alanlarda gazlar tahliye edilmezse bu sorun olabilir. Ancak bunu tam olarak belirlemek için daha fazla tam ölçekli teste ihtiyaç vardır. EA yangınından zehirli buharların ve gazların uzaklaştırılması için su püskürtme jeti uygulanması da tavsiye edilir. ICEV, EV ve LIB

yangınlarında açığa çıkan HF gibi asit gazlarının üzerlerine su püskürtülerek azaltılabilir (Matulka, 2019; Verband VDA, 2017; Thermal, 2019). Su spreyinin etkinliği ölçülmemiş olsa da, bu yöntemin kimyasal yangınların etkilerini hafifletirken hali hazırda kullanıldığı ve bu nedenle itfaiyecilere sahadaki EA yangın olaylarının zorluklarını azaltmak için yararlı bir araç sağlayabileceği iddia edilmektedir.

Tablo 3.3. Tam ölçekli EA yangın testlerinden kaynaklanan zehirli gaz emisyonlarının listesi (Lecocq, 2012)

Araç	Ağırlık	Pil veya Yakıt Kapasitesi	Toplam CO (kg)	Toplam HF (kg)
Bilinmeyen BEV	1122	16.5 kWh	10.4	1.5
Bilinmeyen ICEV	1128	Tam depo dizel	12.0	0.6
Bilinmeyen BEV	1501	23.5 kWh	11.7	1.5
Bilinmeyen ICEV	1404	Tam depo dizel	15.7	0.8

Tekli pil hücreleri ve pil takımları üzerinde yapılan yangın testiyle karşılaştırıldığında örneğin, bir EA'nın bir yangındaki gerçek davranışı hakkında hala nispeten az bilgi bulunmaktadır. Tam ölçekli yangın testlerinin maliyeti yüksektir ve genellikle ticari sınırlarla sınırlandırılır. Bununla birlikte, küçük ölçekli LIB testlerinin bilimsel anlayışı ve EA yangın kazalarının birikmiş veri tabanı ile yangın davranışları için makul tahminler yapılabilir (Wang ve diğ., 2019; Ribièreve diğ, 2012).

3.3. Yangınla Mücadele Testleri

Li-ion-çekişli akülerin yanma davranışı hakkında ek bilgi toplamak ve yangınla mücadele için, bir test serisi içinde üç test yapıldı. Sıcaklıkları, piller ve yangınla mücadele için gerekli su miktarı kayıt altına alındı. LIB'lerin her biri 17.6 kWh kapasiteye ve yaklaşık 175 kg ağırlığa sahiptir. Bu tip pillerde metalik lityum yoktur. Şarj durumu (SOC) %95 'dir.

LIB'lerin muhafazası, gövde sacından tamamen sızdırmaz iki parçadan yapılmıştır. Kalınlığı tava 2,4 mm, üst kapağınki 1 mm'dir. Muhafazaların doğrudan su girişi için açıklıkları yoktu. LIB'ler, elektrikli bir araçta montaj yönelimlerine göre bir destek çerçevesine yerleştirildi. Destek çerçevesi Şekil 3.5 (a)'daki gibi bir tepsinin içine yerleştirildi. Çerçevenin iki tarafı kapatılmıştır. Tepsi, ateşleme kaynağı olarak 45 litre

n-heptan ile dolduruldu. Başlatma ateşi sonrası yaklaşık 11 dakika boyunca Şekil 3.5 (b)'deki gibi yandı. Yangın söndürme çalışmalarına 20. dakikada başlandı.



Şekil 3.5. Yangınla mücadele testi (a): Bir tepsiye yerleştirilmiş destek çerçevesindeki pil; (b): Ateşleme kaynağı olarak n-heptan ile doldurulmuş hali

LIB muhafazalarına altı termokupl sabitlendi. Daha sonra termokuplların sıcaklıkları 1 Hz örnekleme hızında bir veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Ortam sıcaklığı 20 °C ile 26 °C arasında değişti.

Tüm dünyada itfaiye ekipleri tarafından öncelikli olarak kullanılan söndürme maddesi su olduğundan LIB 1 su ile söndürüldü. Su, standartlaştırılmış bir hidrant aracılığıyla sağlandı. Su bir AWG tipi CM nozul (DIN 14365) kullanılarak çalışmalar başladı. Ön sınırlayıcı sabitlendi ve su akışını sınırlandı. Maksimum tam jette 100l/dak hızı. Su akış hızı kademesiz olarak ayarlanabilir. 0l/dak ile 100l/dak arasında kontrol kolu, tam jet ve püskürtme jeti mümkündür.

LIB 2 için F-500 katkı maddesi kullanılmıştır. Bu, araç yangınla mücadelede iyi bir performans göstermiştir. Su, Test 1'deki gibi aynı hidrant tarafından sağlandı. Söndüme için bir AWG F-500 için özel olarak tasarlanmış TurboSpritze 2000 Venturi 75 – C 2L kullanıldı. Çalışma venturi prensibine göre, katkı maddesi için 2 litrelik bir hazneye sahiptir. Maksimum su akış hızı 75l/dk ile sınırlıdır. Karışım oranı %1 olarak ayarlandı. Su akış hızı kademesiz olarak 0l/dak ve 75l/dak arasında düzenlenebilir.

LIB 3 için Firesorb® katkı maddesi kullanıldı. Bu, yangın testlerinde iyi bir performans göstermiştir. Robert Bosch GmbH tarafından yapılan küçük Li-ion alet pilleri su ile karıştırıldığında bir ısı kalkanı oluşturur. İyi soğutma kapasitesi ve suyun buharlaşma

hızını azaltmak adına jel eklemek için katkı maddesi DIN 14384'e göre 200 l/dak akış hızı ve bir karıştırma ile sıralı indüktör Z2R %1.8 oranında kullanılmıştır. Sınırlayıcı kaldırıldı; teorik maksimum akış hızı 200l/dk idi. Artan sürtünme nedeniyle (indüktör + üretilen jel) gerçek akış hızı maksimum 90 l/dk idi. N-heptanın ateşlenmesinden sonra, ilk görünür etki için üç testin hepsinde yaklaşık 8 dakika sürdü. Şekil 3.6'deki gibi ark parlamaları görülmüştür.



Şekil 3.6. N-heptan ile 8. dakikada görülen ark parlaması

Bir sonraki yangın sırasında basınç tahliye cihazları (PRD) birkaç kez açıldı. Kaçan gaz, n-heptan hala yanarken Şekil 3.7'deki gibi yaklaşık 200 cm uzunluğunda parlama ateşine yol açtı. Kısa devreler, kaynak alevlerine benzer parlak beyaz alevlere yol açtı. LIB'ler muhafazaları hasar gördü ve birkaç küçük delik ile sonuçlandı. Birkaç gram sıvı alüminyum 2 metreden daha az bir yarıçap içinde gelen deliklerden dışarı atıldı.

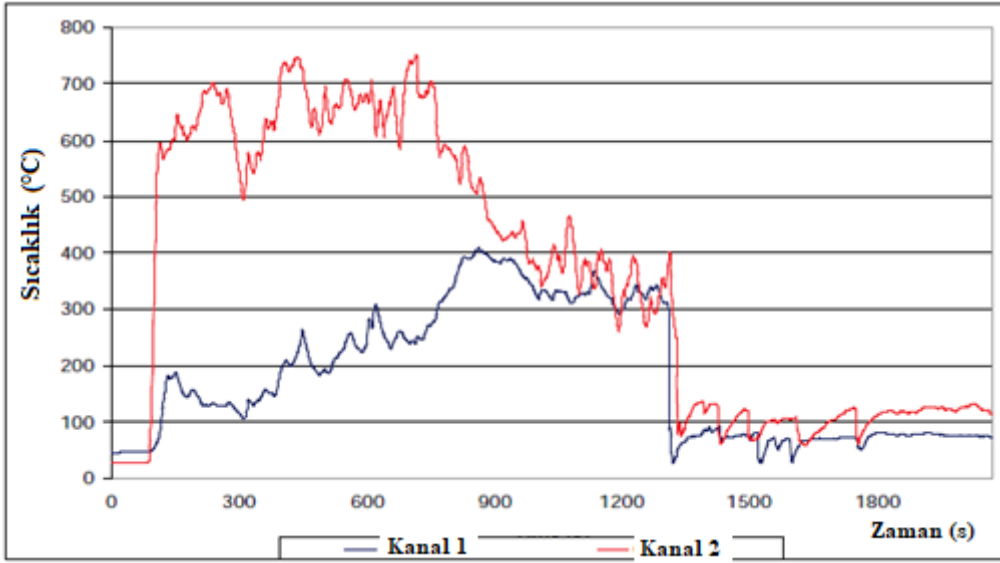
N-heptan yakıldıktan sonra yaklaşık 11 dakika sonra LIB'ler bağımsız olarak yandı. Basınç tahliye cihazlarında görünen alevler bu aşamada basınç tahliye cihazları olmadan açıkça daha küçüktür. Elektrik klemenslerinin çevresinde, muhafazadaki deliklerde ve alt tarafta soğutma sistemi bağlantılarında 40 cm uzunluğa kadar alevler sürekli yanmıştır. Yanan LIB'lerden açık renkli duman çıktığı, duman miktarı yanan benzinden yayılandan çok daha az olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.7. Destekleyici heptan ateşi hala varken LIB 2'nin bir PRD'sinin açılmasından sonra alev parlamasının meydana gelmesi

N-heptanı tutuşturduktan hemen sonra ölçülen sıcaklıklar hızla yükseldi. LIB'nin altında ve dolayısıyla doğrudan ateşin üzerinde sensör monte edildi ve 750°C civarında sıcaklık ölçüldü. N-heptan ile artık yanan tüm sıcaklıklar azaldı. Yangının başlamasıyla sıcaklıklarla mücadele gövdede hemen 100°C'nin altına ve altta 130°C civarında sıcaklıklara düştü. Sensörlerden alınan sıcaklık değerleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Yangınlar, gerektiği kadar az su kullanılması yaklaşımıyla iyi yönetilerek söndürüldü. Bu ilk pil su ile söndürüldü. 1.260 saniyeden başlayarak yaklaşık 40 saniye sürdü ve alevleri söndürmek için 70 litre kullanıldı. Ağır bir şekilde soğutmak için birkaç kısa su darbesi izledi. Sigara dumanı gibi beyaz bir duman yayılmaya başladı. Yangını söndürmeye başladıktan 144 saniye sonra LIB yeniden alev aldı. Sonrasında bu yangını söndürmek için sonraki dakikalarda pil, azaltılmış su akışıyla soğutuldu. Ardından beyaz dumanın azaldığı açıkça görüldü. İlk 4 dakikada içinde yaklaşık 200 litre su kullanılmıştır. LIB ısındı ve tekrar büyük miktarda duman çıkardı. LIB'yi az duman seviyesine kadar soğutmak için 200 litre daha su gerekli görülmüştür. Söndürme işlemi 17 dakika 30 saniye sürmüştür ve kullanılan su miktarı 400 litre olmuştur.



Şekil 3.8. LIB Muhafazasına (mavi) monte edilen sensörün sıcaklık özellikleri ve muhafazanın altına monte edilmiş sensör (kırmızı)

İkinci yangın ise %1 F-500 karışımı ile söndürüldü. F-500 arasındaki ilk temas ile alevler hemen kayboldu. Yangın yaklaşık 14 saniye sürdü ve 15 litre su kullanıldı. Sıcaklıklar test 1'deki gibi düştü. Test 1'in aksine tekrar yükselmedi. Test 1'e benzer durumda Şekil 3.9'de görüleceği üzere LIB muazzam miktarda beyaz duman/buhar karışımı yaydı. Bunu azaltmak için test 2'de duman miktarını birkaç F-500 darbesi kullanıldı.



Şekil 3.9. LIB 2 alevlerini söndürdükten sonra beyaz duman/buhar meydana geldi

Üçüncü yangın ise %1.8 Firesorb® karışımı ile söndürüldü. Burada da alevler çok hızlı söndürüldü. Daha fazla alevin görünmemesi yaklaşık 5 saniye sürdü. Yangınla mücadelenin ilk aşaması hep birlikte 12 saniye sürdü ve yaklaşık 40 litre kullanıldı. Sıcaklıklar düştü ve test 2'deki gibi düşük bir seviyede kaldı. Ayrıca burada da büyük miktarlarda beyaz duman/buhar çıktı. Test 3'te kullanılan toplam su miktarı yaklaşık 120 litredir.

3.4. BEV'leri İçeren Tipik Yangın Kazaları

Lityum iyon bataryalar, üretici tarafından tavsiye edilen sınırlar içinde depolanır ve çalıştırılırsa, LIB'lerin arıza oranınının 40 milyonda 1 olduğu tahmin edilmektedir (Doughty, 2012). Ancak aşırı şarj, harici ısıtma ve mekanik kötüye kullanım gibi öngörülemeyen durumlar bu arıza olasılığını önemli ölçüde artırabilir. Ticari LIB hücrelerine çeşitli güvenlik cihazları dahil edilmiş olsa da, birçoğu hücre üreticileri ve ürünlerinde LIB teknolojisini kullanan şirketler için önemli olumsuz etkilere neden olan çok sayıda yüksek profilli pil arızası kazası Tablo 3.4'de gösterilmiştir. LIB arızasının neden olduğu son zamanlardaki yüksek profilli kazalardan bazılarını gösterilmiştir. Bu liste, küçük tüketici elektroniğinden büyük EA'lara ve uçaklara kadar geniş bir ürün yelpazesini içerir. Bu kazaların temel nedenleri arasında aşırı ısınma, kısa devre, aşırı şarj, kendi kendine ısınma veya mekanik çarpışma yer alır. LIB'leri içeren çok sayıda tehlikeli kaza nedeniyle, bu cihazların nakliyesi ve depolanması ile ilgili düzenlemeler değiştirilmiştir. Örneğin, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), LIB'lerin yolcu uçaklarında kargo olarak gönderilmesini yasakladı. Piller “yalnızca kargo” uçaklarında gönderildiğinde, şarj durumları (SOC) %30'dan az olmalıdır (IATA, 2016).

