



Received / Makale Geliş Tarihi 22.02.2024
Published / Yayınlanma Tarihi 31.05.2024
Volume (Issue) Cilt (Sayı) 8 (42)
pp / ss 638-652

Research Article / Araştırma Makalesi
10.5281/zenodo.11434251
Mail: editor@pejoss.com

Doğan Kazak

<https://orcid.org/0009-0007-2508-991X>
ASELSAN AŞ., İtfaiye Birimi, Ankara / TÜRKİYE

Lityum-İyon Bataryaların Yangın Güvenliği: Tamamen Elektrikli Araçlarda Risk Değerlendirmesi, Önlemler ve Mücadele

Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Risk Assessment, Precautions, and Mitigation in Battery Electric Vehicles

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, Tamamen Elektrikli Araçların yangın güvenliği üzerine odaklanmaktadır, özellikle Lityum-İyon bataryalarla çalışan araçlarda yangın risklerini ve bu risklerin yönetimini inceler.

Gereç ve Yöntemler: Analiz, mevcut literatürün derinlemesine gözden geçirilmesi, özellikle de Lityum-İyon bataryaların termal kaçak durumları, park halindeyken veya trafik kazaları sonucu yanma eğilimleri üzerine yapılan çalışmalar temel alınmıştır. Ayrıca, dünya genelindeki Tamamen Elektrikli Araç kullanımı ve satış verileri ile yangın olayları arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

Bulgular: Tamamen Elektrikli Araçlar, yüksek enerji yoğunluğu ve verimlilik sunmasına rağmen, özellikle Lityum-İyon bataryaların fiziksel zarar görmesi durumunda yangın ve patlama riski taşımaktadır. Bu bataryalarda meydana gelen termal kaçaklar, ciddi yangınlarla sonuçlanabilmekte ve trafik kazaları sırasında bu risk artmaktadır. Elektrikli araçların genel satış rakamları ve bu araçlarda meydana gelen yangın vakaları artış göstermektedir.

Sonuç: Tamamen Elektrikli Araçların yaygınlaşması ile birlikte, yangın olaylarının sayısında artış beklenmektedir. Bu durum hem araç üreticileri hem de itfaiye gibi acil servisler için yeni stratejilerin ve yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Araç içi enerji depolama sistemlerinin güvenliğinin artırılması ve toplumun bu konuda daha fazla bilinçlendirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç Yangınları, Lityum-İyon Batarya, Tamamen Elektrikli Araç, Termal Kaçak, Yangınla Mücadele.

ABSTRACT

Purpose: This study focuses on the fire safety of Battery Electric Vehicles, particularly examining the fire risks associated with Lithium-Ion batteries and the management of these risks.

Materials and Methods: The analysis is based on an in-depth review of current literature, particularly studies on thermal runaway scenarios in Lithium-Ion batteries and their tendencies to ignite while parked or during traffic accidents. Additionally, the relationship between the global usage and sales data of Battery Electric Vehicles and fire incidents has been evaluated.

Findings: Despite offering high energy density and efficiency, Battery Electric Vehicles carry a risk of fire and explosion, especially when Lithium-Ion batteries are physically damaged. Thermal runaway events in these batteries can result in serious fires, with increased risks during traffic accidents. General sales figures for electric vehicles and the incidence of fires in these vehicles are on the rise.

Conclusion: With the proliferation of Battery Electric Vehicles, an increase in fire incidents is expected. This situation requires the development of new strategies and methods for both vehicle manufacturers and emergency services such as fire departments. Enhancing the safety of onboard energy storage systems and increasing public awareness of this issue are recommended.

Keywords: Electric Vehicle Fires, Lithium-Ion Battery, Battery Electric Vehicle, Thermal Runaway, Firefighting.

1. GİRİŞ

Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA'lar), sürüş için elektrik gücüne dayanır. Bu inceleme, kısmen veya tamamen Lityum-İyon (Li-ion) bataryalarla güçlendirilen yolcu araçlarına odaklanmaktadır.