Daha küçük ve daha hafif elektronik cihazlara yönelik sürekli talep, LIB enerji yoğunluğunu artırır ve bu da potansiyel olarak daha yıkıcı kazalara yol açabilir. Akü termal kaçak durumuna geçtiğinde, partiküllerin yanı sıra yanıcı ve zehirli gazları havalandırabilir ve çıkarabilir. Jet alevi oluşturabilir ve hatta patlayabilir. Kazalardan alınan dersler bize LIB teknolojisi güvenliğinin ciddi bir sorun olduğunu öğretmiştir. Bu nedenle, daha güvenli ve daha yüksek enerji yoğunluklu piller geliştirmek için LIB arıza durumlarını anlamak önemlidir.

Tablo 3.4. Son birkaç yılda bazı LIB yangın ve patlama kazaları

No	Tarih	Kazalar	Kaza nedenleri
1	Mart 2010	İki iPod Nano müzik çalar aşırı ısındı ve alev aldı, Japonya.	Aşırı ısınmış LIB'lerin neden olduğu
2	26 Nisan 2010	Acer, 2006'da Dell, Apple, Toshiba, Lenovo ve Sony'nin yaptığı gibi 2700 dizüstü bilgisayar pilini geri çağırıldı.	Aşırı ısınmış LIB'lerin neden olduğu
3	11 Nisan 2011	EA taksi alev aldı, Hangzhou, Çin	Kısa devre nedeniyle elektrolit yandı
4	Ekim 2013 - Kasım 2013	6 Tesla Model S EV aracı alev aldı	Çarpma nedeniyle pilin kısa devresi, kendi kendine tutuşması
5	Ocak 2013, Şubat 2014	Boeing 747'nin üç yangın kazası sırasıyla Boston Amerika, Takamatsu, Tokyo Japonya'da meydana geldi.	LIB'lerin dahili kısa devresi ve arızası
6	Nisan 2015	EA otobüsü şarj sırasında alev aldı, Shenzhen, Çin	pilin aşırı şarj edilmesi
7	31 Mayıs 2016	LIB'nin deposunda patlama meydana geldi, Jiangsu, Çin	Tam şarjlı LIB'lerin neden olduğu, belki kendi kendine tutuşma
8	Ağustos 2016	Samsung Note 7 akıllı telefon patlaması	Pil ve diğer bileşenler arasındaki boşluk yetersiz, kısa devreye neden oldu.
9	16 Mayıs 2017	Panasonic, 270 binden fazla LIB'yi geri çağıracağını duyurdu	Potansiyel aşırı ısınma ve yangın kazaları
10	18 Ekim 2017	Elektrikli araç alev aldı, Avusturya	Kaza sonrası bataryaların alev alması
11	Ocak 2018	Tesla Model S EV araba kendiliğinden tutuştu, Çin	Akü sistemi kendiliğinden tutuşur
12	2 Temmuz 2018	4 MW/12 MWh enerji depolama sistemi alev aldı ve patladı Kore	Bir LIB alev aldı ve 3500'den fazla LIB'ye yayıldı.

Kendiliğinden Tutuşma: Şekil 3.10'daki yangın kazası 31 Ağustos 2018'de Çin'in Guangzhou kentindeki bir BEV'de (Lifan 650) meydana gelmiştir (URL-11). Elektrikli araç kendiliğinden tutuşmuş ve yangın zamanında söndürülemediği için tamamen kül olmuştur. Lifan 650 EA yeni bir model ve olay sırasında sadece iki aydır piyasadaydı. Yangın otomobilin altından başladı. Burası aynı zamanda pil takımının bulunduğu yerd. Yakma işlemi sırasında yangına bir patlama sesi de eşlik etti. Bu ses, güvenlik disklerinin patlamasından kaynaklanmıştır. Ek olarak, birkaç küçük patlama ve zehirli siyah dumanın püskürtülmesi meydana geldi.



Şekil 3.10. Bir Lifan 650 EV'nin araç şasisine takılı pil takımında yangının başladığı ve EA'nın etkin yangın söndürme olmadan yangınla yok olma durumu (URL-11)

Şarj sırasında: 1 Ocak 2016'da bir Tesla Model S, şarj işlemi sırasında alev aldı. Bu olayın sonucu Şekil 3.11'da gösterilmektedir. Haberlere göre, bu olayın ana nedeni, araçtaki şarj ekipmanındaki bir hatayla ilgiliydi. Yangın şarj ekipmanında başladıktan sonra büyüdü ve pil takımı da dahil olmak üzere arabanın geri kalanına yayıldı (Herron ve diğ., 2016). Pil takımı ateşlendiğinde kıvılcıklar ve alevler çıkarmaya başladı. Son olarak, yolcu bölmesine girildiğinde yangının kontrolü kaybedildi.



Şekil 3.11. Şarj esnasında yanan bir elektrikli araç

Yüksek Hızlı Çarpışma: Bir Tesla Model S, büyük bir metalik nesne biçimindeki yol enkazıyla çarpıştıktan sonra alev aldı (Blanco, 2013). Nesne pil takımına alttan girmiş ve Şekil 3.12 'de gösterilen yangını başlatmıştır. Neyse ki, elektrikli araç uyarı sistemi sorunu keşfetti ve sürücüye aracı güvenli bir yere çekmesi talimatını verdi. Bu, sürücüye yangın çıkmadan önce araçtan çıkması için yeterli zaman sağladı. Bu olaydan sonra

Tesla, yoldaki döküntülerin pil paketinin içeriğine herhangi bir zarar vermesini önlemek için EA'larını balistik kalkanlar ve deflektörlerle güçlendirdi.



Şekil 3.12. Tesla Model S Seattle, ABD yakınlarında bir çarpışmadan sonra alev aldı (Blanco, 2013)

Yeniden Ateşleme: EA'ları içeren olaylar, LIB'ye verilen toplam hasar miktarından kaynaklanan ikincil termal olaylara da yol açabilir (NTSB, 2018). Yani, bir veya birden çok kez yeniden tutuşmanın gerçekleştiği durumlar vardır. Bunun bir örneği, Florida, ABD'de 140 km/s hızla bir duvara çarpan Tesla Model S'dir. Çarpmanın etkisiyle araç alevler içinde kaldı. Yangının söndürülmesi ve araç olay yerinden uzaklaştırılmasının ardından yeniden alev aldı. Çekici hurda olan aracı almaya geldiğinde söndürülmüş araç yeniden alev aldı.

2018'de meydana gelen elektrik araçlara yangınlarına ait bir listeyi Tablo 3.5'de gösterilmiştir. Şekil 3.13'de de bu tür olayların bazı fotoğraflarını gösterir. Genel olarak, EA yangın kazalarının çoğu, LIB'nin termal kaçaklarından kaynaklanır. Elektrikli araç yangınlarının yaygın nedenleri arasında; şarj işlemi sırasında yangın, sürüş sırasında kendi kendine tutuşma, trafik kazasından sonra yangın gibi veya suistimal nedeniyle park edilmiş araçlarda tutuşma yer alır. Bu nedenle, normal şarj, park etme ve sürüş koşulları sırasında, LIB'nin termal kaçıışı nedeniyle kendiliğinden tutuşma eğilimi, EA yangınını benzersiz ve içten yanmalı motorlu araç yangınlarından çok farklı kılmaktadır.

Tablo 3.5. 2018 yılında meydana gelen bazı elektrikli araç yangınlarının listesi

Tarih	Konum	Araç	Olay	Yorumlar
Ocak	Chongqing, China	Tesla, BEV	Park halindeyken araç yangını	Kendiliğinden tutuşma (URL-8)
15 Mart	Bangkok, Thailand	Porsche Panamera, PHEV	Şarj olurken yangın	Arabanın şarj kablosu, evin oturma odasında prize takılıyken yangın meydana gelir ve yangın eve de sıçrar (URL-7)
18 Mart	Catalonia, Spain	BMW i3 REX, PHEV	Park halindeyken araç yangını	Kendiliğinden tutuşma (Loveday, 2018)
23 Mart	California, USA	Tesla Model X, BEV	Kaza sonrası yangın	Yangın olay yerinde söndürüldü ancak 5 gün sonra iki kez yeniden alevlendi. (NTSB, 2018)
Mayıs	Anhui, China	Other, BEV	Şarj olurken yangın	(Zhou, 2018)
Mayıs		Yiema, BEV	Şarj olurken yangın	(Zhou, 2018)
08 Mayıs	Florida, USA	Tesla Model S, BEV	Kaza sonrası yangın	Yangın önce kısa sürede söndürüldü, ancak çekiciye yükleme sırasında ve çekici alanında yeniden alevlendi. (NTSB Highway HWY18FH013, 2018)
15 Mayıs	Ticino, Switzerland	Tesla, BEV	Kaza sonrası yangın	Araç bariyere çarptı, takla attı ve alevler içinde kaldı. (Revill, 2018)
20 Mayıs	Hangzhou, China	Jiangling, BEV	Şarj olurken yangın	(Zhou, 2018)
21 Mayıs	Hubei, China	Zhong Tai, BEV	Sürüş sırasında yangın	Trafik kazası olmadan kendiliğinden tutuşan (Zhou, 2018)
28 Mayıs	Shenzhen, China	Diğer, BEV	Şarj olurken yangın	(Zhou, 2018)
04 Haziran	Shandong, China	Diğer, BEV	Sürüş sırasında yangın	Trafik kazası olmadan kendiliğinden tutuşan (Zhou, 2018)
05 Haziran	Beijing, China	Diğer, BEV	Şarj olurken yangın	(Zhou, 2018)
15 Haziran	California, USA	Tesla Model S, BEV	Sürüş sırasında yangın	Yangın yeniden alevlenmeden olay yerinde söndürüldü (Battery Fire in Electric-powered Passenger Car. National Transportation Safety Board, 2018)
12 Aralık	Gelderland, Netherlands	Jaguar I-Pace, BEV	Park halindeyken araç yangını	Aracın önü yanmıştı, ancak pil takımına müdahale edilmedi (Deick, 2018).
18 Aralık	California, USA	Tesla Model S	Park halindeyken araç yangını	Atölye otoparkında yangın çıktı ve yangın iki kez yeniden alevlendi (Gutman ve Yuon, 2018)

Batarya sadece EA'ya güç sağlayan yakıt değil, aynı zamanda EA yangınlarının ana nedenlerinden biridir. Pilin termal kaçağı mekanizmalarının yanı sıra pil yangını olayları, riskleri ve tehlikeleri gözden geçirilmiştir (Wang ve diğ., 2012; Ouyang ve diğ., 2019). Bununla birlikte, elektrikli araçların genel yangın riski ve tehlikeleri hala

tam olarak anlaşılammamıştır. Elektrikli araç pazarının genişlemesiyle birlikte, elektrikli araç sahipliği sürekli artıyor. Bu arada, çözülmemiş yangın güvenliği sorunlarına rağmen, LIB'lerin enerji yoğunluğu artmaya devam ediyor. Sonuç olarak, elektrikli araçların yangın kazaları olasılığı artacaktır.



Şekil 3.13: Son yıllardaki tipik EA yangın kazaları: (a) Renault-Samsung elektrikli araç modeli 'SM3.Z.E' 15 Ocak 2016'da Kore'de sürüş sırasında alev aldı (Moon, 2016) (b) 26 Nisan 2015'te Shenzhen, Çin'de bir şarj istasyonunda tamamen pilli bir elektrikli otobüs alev aldı ve bu elektrikli otobüs alev aldığıda şarjda değildi (Pecht, 2015); (c) Bir Tesla Model S, 15 Haziran 2018'de ABD, Kaliforniya'da sürüş esnasında duman çıktı. Yangında 1135 L su ve köpük enjekte edilerek söndürüldü (NTSB, 2018) ; ve (d) EA yangın kazası 20 Mayıs 2018'de Hangzhou, Çin'de bir otoparkta meydana geldi (URL-12).

3.5. Batarya ile İlgili Geçmiş EA Yangın Kazalarından Dersler

Elektrikli araç yangınlarının toplam sayısı hala ICEV yangınlarından (Bisschop ve diğ., 2019; Tesla, 2019) çok daha küçük olsa da, bunun temel nedeni elektrikli araçların küresel pazar payının hala ICEV'lerden birkaç kat daha küçük olmasıyla açıklanabilir.

EA yangın kazalarının ICEV'lerdekine benzer bir eğilim izlemesi bekleniyor. Ne yazık ki şu ana kadar elektrikli araç kazalarının farklı nedenlerinin (kundaklama, kendi kendine tutuşma gibi) neler olduğuyla ilgili net bir istatistik bulunmamaktadır. ICEV'ler için çok sayıda kendiliğinden tutuşan yangın kazası olduğunu ancak çoğunluğun eski

araçların başına gelmektedir. Hem ICEV hem de EA için, kendiliğinden tutuşan yangın kazalarının çoğu, sırasıyla güç sistemlerinde, yani motorda ve aküde başlar. Dünyadaki EA'ların çoğu hala nispeten yeni olduğundan ve EA'ların sayısı hala hızla arttığından, ICEV ve EA arasında yangın riskinin adil bir karşılaştırmasını yapmak istatistiksel olarak mümkün değildir.

Bir yangın olayı EA'ları içerdiğinde, bataryaya genellikle EA yangını başlatmanın birincil nedeni olarak atıfta bulunulur. Bununla birlikte, buna yol açabilecek birçok başka faktör vardır. Örneğin; şarj sisteminin arızalanması, kabloların aşırı yüklenmesi, diğer yanıcı maddelerin tutuşması veya kundakçılık (Huang ve diğ., 2020). EA'larda meydana gelen bu yangın olayları nispeten yenidir ve genellikle karmaşıktır. Bununla birlikte, birkaç kategoriye ayrılabilirler:

- Elektrikli araç dururken alev alır. Genellikle kendiliğinden tutuşma olarak adlandırılır. Bu, aşırı hava koşullarıyla ilgili olabilir. Düşük/yüksek sıcaklıklar veya yüksek nem örnek olarak verilebilir. Hatta 'kendiliğinden' dahili hücre yetmezliği ile ilgili de olabilir.
- EA şarj olurken alev alabilir. Bu arıza, LIB'nin aşırı şarj nedeniyle arızalanmasıyla ilgili olabilir. Ancak daha yaygın olarak hatalı veya güvensiz şarj istasyonları ve/veya kablolarla ilgilidir. Bu aynı zamanda diğer elektrikli cihazların LIB yangın kazalarının da ana nedenidir.
- Bir EA'nın LIB'si, bir trafik kazası veya diğer nedenler sonucunda hasar görür. Pil takımına verilen hasar o kadar şiddetlidir ki, LIB çarpışma sırasında veya hemen sonrasında tutuşur. Bir EA'nın bu tür kazalara karışma olasılığı, caddelerdeki artan EA sayısı ile artması muhtemeldir.
- LIB ve EA, kundaklama, orman yangınları veya aracın yakınında yanan bir yapı gibi dış etkenler tarafından yakılabilir.

4. YANGIN GÜVENLİĞİ

Bir EA'da dikkate alınması gereken birçok yangın güvenliği seviyesi vardır. İdeal bir durumda, ayrı pil hücreleri, aşırı ısınmaya ve termal kaçaklara yol açabilecek kısa devreleri ve diğer arızaları önleyecek şekilde tasarlanır. Hücreler, ideal olarak hücreler arasında termal kaçakların yayılmasını önlemek için tasarlanacak modüller halinde düzenlenmiştir. Modüller, yangın olasılığını tespit edip önlemeye yönelik güvenlik sistem(ler)i ile donatılmış bir pil takımına yerleştirilecek veya bir yangın başlamışsa, pilde büyük hasara neden olmadan önce söndürülecektir. Batarya yönetim sistemi (BYS), aküye yönelik hem dahili hem de harici tüm tehditleri ele alabilecek ve gerektiğinde araçtaki diğer güvenlik sistemleriyle verimli bir şekilde etkileşime girebilecektir. Ek olarak, aracın tasarımı, çarpma durumunda pil takımının/takımlarının korunmasına yönelik güvenlik önlemlerini içermektedir (National, 2012).

Yangın güvenlik sistemi seviyeleri, eşmerkezli dairelerin çekirdeğinin pilin en temel bileşenini, her hücrenin içindeki kimyayı gösterdiği Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Daha sonra hücre tasarımı ve paketleme, akım sınırlayıcılar, akü kontaktörleri, BYS, sistem tasarımı ve muhafazası ve termal yönetim dahil olmak üzere kısa devre koruması gelir. En dıştaki daire, pil yangın güvenliğinin aracın tasarımına entegrasyonunu temsil eder (Larsson ve diğ., 2016). Ahlberg Tidblad'a göre çoğu akü ve araç üreticisi, normalde araç onayları için kapsamlı test programlarıyla sağlanan tüm bu güvenlik seviyelerini dikkate alır (Tidblad, 2018).



Şekil 4.1 EA'lar için pil yangın güvenlik sistemi seviyelerinin şematik diyagramı (Larsson ve diğ., 2016)

4.1. Pil Hücresi Seviyesi

Hücre düzeyindeki güvenlik çözümleri, hücre için kimyasal/fiziksel güvenlik cihazlarını ve hücrenin izlenmesini içerir. Silindirik ve prizmatik hücreler için tasarlanmış güvenlik cihazları, pozitif sıcaklık katsayısı (PTC) gibi akım sınırlayıcıları ve akım kesme cihazı (CID) gibi akım kesicileri içerir (Lopez ve diğ., 2015). Birincisi direnci sıcaklığa göre değiştirirken ikincisi, hücre içinde artan iç basınç durumunda devreyi kırar. Bu, gazların tahliyesine yol açabilecek aşırı basınç durumlarını önlemek içindir. Termal kaçak durumunda, bir hücreden atılabilecek gazlar ve diğer malzemeler, ısıyı uzaklaştırmak ve gazları daha kontrollü bir şekilde yönlendirmek için kıvrımlı bir yol, bir alev tutucu veya bir geri akış önleyici içerebilen havalandırma valfleri aracılığıyla hücreleri korur (Ruiz ve Pfrang, 2018). Kese hücreleri bu cihazları kullanamaz ancak gazların daha kontrollü bir şekilde dışarı çıkmasına izin vermek için kese içinde kasıtlı olarak tasarlanmış zayıf noktalara sahip olabilir.

Kendinden daha iyi termal özelliklere sahip malzemeler kullanarak hücrelerin güvenliğini artırmaya yönelik çabalar, ayırıcı arızasını önlemek ve/veya ayırıcının termal büzülmesini en aza indirmek için esnek seramik ayırıcılar veya diğer türde modifiye ayırıcılar kullanmayı içerir. Daha az yanıcı veya yanıcı olmayan elektrolit malzeme, alevler nedeniyle ısı üretimini sınırlayabilir ve faz değiştiren malzemeler gibi termal kapasitesi artırılmış dolgu malzemelerinin kullanılması hücrelerin dağılmasına veya soğumasına yardımcı olabilir. Son olarak, katı hal pillerinde sıvı veya yanıcı elektrolitler yoktur. Bu nedenle gaz verme/havalandırma ve yangın riskini azaltır.

Bir LIB'deki ana oksijen kaynağı, termal kaçak sırasında oksijeni bozduğunda serbest bırakan katottur. Katodun geçiş metalleri ile işlenmesi, termal kaçakların meydana geldiği sıcaklığı artırır ve termal stabilitesine katkıda bulunabilir.

Hücrelerin durumunun izlenmesini içeren çok sayıda güvenlik planı vardır. Bu şemalar genellikle tüketici LIB endüstrisinden gelir ve akü sisteminin ağırlığını, hacmini ve maliyetini artırma eğiliminde olduklarından araçlarda kullanılan geniş formatlı aküler için uygun olmayabilir (Jeevarajan, 2014).

4.2. Pil Modülü Seviyesi

Hücreden hücreye termal kaçakların yayılmasını önlemenin bir yolu, modülleri, hücreler arasında ısı transferini zorlaştıracak şekilde tasarlamaktır. Bu, hücreler arasında açık alan bulunması, ısı kalkanları veya yalıtkanlar, soğutma plakaları, ısı iletkenleri, alev geciktirici bariyerler, şişen kaplamalar ve faz değıştiren malzemeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Seçim yöntemi, büyük ölçüde pil sisteminin özel son kullanımına, hücre tipine, modül konfigürasyonuna bağlıdır. Ayrıca çok sayıda başka termal yayılma önleme önlemi içerebilir. Bireysel hücrelerde olduğu gibi, yayılan gazları kontrol etmek, alevleri durdurmak ve modülün dışından oksijen girişini azaltmak veya önlemek için havalandırma delikleri modüle yerleştirilebilir (Ruiz ve Pfrang, 2018).

Modülün içindeki kablolar, termal yayılma riskini azaltacak şekilde tasarlanabilir. Hücreleri birbirine bağlayan sekmeler stratejik olarak yerleştirilebilir. Örneğin; aşırı ısındığında kırılacak şekilde yapılandırılmalıdır. Paralel bağlı birkaç hücre için sekme bağlantı konfigürasyonu dallı veya seri olabilir. Dallanmış konfigürasyonun, etkilenen bir hücrenin diğer hücrelerden elektriksel olarak daha iyi izole edilmesinden dolayı güvenliği arttırdığı gösterilmiştir (Lopez ve diğ., 2015).

Modül, alan, maliyet ve ağırlık kısıtlamaları izin veriyorsa, kendi özel termal yönetim sistemine ve/veya inert gaz sistemine sahip olacak şekilde tasarlanabilir.

4.3. Pil Paketi Seviyesi

Modüller için geçerli olan güvenlik çözümlerinin çoğu, pil takımlarına da uygulanabilir. Bu çözümlerin örnekleri arasında modüller arasında ısı transfer bariyerleri sağlanması, pil paketi duvarında stratejik olarak yerleştirilmiş havalandırma delikleri ve özel bir soğutma ve/veya soy gaz sistemine sahip olmak yer alır (Ruiz ve Pfrang, 2018). Büyük bir pil sistemi, birbirinden termal olarak izole edilmiş birkaç küçük pakete bölünebilir. Bu da büyük ölçekli termal yayılmaya karşı bir güvenlik seviyesi sağlar. Bu güvenlik önlemlerine ek olarak, pil paketi muhafazası, gelişmiş çarpma koruması için yapısal olarak da tasarlanabilir.

Elektrikli araçlarda LIB'yi barındıran alanlar, yüksek voltajlı akü modüllerinin doğrudan etkisi veya nüfuzu önlenecek şekilde tasarlanmalıdır. Elektrikli binek otomobiller için,

batarya paketlerinin güçlendirilmiş yerlere yerleştirilmesi, yapısal korumanın sağlanması ve boyutlarının sınırlandırılmasıyla şiddetli deformasyon şu anda önlenmektedir (Trattnig G. ve Leitgeb, 2014). Belirli darbe koşulları sırasında olası izinsiz girişleri azaltmak için pil paketleri ek takviyelerle sağlanabilir. AB çalışması OSTLER, bunu başarmak için pasif ve aktif koruma olmak üzere iki farklı yaklaşımı değerlendirdi. Bu teknikler, sırasıyla, bir çarpışma olayı sırasında yükü yaymak için yapının fiziksel mukavemetini arttırmaya veya şişirilebilir yapılardan yararlanmaya atıfta bulunur. Bu yöntemleri kullanarak, izinsiz giriş miktarını aktif koruma ile %26, pasif koruma kullanarak ise %58 azaltmayı başardılar (URL-10).

4.4. Araç Seviyesi

Bir EA yangını veya pil arızası durumunda çevreye verilen zararın en aza indirilmesini sağlamak için alınması gereken harici güvenlik önlemleri de vardır. Bu, termal yayılmayı yavaşlatmanın veya geciktirmenin değerini, park yerlerine şarj istasyonlarının yerleştirilmesini, hasarlı bir aracın enerjisinin nasıl kesilebileceğini, pil yangın söndürme ile ilgili endişeleri ve yanmış veya hasar görmüş bir EA'nın uygun şekilde saklanmasını içerir.

Bir araca monte edilmiş bir pil takımının içindeki termal kaçakların yayılmasını durdurmak çok zor olabileceği gerçeği yerine, bu bölümde tartışılan bazı güvenlik çözümlerini kullanarak yayılmayı yavaşlatmak veya geciktirmek makul bir yaklaşım olabilir. Bu, sorunu tespit etmek ve ona yanıt vermek için daha fazla zaman verebilir. Ayrıca aracı izole etmeyi, insanları tahliye etmeyi ve itfaiyenin gelmesi için hazırlanmayı da mümkün kılabilir.

EA'lar genellikle park halindeyken şarj edildiğinden, otoparkların tasarımında (özellikle yeraltı veya çok katlı otoparklar) şarj istasyonlarının en güvenli yerleşimi düşünülmelidir. Şarj istasyonlarının giriş/çıkış noktalarının yakınına veya iyi havalandırması olan ve yeterli yangın söndürme suyu kaynağına erişimi olan diğer yerlere yerleştirilmesi, gaz çıkışı ve yangınlarla ilişkili tehlikeleri en aza indirmeye yardımcı olabilir. Bununla birlikte, elektrikli araçların tahliye yollarının yakınına yerleştirilmesi, acil durum tahliye prosedürlerini potansiyel olarak karmaşık hale getirebileceğinden, bu dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

5. YANGINDAN KORUNMA VE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ

5.1. Lityum İyon Pilin Yangından Korunması

Isı, yanıcı ve/veya zehirli gaz üretimi, pil arızası tehlikesini belirleyen iki temel faktördür. Sonuç olarak, bir pil sisteminin güvenliği, ilk olarak ısı ve gaz üretimine yol açan durumdan kaçınmaktır. İkinci olarak, arızanın etkilerini hafifletmek için ısı ve gaz üretimini yöneterek geliştirilebilir. Daha güvenli LIB hücresinin tasarımı ya kimyanın ve/veya yapının modifikasyonu yoluyla stabilitenin artırılması ya da dahili güvenlik cihazlarının eklenmesi yoluyla elde edilebilir. Alternatif olarak, LIB içerenlerin güvenliği sistemler, etkin ısı yönetimi ve/veya yangın söndürme ile donatılarak geliştirilebilir.