TEA'lar giderek popüler hale geliyor ve sadece temiz ulaşımın bir sembolü olmakla kalmıyor, aynı zamanda mükemmel teknik performans vadeden araçlar olarak göze çarpmaktadır (Matulka, 2014). Ancak, hala iyi satışlarını sürdüren geleneksel yakıtlı araçlarla karşılaştırıldığında, Elektrikli Araçlar (EA'lar) yangın güvenliği konusunda şüpheleri artırmaktadır (Boehmer vd., 2020). Bu şüpheler, önceki yıllarda

meydana gelen TEA yangın olaylarına dayanabilir. Bu yangın kazalarının çoğunun, Li-ion bataryaların termal kaçak olayı, park edilmiş araçlarda veya sürüş sırasında kendi kendine yanması ve trafik kazalarından sonra yangınlar nedeniyle meydana geldiği kanıtlanmıştır (Bisschop, 2020). Yüksek döngü ömrü, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek verimlilik gibi eşsiz özellikleri, onları otomotiv uygulamaları için uygun hale getirmektedir (Nitta vd., 2015). Dünya genelinde daha fazla Li-ion batarya ile çalışan yol aracı devreye girdikçe, bu araçların trafik kazalarında yer alma olasılığı artacaktır. Geleneksel yakıtlı araçlarda olduğu gibi, araç içi enerji depolama sisteminin kaza ile ilgili kişilerin güvenliği için bir tehlike haline gelme riski vardır. Geleneksel araçlarla ilişkilendirilen risklerin iyi tanımlandığı ve genellikle toplum tarafından kabul edildiği bir gerçektir; Li-ion batarya ile çalışan yol araçları için bu rahatlık seviyesine ulaşmak için zaman ve eğitim gereklidir (Bisschop, 2020). Yangın, araçları etkileyen birçok riskten biridir. TEA'larda görülen yangın olayları göz önüne alındığında, risk ve tehlike genellikle batarya ve güç sistemi ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, batarya sayısı ne kadar artarsa, üretilen enerji miktarı da o kadar artacağından, yangın riski artacaktır. Lityum elementi genellikle ilgili sorulara neden olmaktadır. Bir Li-ion batarya fiziksel olarak etkilendiğinde, kırılabilir ve kıvılcımlar, yanıcı gazlar ve toksik yanma ürünleri püskürtebilir. Bu koşullardan dolayı yangın ve patlamalar meydana gelme ihtimali yüksektir (Brzezinska & Bryant, 2022). Tipik bir batarya sistemi, kendiliğinden tutuşma olasılığı düşüktür. Ancak, olumsuz işletme koşulları veya çarpışmalar nedeniyle termal, mekanik veya elektriksel olabilen dış etkilere duyarlıdır (He vd., 2020). 2016'da dünya çapında günlük olarak kullanılan elektrikli bisiklet sayısı 210 milyonu bulmuştur. Karayollarında çalışabilen TEA'ların genel satışları, Eylül 2016'ya kadar bir milyon birim olarak kaydedilmiştir. 2019'un sonuna gelindiğinde, dünyanın önde gelen otomobil üreticileri Nissan ve Tesla'nın sırasıyla 450.000 adet Nissan Leaf ve 448.634 adet Tesla Model S satışı gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (Faraz vd., 2020). Yukarıdaki verilere dayanarak, TEA'ların artan popülerliği sonucunda yangın olaylarının olasılığının da artacağı sonucuna varılabilir. Şekil 1'de 2023 yılı Türkiye'de satışı gerçekleştirilen EA satış bilgileri yer almaktadır.



Şekil 1. 2023 yılı EA Satış Rakamı (Türkiye)