5.1.1 Doğal Korunma Yöntemleri

Güvenliği artırmak için LIB bileşenlerinde değişiklik yapmak için önemli çabalar sarf edilmiştir. Değişkenler; katot, anot veya elektrolit modifikasyonları olarak kategorilere ayrılabilir.

5.1.1.1. Katot Değişkeni

Katot değişkeni, kaplama katodun termal stabilitesini iyileştirmek için yaygın bir formdur. $MnSiO_4$ yeni bir kaplama malzemesidir. $MnSiO_4$ kaplı LCO'nun, saf LCO'ya kıyasla aşırı yüklenmeye karşı daha iyi toleransa ve daha yüksek termal stabiliteye sahip olduğu gösterilmiştir (Yang, 2009).

5.1.1.2. Anot Değişkeni

Anot değişkeni, yüzey değişkenlerini ve elektrolit katkı maddelerini içerir. Anot üzerinde ultra ince doğrudan atomik katman birikimini kullanılmış olup sonuçlar Al_2O_3 atomik katman birikiminin doğal grafit kompozit elektrotların güvenlik performansını iyileştirebileceğini göstermiştir (Jung ve diğ., 2010).

5.1.1.3. Elektrolit

Organik çözücüler, LIB termal kaçak sonucu başlatılan alevli yanma süreci için ana yakıttır (Zeng ve diğ., 2015). Karbonat içeriği azaltılırsa, hücre 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldığında elektrolit gaz çıkışı en aza indirilebilir. Elektrolitte bulunan lityum tuzları, örneğin; $LiPF_6$ solventlerle reaksiyona girebilir. Bu reaksiyon, yüklü katodun yanı sıra lityumlu grafitin termal kararlılığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Wang ve diğ., 2009).

Elektrolit katkı maddeleri; elektrolit ve LIB hücrelerinin termal stabilitesini veya aşırı şarj koruma verimliliğini iyileştirme yetenekleri açısından test edilmiştir. Yanıcı olmayan fosfonat elektrolit, LFP katot ve alaşım anotların birleştirilmesiyle daha güvenli LIB'lerin elde edilebileceği belirlenmiştir. Fosfonat elektrolit, elektrokimyasal uyumluluğa ve güçlü yangın geciktiriciliğe sahiptir. Bu elektrolitteki LFP ve anot malzemeleri, geleneksel elektrolitlere benzer şarj-deşarj performansları gösterir (Zeng ve diğ., 2015).

İyonik sıvılar ve katı polimer elektrolitler; elektrolit katkı maddelerine ek olarak, geleneksel elektrolitler, LIB'lerin güvenliğini artırmak için iyonik sıvılar veya tamamen katı polimer elektrolitler ile değiştirildi (Moganty ve diğ., 2019). İyonik sıvılar iyonlardan oluşur. İyonlar arasındaki kulombik kuvvetler güçlüdür. Bu maddeler sonuç olarak çok viskozdur ve düşük buhar basıncına sahiptir. Düşük buhar basıncı iyonik sıvıların tutuşmasını zorlaştırır. Ancak yüksek viskoziteleri nispeten düşük elektrik iletkenlikleri ve diğer pil malzemeleriyle uyumsuzlukları onları elektrolit değişimi için ideal bir seçimden daha az yapar. Katı polimer elektrolit, yüksek güçlü lityum veya sodyum iyon pillerin yangın riski için uygun çözümlerden biri olarak kabul edilmektedir. Katı polimer elektrolitlerin sıvı elektrolitlere kıyasla uçucu olmama, düşük yanıcılık, kolay işlenebilirlik ve elektrokimyasal ve kimyasal kararlılık gibi bazı avantajları vardır. Ayrıca, katı polimer elektrolitler, pil üretiminde kapsamlı sızdırmazlık ihtiyacını ortadan kaldırabilir ve nihai maliyeti azaltabilir (Youcef ve diğ., 2019).

5.1.2. Güvenlik Cihazları

LIB'ye dahil edilen geleneksel güvenlik cihazları; güvenlik havalandırmalarını, akım kesme cihazını, pozitif sıcaklık katsayı cihazını, kapatma ayırıcısını ve batarya yönetim sistemini içerir.

5.1.2.1. Güvenlik Havalandırmaları ve Akım Kesme Cihazı

Güvenlik havalandırmaları, hücre içindeki basınç artışına tepki olarak açılır ve hücrenin patlamasını önlemek için gazların çıkışına izin verilir (Cherng ve diğ., 2018). Havalandırma açıklığı, elektrolitin buharlaşması ve gaz genişmesi nedeniyle endotermik bir süreçtir. Bu nedenle hücreyi soğutabilir ve daha fazla sıcaklık artışı riskini azaltabilir (Coman ve diğ., 2016). Ek olarak, emniyet menfezleri aynı zamanda bir akım kesme cihazı olarak da işlev görebilir. Alüminyum levha pozitif terminalin bir parçasıdır ve hücre içinde basınç oluştuğunda, alüminyum levha pozitif terminalden uzaklaşarak devreyi kesecek ve akım akışını önleyecektir.

5.1.2.2. Pozitif Sıcaklık Katsayısı Cihazı

Potansiyel olarak bir harici kısa devrenin neden olduğu istenmeyen yüksek akıma karşı koruma sağlamak için, bir pozitif sıcaklık katsayısı (PTC) akım sınırlama malzemesi sıklıkla bir LIB hücresine entegre edilir. PTC cihazı genellikle güvenli sıcaklık aralığında bir devreyi tamamlayan iletken parçacıklar içeren bir polimerden oluşur. Sıcaklık bu aralığın üzerine çıktığında polimer erir ve devreyi keser. Bu cihaz ayrıca, harici ısıtma nedeniyle hücre sıcaklığı güvenli aralığın üzerine çıktığında da tetiklenir (Balakrishnan ve diğ., 2006).

5.1.2.3. Batarya Yönetim Sistem (BYS)

LIB'lerin anormal sıcaklıklara veya elektrik yüklerine maruz kalmamasını sağlamak için BYS, bir pil modülüne veya tek hücreye dahil edilmiştir. BYS, pilin durumunu ve/veya çevresini izler. BYS sistemi, doğası gereği elektronik veya mekanik olabilir. Bir pakete, modüle veya tek bir hücreye hizmet vermek için kullanılabilir. BYS, SOC tahmini, deşarj derinliği, sağlık durumu ve işlev durumu, pilin aşırı ısınmadan korunması ve veri raporlama dahil olmak üzere çok çeşitli işlevlere sahip olabilir (Lu ve diğ., 2013).

Nispeten karmaşık bir BYS, diğer araç güvenlik sistemlerine entegre edilebilir veya BYS, nispeten basit olabilir ve bağımsız olarak çalışabilir. Tipik olarak, BYS en azından toplam akü akımını, toplam akü ve bireysel hücre voltajlarını ve modülün çeşitli yerlerindeki sıcaklığı izler. Ancak araçlarda, modül başına sadece bir sıcaklık sensörü ile ortaktır. LIB modülündeki sensörler, modülün maliyetini, ağırlığını ve hacmini azaltmak için tipik olarak en aza indirilir. Bu nedenle, bir sıcaklık sensörü hücreye yeterince yakın yerleştirilmemişse, tek bir hücrenin aşırı ısınması ve zamanında algılama olmaksızın havalandırması mümkündür. BYS gerekirse bazı sorunları azaltmak için harekete geçebilir, örneğin bir sıcaklık sensörü aşırı ısınma durumunu gösterirse BYS modülü pil takımını kapatabilir (Andersson ve diğ., 2017). Tablo 4.1 pil sistemini korumak için BYS'nin yanıt verebileceği veya veremeyeceği koşullara genel bir bakış sağlar. Gehandler ve arkadaşlarına göre BYS, genel olarak, aşağıdaki durumlara yanıt olarak akü sisteminin bağlantısını otomatik olarak keser (Gehandler ve diğ., 2017):

- Çok yüksek sıcaklık
- Düşük voltaj
- Aşırı voltaj
- Aşırı akım
- Bataryanın soğutma sisteminin arızası
- Hasarlı ve/veya hatalı tetiklenen çarpışma sensörü
- Araç devrilmeye başladı (sensör tarafından algılandığı gibi)
- Yalıtım hatası
- Ark gibi akım hatası

Tablo 4.1. BYS'nin akü sistemini koruyamadığı/koruyamadığı kötüye kullanım durumlarına ilişkin basitleştirilmiş bir genel bakış (Larsson F. and Mellander, 2017).

Kötüye Kullanım Türü	BYS Koruması ?	Koruma stratejisi
Harici pil takımı kısa devre	Evet	Sigorta veya muhtemelen kontaktörler kullanarak pili ayırın.
Harici hücre kısa devresi	Mümkün*	BYS, kısa devre akımının bir devre kesici tarafından kesilmesinin mümkün olup olmadığını koruyabilir.

Tablo 4.1 (Devam). BYS'nin akü sistemini koruyamadığı/koruyamadığı kötüye kullanım durumlarına ilişkin basitleştirilmiş bir genel bakış (Larsson F. and Mellander, 2017).

Kötüye Kullanım Türü	BYS Koruması ?	Koruma stratejisi
Dahili hücre kısa devresi	Hayır**	
Şarj	Evet***	Kontaktörleri kullanarak pili ayırın
Aşırı deşarj	Evet***	Kontaktörleri kullanarak pili ayırın
Dış ısıtma, hafif	Evet	
Harici ısıtma, güçlü	Hayır	Termal yönetim sistemi kullanarak soğutma
Dış ateş	Hayır	
<p>*Bu durum, pil takımı içindeki bir veya daha fazla hücrenin harici kısa devresi olan bir durumu ifade eder. Teorik olarak, birçok kısa devre yolu mümkündür ve kısa devre, bir sigorta veya olası kontaktörleri içeren bir akım yolu içinde olursa, kısa devreyi durdurmak mümkündür.</p> <p>** Örneğin partikül kontaminasyonu veya dendrit oluşumu nedeniyle hücre içinde mikrometre ölçeğinde spontan başlama.</p> <p>*** Akünün aşırı/düşük voltajlara maruz kalmamasını sağlamak için algılama ve akım kapanmasına kadarki işlemler yeterince hızlı olmalıdır.</p>		

Hatalar hem sensörlerde hem de BYS içinde olabilir. BYS'nin önemi göz önüne alındığında, performansını doğrulama yöntemlerinin dahil edilmesi özellikle tavsiye edilir. Her türden (voltaj, akım, sıcaklık) yedekli sensörler, sensör ve BYS arızalarının tespit edilmesini sağlayacak ve BYS'nin potansiyel sorunları tespit etme ve bunlara yanıt verme kapasitesini iyileştirecektir. Ancak pil sisteminin maliyeti, boyutu ve ağırlığı da artacaktır (Larsson F. and Mellander, 2017).

5.1.3. Yangın Algılama

Yüksek kapasiteye yönelik artan taleple birlikte, LIB modülleri enerji yoğunluğu bakımından giderek daha büyük ve daha yüksek hale gelmiştir. Modül aracılığıyla yangının yayılması, potansiyel olarak önemi katastrofik hasara neden olabilir. Bu tür bir yangını tespit etmek ve hasarı en aza indirmek için aktif yangın söndürme sistemine

ihtiyaç duyulmaktadır (Wang ve diğ., 2017). Sıradan bir ısı dedektörü, duman dedektörü ve duman-ısı dedektörünün $Li_4Ti_5O_{12}$ pilin tutuşmasını algılayabildiği ve duman-ısı dedektörünün etkinleştirilen hızının en hızlı olduğu gösterilmiştir. Isı dedektörü en yavaş olanıdır. Bu bulgular, ısı dedektörünün LIB yangın algılaması için uygun olmadığını ve duman dedektörünün tavsiye edildiğini göstermektedir.

Sabit yangın algılama ve söndürme sistemleri burada sabit kurulumlu araç üstü sistemler olarak kabul edilir. Bu tür sistemler, ağır araçlardaki motor bölmelerini korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; İsveç'teki tüm toplu taşıma otobüslerinin %94'ünde sabit yangın söndürme sistemleri kurulmuştur (Statistik, 2017). Ancak bunlar binek araçlarında yaygın değildir. LIB'ler için yangından korunma açısından bu sistemlerin sahip olduğu olanaklara aşağıda değinilmektedir. Tartışmalar, yalnızca sınırlı miktarda söndürme maddesinin çok önemli olduğu araç üstü sistemlerle sınırlı değildir. Ayrıca yangın algılama ve LIB'lerin bastırılmasıyla ilgili daha genel bir yaklaşımı içerir.

Bir LIB yangını kaynağında, yani modülün içindeki hücrelerde soğutulmalıdır. Bununla birlikte, modüller ve pil takımı kompakt bir şekilde yüksek sızdırmazlık seviyesiyle (örn. IP67) tasarlandığından yangın yerine erişim zor olabilir. Pil paketleri, erişilmesi zor yerlere de yerleştirilebilir. Bireysel hücreler üzerinde pek çok test yapılmıştır. Ancak en ciddi zorluk, pil paketlerinin içindeki yangınları söndürmede yatmaktadır. Hücrelerin, modüllerin ve pil paketlerinin araştırma ve yangın testleri, aşağıdaki alıntılarda ve alt bölümlerde açıkça görülen bir LIB'deki yangını söndürmenin en iyi yolu hakkında birçok farklı fikirle sonuçlanmıştır.

"Bir HV aküsü alev alırsa, büyük, sürekli bir su hacmi gerektirir" (National, 2014).

"Kuru kimyasal, CO₂ ve köpük genellikle pillerin karıştığı bir yangını söndürmek için tercih edilen yöntemlerdir ve su genellikle tercih edilen ilk söndürücü madde değildir" (Grant, 2010).

"Li-ion pil takımları kullanan araçlar için yangınla mücadele teknikleri, C Sınıfı söndürme maddesi kullanılarak herhangi bir elektrik yangını gibi ele alınmalıdır" (Delphi, 2012).

Söndürme maddesinin türü veya en uygun sistem hakkında belirsizlik hakimdir. Bu karışıklığın bir kısmı, lityum iyon ve lityum metal piller arasındaki yalnızca isim benzerliğinden kaynaklanmaktadır. Bugün, ilki şarj edilebilirken, bazen lityum piller olarak adlandırılan ikincisi şarj edilemez. Suyu maruz kaldıklarında bu piller ekzotermik olarak reaksiyona girebilir. Bununla birlikte, LIB'lerdeki yangınları söndürmek için su kullanılabilir (Andersson, 2017).

Sade su, çevre dostu olan yaygın bir yangın söndürme maddesidir ve Larsson ve Mellander, mükemmel soğutma kabiliyeti sunduğundan LIB yangınları için uygun olabileceğini belirtmektedir. Potansiyel olumsuz etkiler olsa bile, pil takımı için bir su taşma sisteminin uygulanabilir bir çözüm olabileceğini öne sürüyorlar. Örneğin; kısa devreler ve zehirli atık su. (Larsson ve Mellander, 2017).

Bu noktada kısa devreler o kadar yüksek bir öncelik olmadığından, suyun yalnızca termal kaçak meydana geldiğinde uygulanması gerektiğini önermektedir. Ayrıca modüllerin, bir hücredeki termal kaçakların komşu hücrelerde termal kaçaklara neden olmayacağı, bu durumda pil takımının içine su uygulanmasına daha az ihtiyaç duyulacak şekilde tasarlanmasını gerekmektedir (Andersson, 2017).

İdeal akülü yangın söndürücü hem termal olarak yüksek iletkenliğe sahip hem de yüksek düzeyde elektrik yalıtıcı olacaktır. Su birincidir ama ikincisi değildir. Deiyonize su, kül ve kurum dahil olmak üzere ateşten kirleticileri çözüne kadar her ikisidir (Wingfors ve Fredman, 2018).

5.2. Müdahale Yöntemleri

Literatürde fazla tartışılmayan konular, çarpma sonrası çekme, atölye, hurdalık ve geri dönüşüm faaliyetleri ile ilgilidir. Bu alanlarda çalışan personel, itfaiye personelinin sahip olduğu eğitim veya donanımına sahip değildir. Bu, onları ve tesislerini, hasarlı bir EA yeniden alevlendiğinde daha savunmasız hale getirir. Sonraki bölümler de devam eden elektrifikasyonun ışığında bu endüstrilerin karşılaşılabileceği zorlukları daha derinlemesine inlenmiştir.

İsveç kurtarma hizmetlerinin elektrikli araçlar için hazırlığını araştıran yakın tarihli bir rapor, beş ana sorun alanı belirledi. Bunlar:

- Bir aracın EA olup olmadığını belirleme zorluğu
- Tüm araba modellerinde enerjinin nasıl kesileceği ve bir EA'nın güvenli bir şekilde nasıl açılacağı bilgisi
- Pillerden sızabilecek sıvı türleri ve bunlarla nasıl başa çıkılacağı
- Elektrikli araçlardaki yangınların nasıl söndürüleceği ve bu yangınlarda hangi gazların oluşabileceği
- Bir EA'nın tuzlu suyla temas etmesi halinde elektrikle ilgili riskler ve bu riskin bir kurtarma operasyonundan sonra da devam edip etmeyeceği (Stave ve Carlson, 2017).

En son NFPA Elektrikli araç acil durum alan kılavuzu farklı markaların ana akım hibrit ve elektrikli araçlarını içeren araç yangın kazaları olaylarını ele almak için daha ayrıntılı bir talimat yayınlamıştır (NFPA, 2014). Talimat iki bölüme ayrılmıştır. İlk kısım olan prosedürler, aracı tanımlama, hareketsiz hale getirme ve devre dışı bırakma yöntemlerini içerir. İkinci kısım, yangın söndürme stratejisidir. İtfaiye personeli, hibrit ve elektrikli araç yangınlarını, NFPA tarafından önerilen prosedürlere uygun olarak söndürmelidir.

Farklı ülkelerdeki farklı uygulama kuralları özetlenerek, önerilen EA yangınla mücadele süreci şu şekilde açıklanmaktadır:

- (1) Araç tespiti: Bazı Avrupa ülkelerinde, yangın kurtarma merkezleri bir aracın plakalarına göre bilgi talep edebilir. Bu, itfaiyecilerin kesin olarak doğru kurtarma veri sayfasını belirlemesine yardımcı olabilir.
- (2) Duruma göre yangınla mücadele planını belirleyin
- (3) Önce insanları koruyun
- (4) Yangını kontrol edin veya söndürün. Araç şarj oluyorsa mümkünse şarj bağlantısını kapatın.
- (5) Yangın söndürüldükten sonra araç hemen hareket ettirilmemelidir.
- (6) Son adım, yerinde temizliktir. Yangın kazasından sonra, belirli imha prosedürleri de önerilir. Yani, akünün yeniden tutuşabilme özelliği nedeniyle, kazadan sonra EA açık bir yere park edilmelidir.

Her yıl toplam EA sayısı arttıkça, birçok halka açık otopark, EA sürücülerini çekmek ve sürdürülebilirlik taahhütlerini göstermek için EA şarj istasyonları sağlamaya

başlamıştır. Bununla ilgili bazı endişeler bulunmaktadır. Birkaç şehir otopark yapılarında şarjı yasaklıyor. Otopark yapıları, barındırabilecekleri araç sayısı ve yoğunluğu dikkate alındığında büyük bir yangın riskine sahiptir. Alçak tavanları, ısıyı yakıt yüküne doğru yayarak yangının yayılmasına katkıda bulunurken, sınırlı havalandırma zehirli gaz birikimine katkıda bulunur. Otopark yapıları aynı anda yanan birkaç aracı kaldırabilecek şekilde tasarlanmıştır. Yangının 3-4 araçtan fazla yayılmasına izin verilmediği sürece yapısal bir çökme olmayacaktır (Joyeux ve diğ., 2001). Yangının yayılmasını önlemeye yardımcı olabileceğinden, yangın söndürme sistemleri ile yangın tehlikesi daha da azaltılabilir. Geleneksel sprinkler gibi yangın söndürme sistemleri yangın riskini azaltabilir. Elektrikli araçlar da dahil olmak üzere yanan araçların binaların içine park edildiğinde oluşturabileceği kimyasal tehlike dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.

NFPA 70 (Ulusal Yangından Korunma Kurumu), elektrikli araç şarj istasyonlarındaki büyümeyi ele almak için standartlar geliştirmiştir (NFPA, 2020). UL 2594, ana standartlardan biridir ve güvenlik ve hava koşullarının yanı sıra mevcut farklı gerilimleri kapsar. SAE J2293 ve J1772, EA'larla birlikte çalışabilirliği sağlamak için temel tasarım gereksinimleri sağlar (URL-9). Bununla birlikte, büyük oranda EA'ların bulunduğu ve birçok şarj işleminin kolaylaştırıldığı otoparklar için yangın hidrantı ve sprinkler sisteminin etkinliğini veya güvenilirliğini kanıtlayacak veri eksikliği halen mevcuttur.

5.2.1. Söndürme Sistemleri

LIB yangınlarının söndürülmesinin zor olduğunu, büyük miktarlarda söndürücü gerektirdiğini ve yeniden alevlenebileceğini belirlenmiştir (Kong ve diğ., 2018). Yeniden alevlenen yangınlarla baş etmek zordur. Çünkü bunlar birincil termal olayın üzerinden önemli bir süre geçtikten sonra bile meydana gelebilir. Yeniden ateşleme olmamasını sağlamanın bir yolu, aracın veya LIB paketinin tamamen yanmasına izin vermektir. LIB paketindeki tüm aktif malzeme tüketildiğinde, yeniden tutuşma riski çok daha düşük olur. Ancak pratikte bu her zaman mümkün olmayabilir. Aynı zamanda uygun yaklaşım olmayabilir veya söndürmeye ihtiyaç duyulur.

Tipik bir yangını söndürmek için dört temel yaklaşım vardır. Bunlar; izolasyon yöntemi, boğma yöntemi, soğutma yöntemi ve kimyasal söndürme yöntemi. LIB yangını tipik bir yangın değildir. Çünkü en azından bir kısmı pil bileşenleri arasındaki doğrudan reaksiyonlardan oluşur. Bu reaksiyonlar harici oksijen gerektirmez. Su, çok çeşitli yangın söndürme sistemlerinde en ucuz ve en yaygın kullanılan söndürme maddesidir (Long ve diğ., 2013). Ancak elektrikli araç yangını tamamen bastırmak için en az 6 dakika sürekli su uygulaması gerekmiştir ve yangın söndürme süreci FM küresel depo yangın deneylerinde 20 dakika sürmüştür (Ditch, 2013). Aynı zamanda, elektrolitteki tuz, $LiPF_6$, toksik ve insanlar için zararlı olan büyük miktarda HF açığa çıkarmak için su ile reaksiyona girebilir (Larsson ve diğ., 2017). Ayrıca, lityum suyu oldukça yanıcı hidrojen oluşturacak şekilde azaltabilir (Wang ve diğ., 2018). Son olarak, su iletkenir ve akü sisteminde harici kısa devreler oluşturabilir ve bu da LIB termal kaçaklarına neden olabilir. Öte yandan su, yüksek buharlaşma ısısı ve ısı kapasitesi nedeniyle mükemmel bir soğutma maddesidir. Yalnızca alevli yanmayı bastırmaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda termal kaçakların yayılmasını yavaşlatabilir veya durdurabilir.

CO_2 , LIB yangınları için etkili bir söndürme maddesi değildir. Pili soğutamadığı için CO_2 'nin bastırma verimliliği düşüktür. Halonların bir LIB yangını kısmen bastırabildiği gösterilmiştir. Ancak Halonların uygulanması durdukça, hücrenin sıcaklığı artmaya devam edecektir. Ayrıca bir yangın testinde halonların lityum iyon polimer pilin yeniden ateşlenmesini engellemediği de görülmüştür (Summer ABD, 2010).

NFPA 10-2018, yangınları beş farklı sınıfa ayırır (NFPA, 2018). Bir EA doğrudan bu kategorilerin hiçbirine girmez.

- A. Elektrikli araçta katı yanıcı malzemeler (örneğin; koltuk köpüğü ve plastik iç dekorasyon)
- B. Hibrit EA'larda depolanan termal kaçak, soğutucu, fren hidroliği, ön cam yıkama sıvısı, şanzıman sıvısı ve sıvı yakıtlardan sonra aküden çıkan yanıcı gazlar
- C. Elektrikli cihazlar ve BYS
- D. Şarjlı Li-ion pillerden salınan Li metal parçacıkları

Bu nedenle, pil yangınına bastırmak için yalnızca karbondioksit veya diğer kimyasallar kullanılırsa, yangın kontrol altına alınabilmesine rağmen, pil takımını soğutamaz veya yeniden tutuşması engellenemez. Öte yandan, su spreyi uygulanırsa, hem yangını bastırabilir hem de EA'yı soğutabilir. Ancak zamanla elektrik arızasını tetikleyebilir ve hidrojen gazı açığa çıkarmak için Li ile reaksiyona girebilir (Schiemann ve diğ., 2016).

LIB yangınlarının söndürme mekanizması hakkında nispeten az şey bilinmektedir ve literatürdeki yangın söndürme testlerinin çoğu küçük ölçekli portatif LIB yangınlarına odaklanmıştır. Bu nedenle, söndürme testlerinin etkinliği ve mevcut yangının güvenilirliği EA yangınları için sıklıkla sorgulanır. Karbondioksit veya kuru kimyasallar, yanan bir LIB'nin alevlerini söndürebilir. Ancak alevlerin söndürülmesi, yanıcı gaz oluşumu ve gaz patlamasına neden olan gecikmeli bir ateşleme olasılığına karşı dengelenmelidir (Andersson ve diğ., 2017). LIB'nin soğutulması veya hücreleri arasındaki ısı transferinin engellenmesi, çoğunlukla olumlu görünmektedir. Çok yaygın bir yangın söndürme maddesi olan su, mükemmel soğutma kapasitesi sunarak, kısa devreler veya zehirli su akışı gibi potansiyel olumsuz etkilere rağmen LIB yangınları üzerinde kontrol kazanmak için iyi bir yol olmasını sağlayabilir.

Colella iki farklı EA LIB paketi üzerinde büyük ölçekli yangın testleri Şekil 5.1'deki gibi gerçekleştirdi. Değerlendirilen akü paketlerinin parametreleri Tablo 5.1'de listelenmiştir. Yangın testleri, hem LIB paketlerini hem kendi başlarına hem de aracın içine monte edilmiş haldeyken dikkate almıştır. Paket veya araç, 400 kW'lık bir propan brülörü tarafından ateşlendi. Her iki akü paketi için de patlama sesi duyuldu. Ark ve yeniden tutuşma gözlemlendi. LIB paketinin yandığı netleştiginde, onu bastırmak için bir girişimde bulunuldu (Colella, 2016).

Tablo 5.1. Bir araç modelinde iki Li-ion EA pil takımı için yangın söndürme testi (Blum ve diğ., 2015; Colella, 2016)

Pil Paketi	Tip ve konfigürasyon	Ağırlık (kg)	Enerji (kWh)	Bastırma Süresi (dk.)	Su Miktarı (m ³)
A	288 3,6 V hücreden toplandı	151.1	-	2.2/3.5/9.8	1.25/2.01.4.80
B	T-şekli ile çoklu bağlantılı modüller	198.1	16	14.0/21.4/9.3	7.97/12.00./5.3

Batarya A için, test sonlandırıldıktan 22 saat sonra yeniden ateşleme meydana geldi. Bastırma etkileri, dakikada 125 galon su akışının ve dört itfaiyecinin (ikisi hortum hattında ve ikisi destekte) kullanılmasını içeriyordu. Tablo 5.1’de ayrıca söndürme süresini ve yangın söndürme suyunun miktarını da listelenmiştir. Karşılaştırma, batarya modüllerinin iç bileşenlerinin yangın tehlikesine ve Batarya A’yı bastırmadaki zorluklara güçlü bir şekilde katkıda bulunduğunu, Batarya B için ise bunun tersi bir eğilim bulunduğunu gösterdi. Bu sonuçlar, LIB paketinin EA yangınında, diğer yanıcı malzemelerde (ağırlıklı olarak plastikler) bir rol oynamasına rağmen gösterdi. Ayrıca yukarıda da belirtildiği gibi geleneksel araçlara benzer şekilde önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 5.1. Bir araç modeli içindeki EA pil takımlarının tam ölçekli yangın söndürme testi: (a) A Tipi pil takımı; (b) İç bileşenleri olan B Tipi pil takımı; (c) Batarya A'nın yangın davranışları; ve (d) yangın söndürme çabaları (Blum ve diğ., 2015; Colella, 2016)

5.2.1.1. Yoğunlaştırılmış Aerosol Yangın Söndürme Sistemleri

DNV GL (Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd) tarafından 2017 yılında yayınlanan "ESS Yangın Güvenliği için Hususlar" raporunda, RISE (Research Institutes of Sweden) tarafından 2019 yılında yayınlanan "Karayolu Araçlarında Lityum-İyon Pillerin Yangın Güvenliği" raporunda ve FIA (Fire Industry Association) tarafından 2020 yılında yayınlanan "Li-ion Pil Yangınları Rehberi" raporunda belirtildiği üzere, yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürme sistemleri, elektrikli araçların LIB'lerinde

söndürme sistemi olarak kullanıma uygundur ve LIB yangınlarını başarılı bir şekilde söndürebilir. Şekil 5.2’de uygulama örneği gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Elektrikli araç üzerinde kurulu durumdaki yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürücüler

Yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürme sistemlerinde, gazlı yangın söndürme sistemlerine benzer kontrol ve izleme ekipmanları kullanılır ve deşarj oldukları ortamı sis formunda bir yangın söndürme maddesiyle doldururlar. Gazlı yangın söndürme sistemlerinden farklı olarak, yoğunlaştırılmış aerosol sistemleri, basınçlı olmayan bir metal gövde içerisinde (veya jeneratörde) depolanan katı tablet formunda söndürücü kimyasal içerirler. Yoğunlaştırılmış aerosol jeneratörü boyutları çok küçükten (birkaç gram) büyüğe (birkaç kilogram) kadar değişir. Her aerosol jeneratörü kendi bünyesinde söndürücü madde içeriğini depolar ve uygun boyutta boşaltma çıkışlarına sahiptir. Aerosol jeneratörleri doğrudan yangından korunması istenen hacmin içerisine monte edilir. Aerosol söndürme sistemi borulara veya nozullara ihtiyaç duymaz. Aerosol, gaz faz içerisinde çözünmeden süspansiyon edilmiş mikro veya nano boyutlu katı partiküllerden oluşur. Yangını meydana getiren ve besleyen kimyasal reaksiyonu engelleyerek (Yangın Tetrahedronu’nun dördüncü tarafı kaldırılarak) yangını söndürür. Aerosol jeneratörleri 15 yıla kadar bakım gerektirmeyen hizmet ömrüne sahiptir. Yoğunlaştırılmış aerosol jeneratörlerinin sayısı ve konumu, üreticisi tarafından verilen kılavuza ve ISO 15779 (veya TS ISO 15779) standardının tavsiyelerine uygun olmalıdır. Örnek yerleşim Şekil 5.3’deki gibidir.



Şekil 5.3. Batarya paketi içerisine monte edilmiş aerosol yangın söndürücü

Yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürme sistemlerinin tasarım uygulama yoğunluğu, A Sınıfı yangınlar için yaklaşık 100 gr/m^3 'dür (güvenlik faktörü dahil). DNV GL detaylı yangın söndürme testlerinde aerosol söndürücülerin batarya hücresindeki yangını söndürdüğü gözlemlenmiştir. Aerosol başlangıçta bir miktar soğutma sağlar. Ancak pilin içerisindeki ekzotermik reaksiyonlar sona erene kadar kadar hücre sıcaklığını yeterince aşağıya düşüremeyebilir. Aerosolün soğutma kabiliyetinin sudan daha az olduğu testlerle gösterilmiştir. Bu nedenle aerosol yangın söndürme sisteminin daha fazla soğutma etkisine sahip olması, yeniden tutuşma ve termal kaçışı etkin bir şekilde önleyebilmesi için LIB yangınlarında tasarım uygulama yoğunluğu 200 gr/m^3 veya daha yukarıya çıkarılabilir. Yine ayrıntılı DNV GL test çalışmalarına göre, su kullanımı mükemmel soğutma etkisi gösterirken, aynı zamanda hasarsız hücreleri veya komşu modülleri potansiyel olarak devre dışı bırakır. Büyük miktarda su kullanımı, batarya paketinin tamamen kaybedilmesine yol açma olasılığı yüksek olan bir söndürme taktiğidir. Aerosol yangın söndürme testinde, ilk etapta yangının etkili ve hızlı olarak söndürüldüğü görüldüğünden, aerosoller potansiyel olarak yangın için bir ilk müdahale seçeneği olarak kullanılabilir. Ardından su bazlı söndürücülerin soğutucu etkisi ilave olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple DNV GL aşağıdaki söndürme stratejisini tavsiye etmektedir:

Aşama 1: Eğer bir batarya sistemi hücre kademelerini sınırlayabiliyorsa, tek hücreli bir yangını söndürmek, kapalı bir ortamda parlamayı ve alevlenmeyi önlemek için yangınla mücadelenin ilk aşaması için aerosol/gaz-bazlı bir söndürme sistemi tercih edilmelidir.

Aşama 2: Sıcaklık yükselmeye devam ederse veya artan düzeyde duman ve gaz tespit edilirse, sistemi soğutmak ve yangının daha fazla yayılmasını önlemek için cebri havalandırma ve su ile söndürme düşünülmelidir.

Aşama 1, ikincil hasardan ve tüm batarya paketinin kaybindan kaçınmak için bir fırsat sağlar. Aşama 2, birden fazla pil hücresinin dahil olduğu bir yangın durumu için yeniden tutuşmaya karşı emniyet sağlar. Her iki aşamada, yangına müdahale ekiplerini yüksek risk konusunda bilgilendiren, batarya sistemi dışında bir tür alarm veya uyarı altyapısı oluşturulabilir.

LIB yangınlarının söndürülmesi konusundaki tüm bu çalışmaları incelediğimizde, soğutma etkisini artırmak ve LIB yangınlarında yeniden alevlenmeyi önlemek için yüksek tasarım konsantrasyonlarında K-tipi aerosol yangın söndürme sistemlerini kullanabileceğimiz sonucuna varıyoruz. Bununla birlikte, daha etkili bir alternatif olarak, hem K-tipi aerosol yangın söndürücülerin üstün B Sınıfı yangın söndürme performansını, hem de su-bazlı aerosollerin çok daha fazla su buharı ve inert gazlar üreterek, A Sınıfı yangınlar üzerindeki gelişmiş soğutma etkisini birleştirmek mümkündür. Böylelikle bu yeni hibrit (K-tipi ve su-bazlı aerosol kombinasyonu) aerosol yangın söndürme sistemi kullanılarak, geleneksel K-tipi aerosol söndürücülerin etkin yangın söndürme özelliği “Aşama 1” de bataryadan sızan yanıcı elektrolitin neden olduğu B sınıfı yangını hızlı ve etkili bir şekilde söndürülebilir. Hemen ardından veya eş zamanlı olarak, söndürme sisteminde yer alan su-bazlı aerosol söndürücülerin aktive edilmesiyle, Aşama 2’deki soğutma ve yeniden tutuşmayı önleme etkisi, katı su-bazlı aerosol kimyasalının ürettiği büyük miktardaki su buharı ile başarılı bir şekilde yerine getirilebilir. Böylelikle K-tipi aerosol söndürücülerin etkin söndürme performansına ilave olarak, aerosol jeneratörünün gövdesi içerisindeki katı kimyasal tablet blokları ile büyük miktarda su buharı ve inert gazlar üretilerek, borulara ve nozullara ihtiyaç duymadan, su-bazlı bir söndürücünün soğutma etkisini oluşturmak mümkün hale gelir.

Sonuç olarak; geleneksel K-tipi aerosol yangın söndürücülerin suya göre nispeten zayıf olan soğutma performansı büyük ölçüde iyileştirilmiş olur. Böylelikle yoğunlaştırılmış aerosol yangın söndürme sistemleri, LIB yangınlarında çok daha etkin ve nispeten düşük tasarım konsantrasyonlarında dahi yüksek performanslı bir yangın söndürme sistemi olarak kullanılabilir (Korkmaz, 2021).

5.2.2. Elektrikli Araçların Belirlenmesi

Müdahale ekipleri için en büyük zorluklardan birisi de, uğraştıkları araç tipini belirlemektir. Benzer dış özellikleri nedeniyle EA'ları ICE araçlarından ayırt etmenin zor olabileceğini tahmin edilmektedir. İlgili tehlikelerin uygun bir değerlendirmesini yapmak için ne tür bir araçla uğraşıldığını anlamak çok önemlidir.

BEV'ler, egzoz sistemine ve dolayısıyla egzoz borusuna sahip olmadığı için geleneksel araçlardan ayırt edilmesi en kolay olanıdır. Ancak, bir çarpışma durumunda bunu belirlemek yine de zor olabilir. Yüksek voltaj bileşenleri turuncu renklerinden ve uyarı etiketlerinin varlığından ayırt edilebilir.

Bazı EA'lar, arkalarında veya yanlarında bulunan logolar veya çıkartmalarla tanınabilir. Araç üzerinde çıkartmalar veya logolar aramanın yanı sıra Moore, söz konusu aracın bir plug-in EV (PHEV & BEV) olup olmadığını belirlemek için aracın yanında, önünde veya arkasında küçük kapılar aramayı önermektedir (Moore, 2019). Moore'un bahsettiği küçük kapılar, yakıt doldurma ağzını veya şarj portunu gizleyebilir. İki kapı, aracın PHEV olduğunu gösterir. Biri şarj, diğeri yakıt ikmali içindir. Sadece bir kapı varsa bunun yakıt ikmali mi yoksa şarj için mi olduğu sonucuna varmak için açılması gerekecektir.

5.2.3. Elektrik Risklerini Azaltma

EA'ların önemli bir elektrik tehdidi oluşturması olası değildir. Bununla birlikte, özellikle bir kaza durumunda, herhangi bir şarj noktasının bir EA'dan fiziksel olarak bağlantısını kesmeniz önerilir. Trafik kazasında bir diğere önemli husus da aracın hareket etmeyecek şekilde emniyete alınmasıdır. Bu adım, tekerleklerini fiziksel olarak bloke ederek, park frenini çekerek veya EA'yı parka alarak aracın hareket etme veya kayma riskini ortadan kaldırmak için gereklidir. Burada, motor gürültüsünün olmaması

nedeniyle EA'ların kapatılmamış olsalar bile kapalı gibi görünebileceğini akılda tutmak önemlidir.

Araç kapatılırsa veya BYS, LIB'nin bir düzeyde etkilendiğini, kötüye kullanıldığını algılayarak, EA akü sistemini güç aktarma sisteminden otomatik olarak ayıracaktır. Özel durumlarda bu bağlantı kesme işleminin manuel olarak yapılması gerekebilir. Araç kapalıysa ve 12/24 volt aküye erişim varsa, akü kablolarının sökülmesi veya sigortaların çıkarılması, aracın çalışmasını engeller. Ancak zaten açıksa, mutlaka kapatması gerekmez (Long ve diğ., 2013). 12/24 voltluk akü veya sigortalara erişilemiyorsa, yüksek voltaj sisteminin bağlantısı kesilebilir. Bununla birlikte, ana voltaj kesmenin birçok farklı olası konfigürasyonu ve konumu nedeniyle bu basit bir prosedür değildir. Yüksek voltajlı pil takımının güvenli bir şekilde bağlantısının nasıl kesileceğine ilişkin bazı genel yönergeler Tablo 5.2'de özetlenmiştir. Kılavuz ayrıca örneğin NFPA'nın Hibrit ve elektrikli araç acil durum alan kılavuzu (National, 2014) veya acil müdahale kılavuzları (National, 2019).

Tablo 5.2. LIB'nin güvenli bir şekilde bağlantısını kesmek için alınacak önlemlere ilişkin genel yönergeler

SAE Uluslararası (SAE, 2012)	ARN (Araba Geri Dönüşüm Hollanda) (URL-6)
1. Araç, algılanan darbe seviyesine göre otomatik olarak kendini kapatacaktır.	1. Yüksek voltajlı sistemlerde gerçekleştirilen çalışma hakkında bilgi vermek için EV'yi işaretleyin.
2. Kontak anahtarını veya güç düğmesini kapalı konuma getirin (kritik akü devrelerinin hasar görmediğini varsayarak).	2. EV'yi park moduna alın, kontak anahtarını çıkarın veya güç düğmesini kullanarak devre dışı bırakın. Anahtarı EV'den en az 10 m uzakta saklayın.
3. 12 volt akü kablolarını ve DC/DC dönüştürücününün 12 volt kablosunu kesin veya bağlantısını kesin	3. 12V pili topraktan ayırın.
4. Manüel bağlantı kesmeyi (yüksek voltajlı ana bağlantı kesme) çıkarın. Bu işlem, aracın yüksek voltajlı ana bağlantı kesme yapılandırması hakkında bilgi gerektirir.	4. Elektrik yalıtımlı eldivenler kullanarak yüksek voltajlı pilin servis bağlantı kesme fişini çıkarın. Fişi her zaman yanınızda bulundurun.
	5. Kapasitörlerin boşalması için en az 10 dakika bekleyin.
	6. Uygun bir ölçü aletiyle voltajın 0 V'a düşüp düşmediğini ölçün.

Elektrik tehlikelerine karşı ek koruma, koruma ekipmanı kullanılarak sağlanabilir. EDUCAM'a göre bu, eldiven veya yüz koruması, toplu koruma veya alet ve ekipman gibi kişisel koruma şeklinde olabilir. Bunların örnekleri Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

LIB'nin bağlantısını başarıyla kestikten ve yüksek voltaj sisteminin enerjisini kestikten sonra, yerleşik güvenlik sistemleri, canlı parçalara temas etme riskini veya elektrik arkı olasılığını azalttığından, yüksek voltaj sistemindeki güvenli çalışma koşulları normalde garanti edilir. Bu sistemlerin modern EA'larda bulunmaması pek olası değildir. Herhangi bir nedenle bu tür güvenlik sistemleri mevcut değilse, EDUCAM 'a göre alınabilecek bazı önlemler vardır:

- Yüksek voltaj sistemini toprağa bağlayın, kapasitörleri boşaltın ve yüksek voltaj sistemini kısa devre yapın.
- Yüksek voltaj sisteminin ve akım taşıyanların yakınındaki bileşenleri yalıtın.

Tablo 5.3. EDUCAM'a göre EA'lar üzerinde çalışırken gerekli olan kişisel ve toplu koruma ile güvenlik ekipmanı (EDUCAM).

Kişisel Koruma	Elektrik yalıtımlı eldivenler Mekanik tehlikelere karşı koruma sağlayan eldivenler Kimyasallara dayanıklı eldivenler Emniyet ayakkabıları Elektrik yalıtımlı ayakkabılar Elektrik yalıtımlı giysiler Göz ve yüz koruması
Toplu Koruma	Kilitler, işaretler ve uyarılar Bariyerler, uyarı bandı, bayraklar
Teçhizat	İki kutuplu voltaj dedektörleri Elektrik yalıtım araçları Elektrik yalıtım battaniyeleri Elektrik güvenlik paspası

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Pilin olası yeniden tutuşması ve içindeki pil paketini soğutmanın zorluğu nedeniyle EA yangınına bastırmak daha zordur. EA yangınına bastırmak için su hala en etkili olarak kabul edilir. Pili söndürmek ve soğutmak için önemli miktarda su gerekir. Ancak, doğrudan pil takımına uygulanırsa daha az önleyici kullanılabilir. Su, güçlü soğutma etkisi ve elektrik devrelerinin bütünlüğü üzerindeki potansiyel etkisine rağmen, LIB yangın söndürme için iyi bir aday olmaya devam etmektedir. Halonlar, heptafloropropan ve C6F-keton, LIB yangınına etkili bir şekilde söndürmek için kullanılabilir. Ancak yeniden alevlenmeyi veya termal kaçakların yayılmasını azaltmaya yardımcı olan soğutma etkisinden yoksundur. Wang'ın grubu , testlerinde su en iyi soğutma verimini gösterdiğini ve bunu C6F-ketone, heptafloropropan ve CO₂'nin izlediği tespit edilmiştir. Ayrıca, atılan EA'ların ve atık pil paketlerinin yangın riskine ilişkin çok az bilgi bulunmaktadır.

Yüksek ısı kapasitesine sahip maddeler (su ve köpük gibi) hızlı soğutma ve yangının söndürülmesini sağlayabilir. Öte yandan, daha düşük ısı kapasitesine sahip maddeler (toz ve iç gazlar gibi) daha az soğutma sağlayacaktır. Bu nedenle baskılama sınırlıdır (Andersson ve diğ., 2018). Şu anda, geleneksel yangın söndürme maddeleri, LIB içindeki termal kaçak reaksiyonları durduramamaktadır. Ancak maddelerin uygulanması, açık alevi söndürebilir ve LIB'nin yüzey sıcaklığını azaltabilir. Böylece, LIB'ye ısı transferini azaltabilir. Yangın söndürme maddesinin uygulanması, insanların kaçması ve tahliyesi için yeterli zaman kazanmaya yardımcı olabilir (Liu ve diğ., 2018).

Gelecekte, daha fazla sayıda EA ve şarj istasyonu içeren binalar ve park yerleri için daha iyi bir tasarıma sahip yangından korunma sistemleri gerekli olacaktır.

LIB yangın söndürücüler üzerindeki çalışmalar tamamlanmış olmaktan çok uzaktır. LIB yangını için çevre dostu ve daha etkili söndürme yöntemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu tür yangınlar için özel olarak tasarlanmış daha hızlı ve daha doğru algılama da gerekli olacaktır. Geleceğin otomatik yangın söndürme sistemleri, büyük boyutlu bir pil paketi yangınına söndürebilmeli ve paketi hızlı bir şekilde soğutabilmelidir; tercihen pil paketinde minimum hasarla. Otomatik ve ikincil yangın söndürme sistemlerinin EA'lar tasarlanması gerekir.

Bu çalışma, piller, elektrikli araçlar ve/veya yangın güvenliği mühendisliği ile çalışan araştırmacılara ve sektörlere aktif araştırma işbirliklerini teşvik etmek ve gelecekteki elektrikli araçların genel güvenliğini iyileştirme konusunda araştırma ve geliştirmelere yardımcı olmayı amaçlamaktadır.



KAYNAKLAR

- Al-Hallaj S, Selman JR. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications, *J Power Sources*, 2002(110), 341–8.
- Andersson P., Arvidson M., Evegren F., Jandali M., Larsson F., Rosengren M. (2018). Lion Fire: extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea, *RISE Research Institutes of Sweden*, 2018(77).
- Andersson P., Wikman J., Arvidson M., Larsson F., Willstrand O. (2017). Safe introduction of battery propulsion at sea, *RISE Research Institutes of Sweden*, 2017.
- Andrea D. A list of Li-Ion cells available today. Li-Ion BMS 2018, <http://liionbms.com/php/cells.php>, (Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2021).
- Balakrishnan P., Ramesh R., Kumar TP. (2006). Safety mechanisms in lithium-ion batteries, *J Power Sources*, 2006(155), 401–14.
- Balakrishnan PG., Ramesh R., Prem Kumar T. (2005). Safety mechanisms in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2006(155), 401–14, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.12.002.
- Belharouak I., Koenig GM., Amine K. (2011). Electrochemistry and safety of Li₄Ti₅O₁₂ and graphite anodes paired with LiMn₂O₄ for hybrid electric vehicle Li-ion battery applications, *J Power Sources*, 2011(196), 10344–50.
- Bisschop R., Willstrand O., Amon F., Rosengren M. (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles, *Rise Report*, 2019(50).
- Blanco S. (2013). *Tesla Model S catches fire near Seattle*. Autoblog 2013, <https://www.autoblog.com/2013/10/02/tesla-model-s-fire/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022).
- Blum A, Long RT. (2015). Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries. *SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems*, 2015(8), 565–72. DOI:10.4271/2015-01-1383.
- Cherng J-Y., Pin-Shiuan L., Cheng T-T. (2018). Lithium battery with exhaust structure, *Google Patents*.
- Colella F. (2016). Understanding electric vehicle fires. *Fire Protection and Safety in Tunnels, Stavanger*.
- Coman PT., Rayman S., White RE. (2016). A lumped model of venting during thermal runaway in a cylindrical Lithium Cobalt Oxide lithium-ion cell. *J Power Sources*, 2016(307), 56–62.

- Davidson J. (2016). Musk frustrated that Koch brothers spending millions to kill electric cars 2016.
- Deick M Van. (2018). <https://www.facebook.com/Marco.vandeick/posts/344761026325031>, (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2021).
- Delphi Corporation. (2012). Hybrid Electric Vehicles for First Responders. Delphi Corporation, Troy, MI, USA.
- Ditch BD. (2013). *Flammability characterization of Li-ion batteries in bulk storage*. Technical Report FM Global, www.fmglobal.com/researchreports, (Ziyaret Tarihi: 17 Mart 2022).
- DNV GL. (2017). *Considerations for ESS Fire Safety*. OAPUS301WIKO(PP151894).
- Doughty D. and Pesaran A. (2012). Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance. *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*.
- Doughty DH, Roth EP. (2012). A general discussion of Li ion battery safety. *Electrochem Soc Interface*, 2012(21), 37–44.
- Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics 3rd ed Chichester, UK John Wiley & Sons, Ltd, 2011. DOI:10.1002/9781119975465.
- Dudley B., Dale S. (2018). Statistical Review of World Energy 2018, *BP*, 2018, 1–53.
- Educam, Sectorale Norm EDU 100 V3.0: Veilig Werken aan HEV. Hybrid & Electric Vehicles.
- Evarts EC. (2015). Lithium batteries To the limits of lithium. *Nature*, 2015(526), S93–5. DOI:10.1038/526S93a.
- FIA. (2020). Guidance on Li Ion Battery Fires. FIA Guidance Document.
- Finegan D., Scheel M., Robinson JB., Tjaden B., Hunt I., Mason TJ. (2015). In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway. *Nature Communications*, 2015(6), 6924. DOI:10.1038/ncomms7924.
- Gehandler J. P., Karlsson and L. Vylun. (2017). Risks Associated with Alternative Fuels in Road Tunnels and Underground Garages. *SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2017*.
- Grant C. (2010). Fire Fighter Safety and Emergency Response for Electric Drive and Hybrid Drive Vehicles. *National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA*.
- Grauers A., Sarasini S., Karlström M., Industriteknik C. (2013). Why electromobility and what is it?. *Systems Perspectives on Electromobility Chalmers University of Technology, Göteborg*.

- Gutman M, S. Yuon. (2018). *Firefighters work 16 hours to put out fires in Tesla Model S*. ABC News 2018, <https://abcnews.go.com/Technology/tesla-opens-investigation-car-burst-flames-times/story?id=59930420>, (Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2022).
- Hao M., Li J., Park S., Moura S., Dames C. (2018). Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy. *Nature Energy*, 2018(3), 899–906. DOI:10.1038/s41560-018-0243-8.
- Herron D. (2016). *Model S catches fire in Norway at Supercharger, charging system seemingly at fault*. The Long Tail Pipe 2016, <https://longtailpipe.com/2016/01/01/model-s-catches-fire-in-norway-at-supercharger-charging-system-seemingly-at-fault/>, (Ziyaret Tarihi: 02 Ocak 2022).
- Herron D. (2021). *Honda EV Plus*. <https://greentransportation.info/vehicles/prioreras/honda-ev-plus.html>, (Ziyaret tarihi: 02 Ocak 2022).
- Huang P., Ping P., Li K., Chen H., Wang Q., Wen J. (2016). Experimental and modeling analysis of thermal runaway propagation over the large format energy storage battery module with Li₄Ti₅O₁₂ anode. *Appl Energy*, 2016(183), 659–73.
- Huang X, Nakamura Y. (2020). A Review of Fundamental Combustion Phenomena in Wire Fires. *Fire Technology*, 2020(56), 315–360. DOI:10.1007/s10694-019-00918-5.
- IATA. (2016). Lithium batteries as cargo in 2016 update III2016.
- Iguchi M. (2015). Divergence and Convergence of Automobile Fuel Economy Regulations: A Comparative Analysis of EU, Japan and the US. Springer International Publishing.
- J. Jeevarajan. (2014). Safety of commercial lithium-ion cells and batteries, in *Lithium-Ion Batteries Advances and Applications*, Amsterdam, Elsevier, 2014, 387-407.
- Joyeux D., Kruppa J., Cajot L-G., Schleich J-B., van de Leur P., Twilt L. (2001). Demonstration of real fire tests in car parks and high rise buildings.
- Jung YS., Cavanagh AS., Riley LA., Kang SH., Dillon AC., Groner MD.(2010). Ultrathin direct atomic layer deposition on composite electrodes for highly durable and safe Li-ion batteries. *Adv Mater*, 2010(22), 2172–6.
- Justen R, Schöneburg R. (2011). Crash Safety of Hybrid and Battery Electric Vehicles. *22nd Enhanced Safety of Vehicles Conference, Washington*.

- Kim J., Kin K., Cho W., Shin W., Kanno R. and Choi R. (2012). A Truncated Manganese Spinel Cathode for Excellent Power and Lifetime in Lithium-Ion Batteries. *Nano Letters*, vol. 12, 6358-6365.
- Kolly JM., Panagiotou J., Czech BA. (2014). Failure Analysis Techniques for a Lithium-Ion Battery Fire Investigation. *Fire in Vehicles 2014*.
- Kong L., Li C., Jiang J., Pecht MG. (2018). Li-ion battery fire hazards and safety strategies. *Energies*, 2018(11), 1–11. DOI:10.3390/en11092191.
- Korkmaz S. (2021). Yoğunlaştırılmış Aerosol Yangın Söndürme Sistemlerinin Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-İyon Batarya Yangınlarındaki Etkinliği.
- Kumar K. (2015). Flammability of Plastics in Today's Automobiles. *SAE Technical Papers*, 2015(4). DOI:10.4271/2015-01-1380.
- Larminie J. ve Lowry J., (2003). Electric Vehicle Technology Explained. *John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK*.
- Larsson F. and Mellander B.-E. (2017). Lithium-ion Batteries used in Electrified Vehicles General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective, *RISE Research Institutes of Sweden, SP Rapport*, 2017(41).
- Larsson F. (2017). Lithium-ion Battery Safety-Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation. *Chalmers University of Technology*.
- Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander BE. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Sci Rep*, 2017(7), 10018.
- Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G. (2012). Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. *International Conference on Fires In Vehicles - FIVE 2012, Chicago, United States*, 2012. 183–94.
- Lecocq A., Eshetu GG., Grugeon S., Martin N., Laruelle S., Marlair G. (2016). Scenario-based prediction of Li-ion batteries fire-induced toxicity. *Journal of Power Sources*, 2016(316), 197–206. DOI:10.1016/j.jpowsour.2016.02.090.
- Linden D. and T. Reddy. (2010). *Linden's Handbook of Batteries*, McGraw Hill.
- Liu X., Stolarov SI., Denlinger M., Masias A., Snyder K. (2015). Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium ion battery. *Journal of Power Sources* 2015(280). 516–25. DOI:10.1016/j.jpowsour.2015.01.125.

- Liu X., Wu Z., Stoliarov SI., Denlinger M., Masias A., Snyder K. (2016). Heat release during thermally-induced failure of a lithium ion battery: Impact of cathode composition. *Fire Safety Journal*, 2016(85), 10–22. DOI:10.1016/j.firesaf.2016.08.001.
- Liu Y., Duan Q., Li K., Chen H., Wang Q. (2018). Experimental study on fire extinguishing of large-capacity lithium-ion batteries by various fire extinguishing agents. *Energy Storage Sci Technol*, 2018(7), 1105–12.
- Liu Y., Sun P., Niu H, Huang X. (2020). Propensity to self-heating ignition of open-circuit pouch Lithium-ion battery pile on a hot boundary. *Fire Safety Journal* 2020. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103081.
- Long T., Blum A., Bress T. and Cotts B. (2013). Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results. *The Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, USA*.
- Lopez C. F., Jeevarajan J. A. And Mukherjee P. P. (2015). Experimental Analysis of Thermal Runaway and Propagation in Lithium-Ion Battery Modules. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 162, no. 9. A1905-A1915.
- Loveday S. (2018). BMW i3 REX Burns After Catching Fire While Parked In Spain. *INSIDEEVs 2018*.
- Lu L., Han X., Li J., Hua J., Ouyang M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *J Power Sources* 2013(226), 272–88.
- Lu W., Jansen A., DeesD., Nelson P., Veselka N. and Henriksen G. (2010). High-energy electrode investigation for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 196, 1537-1540.
- Matulka R. (2019). The History of the Electric Car. *Department of Energy*, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, (Ziyaret tarihi: 26 Aralık 2021).
- Moganty S., Wu Y., Abbate L., Brown K., Sinicropi J., Torres G. (2019). Modified ionic liquids containing triazine. *Google Patents*.
- Moon G. (2016). *Renault-Samsung's Electric Vehicle Catches Fire Due to Ignition from Bonnet*. ETRC·KGTLAB 2016, <http://www.ipnomics.net/?p=14858>, (Ziyaret Tarihi: 22 Eylül 2021).
- Moore R. (2016). *University of Extrication Plug-In Vehicle Identification*. Firehouse, <https://tinyurl.com/y8gw26yw>, (Ziyaret Tarihi: 28 Eylül 2021).

- National Fire Protection Association. *Emergency Response Guides*, <https://www.nfpa.org/Training-and-Events/By-topic/Alternative-Fuel-Vehicle-Safety-Training/Emergency-Response-Guides>, (Ziyaret Tarihi: 31 Ocak 2022).
- National Fire Protection Association. (2014). Hybrid and Electric Vehicle Emergency Field Guide. *National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA*.
- National Fire Protection Association. (2020). *National Electrical Code*.
- National Petroleum Council. (2012). Advancing Technology for America's Transportation Future. *Chapter 13 - Electric, USA*.
- National transportation safety board. (2018). Preliminary Report - Battery Fire in Electric-powered Passenger Car. *National Transportation Safety Board, 2018*.
- Nishi Y. (2001). The development of lithium ion secondary batteries. *Chem Rec*, 2001(1), 406–13.
- Offer GJ. (2015). Automated vehicles and electrification of transport. *Energy & Environmental Science*, 2015(8), 26–30. DOI:10.1039/C4EE02229G.
- Orendorff CJ. (2012). The role of separators in lithium-ion cell safety. *Electrochem Soc Interface*, 2012(21). 61–5.
- Oswal M., J. Paul and R. Zhao. (2010). A comparative study of lithium-ion batteries.
- Ouyang D., Chen M., Huang Q., Weng J., Wang Z., Wang J. (2019). A Review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. *Applied Sciences*, 2019(9), 2483. DOI:10.3390/app9122483.
- Pecht M. (2015). *CALCE Battery Research Group 2015*. <https://web.calce.umd.edu/batteries/safety.html>, (Ziyaret Tarihi: 15 Şubat 2022).
- Rivière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle SS., Marlair G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 2012(5), 5271–80. DOI:10.1039/C1EE02218K.
- Robb J. (2013). Optimization Of Batteries For Plug-in Hybrid Electric Vehicles.
- Roussel M. (2009). Appendix B Standard reduction potentials at 298.15K and 1bar, in *A Life Scientist's Guide to Physical Chemistry*.
- Ruiz, V. and Pfrang, A. (2018)., JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation - Workshop report: summary & outcomes, *Publications Office of the European Union, Luxembourg*.

- SAE International.(2012). Surface Vehicle Recommended Practice J2990, Hybrid and EV First and Second Responder Recommended Practice. *Society of Automotive Engineers*.
- Schiemann M, Bergthorson J, Fischer P, Scherer V, Taroata D, Schmid G. A. (2016). review on lithium combustion. *Applied Energy*, 2016(162), 948–65. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.10.172.
- Statistik om bussbranschen. (2017). *Sveriges Bussföretag*.
- Stave C. and Carlson A. (2017). A Case Study Exploring Firefighters and Municipal Officials Preparedness for Electrical Vehicles. *Eur. Transp.*, 2017(9), 25. DOI: 10.1007/s12544-017-0240-1.
- Sulzberger C., (2004). An Early Road Warrior: Electric Vehicles In The Early Years Of The Automobile. *IEEE Power Energy Mag.*, 2(3), 66–71.
- Summer SM. (2010). Flammability assessment of lithium-ion and lithium-ion polymer battery cells designed for aircraft power usage: US Department of Transportation. *Federal Aviation Administration*.
- Tarascon J-M , Armand M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 2001(414), 359–67.
- Tesla. (2019). *Tesla Vehicle Safety Report*.
- Thermal A, Chamber T. (2019). Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber 2019, 1–17.
- Tidblad Ahlberg A. (2018). Regulatory Outlook on Electric Vehicle Safety, in *Fifth International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2018, Borås*.
- Trattnig G. and Leitgeb W. (2014). Chapter 2: Battery Modelling for Crash Safety Simulation, in *Automotive Battery Technology*, Springer, 19-35.
- URL-1:<https://www.lemo-project.eu/wp-content/uploads/2015/01/History-of-electric-cars.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 02 Eylül 2022).
- URL-2:<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:266:0001:0014:en:PDF>, (Ziyaret Tarihi: 04 Ocak 2022).
- URL-3:<https://insideevs.com/nissan-reveals-leaf-e-plus-ces/>, (Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2022).
- URL-4:<https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/ev-basics/vehicle-types>, (Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2022).

- URL-5:https://pluginbc.ca/wp/wp-content/uploads/2014/07/EV-BeginnersGuide_Final_Sept2_2014.pdf, (Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2022).
- URL-6:<http://liionbms.com/php/cells.php>, (Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2022).
- URL-7:<https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1429518/porsche-catches-fire-while-charging>, (Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022).
- URL-8: <https://news.cgtn.com/news/3d3d514d7a416a4d34457a6333566d54/index.html>, (Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022).
- URL-9:<https://www.buildings.com/article-details/articleid/15485/title/parking-lot-ev-chargers/viewall/true>, (Ziyaret Tarihi: 08 Ekim 2021).
- URL-10:<http://www.gg-ev.com/asdisp2-65b095fb-26641-.html>, (Ziyaret Tarihi: 22 Kasım 2021).
- URL-11:<http://www.gg-ev.com/asdisp2-65b095fb-26641-.html>, (Ziyaret Tarihi: 18 Kasım 2021).
- URL-12:https://www.sohu.com/a/233521985_526255, (Ziyaret Tarihi: 03 Ocak 2022).
- Verband der Automobilindustrie (VDA). (2017). Accident Assistance and Recovery of Vehicles with High-Voltage Systems. *Verband Der Automobilindustrie EV 2017*, 1–30.
- Wang Q , Li K, Wang Y , Chen H , Duan Q , Sun J. (2018). The efficiency of dodecafluoro- ro-2-methylpentan-3-one on suppressing the lithium ion battery fire. *J Elec- trochem Energy Convers Storage*, 2018(15), 041001.
- Wang Q, Ping P, Sun J. (2017). Thermal hazard of lithium ion battery and security coun- termeasure. *1st ed. Beijing Science Press*.
- Wang Q., Mao B., Stolarov SI., Sun J. A. (2019).Review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019(73), 95–131. DOI:10.1016/j.pecs.2019.03.002.
- Wang Q., Ping P., Zhao X., Chu G., Sun J., Chen C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *J Power Sources*, 2012(208), 210–24.
- Wang Q., Sun J., Chen C. (2009). Effects of solvents and salt on the thermal sta- bility of lithiated graphite used in lithium ion battery. *J Hazard Mater*, 2009(167), 1209–14.
- Weng Y-C , Cho H-P , Chang C-C , Chen S-L. (2011). Heat pipe with PCM for electronic cooling. *Appl Energy*, 2011(88), 1825–33.

- Wingfors H. and A. Fredman A. (2018). Skyddskapacitet larmställ kopplat till fordonsbrand. *FOI Totalförsvarets forskningsinstitut*.
- Yang Z. (2009). Synthesis and performance of high safety cathode materials for lithium-ion batteries, *Beijing University of Chemistry Technology*.
- Yao X., Xie S., Chen C., Wang Q., Sun J., Li Y. (2005). Comparisons of graphite and spinel $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries. *Electrochim Acta*, 2005(50), 4076–81.
- Ye Y., Saw LH., Shi Y., Tay AA. (2015). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Appl Therm Eng*, 2015(86), 281–91.
- Youcef HB., Armand M., Orayech B., Saurel D., Shanmukaraj D. (2019). Solid polymer electrolyte based on modified cellulose and its use in lithium or sodium secondary batteries. *Google Patents*.
- Zeng Z., Wu B., Xiao L., Jiang X., Chen Y., Ai X. (2015). Safer lithium ion batteries based on nonflammable electrolyte. *J Power Sources*, 2015(279), 6–12.
- Zhai H, Cui X. (2019). Thermal management system. *Google Patents*.
- Zhang H., Zhou M-Y., Lin C-E., Zhu B-K. (2015). Progress in polymeric separators for lithium ion batteries. *RSC Adv*, 2015(5), 89848–60.
- Zhang SS. (2007). A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *J Power Sources* 2007(164), 351–64.
- Zheng J., Engelhard MH., Mei D., Jiao S., Polzin BJ., Zhang JG. (2017). Electrolyte additive enabled fast charging and stable cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 2017(2). DOI:10.1038/nenergy.2017.12.
- Zhou X. (2018). Frequent Fire Accidents on Electric Vehicle. *Operators* 2018(10), 65–6.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

ALYAR H. (2022). Elektrikli Otomobillerin Yapısı ve Yangın Riskleri. *Uluslararası Yakıtlar, Yanma ve Yangın Dergisi*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.52702/fce.1057432>.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2022 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2017 yılından beri özel bir firmada projede yöneticisi olarak görev yapmaktadır.

.