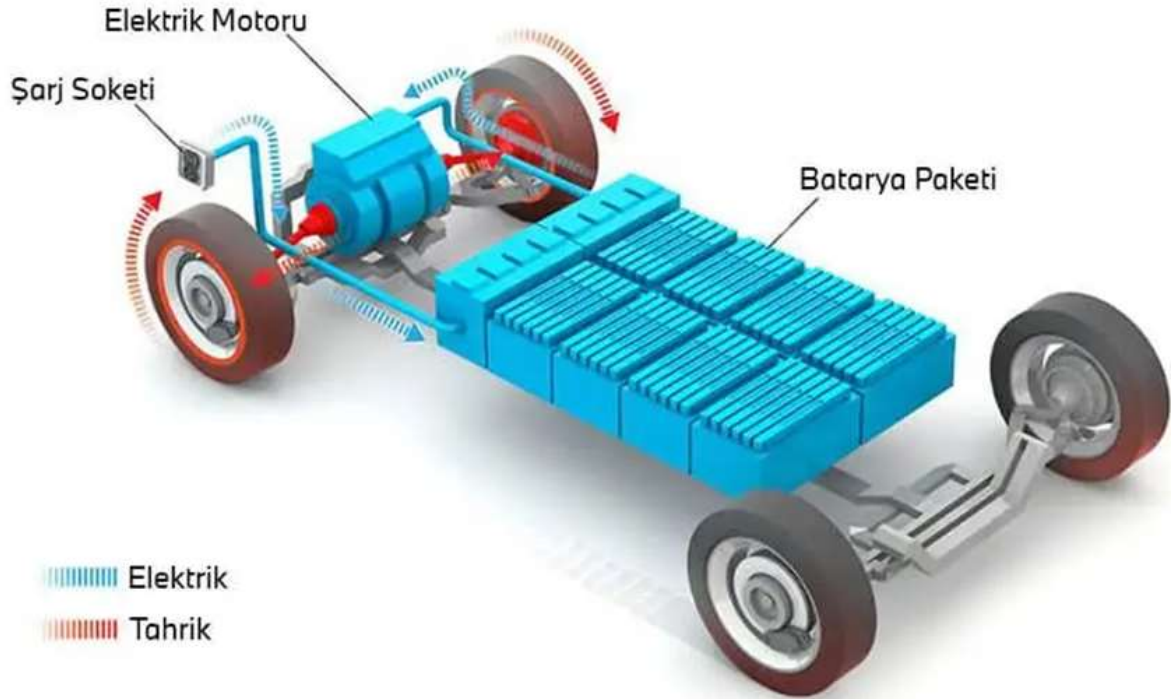
2. TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇ

Elektrikli otomobilin birçok adı vardır, bunlar arasında e-otomobil, EA, tamamen elektrikli veya tamamen elektrikli otomobil bulunmaktadır. Audi gibi bazı üreticiler, tamamen elektrikli tahrikli yeni otomobil modellerini tanımlamak için "e-tron" terimini kullanır. İngilizcede TEA'lar, "Battery Electric Vehicle" (BEV) terimi altında toplanmıştır ve kısaltılmış şekilde BEV olarak ifade edilir (AUDI, 2022). TEA'lar, klasik İçten Yanmalı Motor (İYM) araçlarına göre kullanımı basit ve kolaydır. TEA mimarisi, yüksek voltajlı batarya, bir elektrik motoru ile güç elektroniği kontrolörü ve tek hızlı bir şanzıman içermektedir.

TEA'lar, temiz ve verimli bir araç sistemi için en ekonomik yöntem olduklarından, pazar paylarını artırmaktadırlar. İYM araçlarına kıyasla, bir TEA'nın en önemli avantajları genel yüksek verimlilik, güvenilirlik ve elektrik motorunun görece düşük maliyetidir (Faraz vd., 2020)

TEA, sadece elektrikle çalışır ve içerisinde yanmalı motor bulunmaz, bu nedenle yerel olarak emisyon üretmez. Bu durum, BEV'leri çevre dostu araçlar olarak değerlendirmemize neden olur. Ancak, bazı sürücüler menzil endişesi taşıyabilirler. Ancak, bugün çoğu BEV, 185 mil (300 kilometre) veya daha fazla menzile sahiptir ve sürücüler genellikle günlük olarak 100 kilometreden daha az yol yaparlar. 100 km'yi aşma endişesi taşıyan sürücüler, menzili artırmak için çeşitli çözümler kullanabilirler. Bir TEA'da, şarjın bitmek üzere olduğu durumlarda bataryaya özel olarak elektrik sağlayan, genellikle benzinle çalışan jeneratörlere "menzil artırıcı" denir. Ancak, TEA'larde bu jeneratörler, araca doğrudan güç sağlamaz; çünkü bunu yaparsa araç hibrit bir model olurdu. TEA'lar, evde veya iş yerinde şarj edilebilen bir batarya sistemine sahiptir. Günümüzde, özellikle büyük şehirlerde ve otoyollar boyunca giderek daha fazla sayıda halka açık şarj istasyonu bulunmaktadır. Türkiye'de de son yıllarda şarj istasyonu sayısında önemli artışlar yaşanmıştır. Bu nedenle, gelecekte TEA'larla uzun mesafeli seyahatler yapmanın daha kolay olacağı öngörülebilir (BMW, 2023).

Kat edilen mesafeye ve frenleme işlemlerine bağlı olarak jeneratör, hızlanma ve frenleme aşamalarında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Li-ion batarya elektrikli otomobilin en önemli parçasıdır. Bu nedenle üretici firmalar, yüksek voltajlı bataryaların geliştirilmesini genişletmektedir (AUDI, 2022). Şekil 2'de TEA yapısı görülmektedir.



Şekil 2. TEA Yapısı

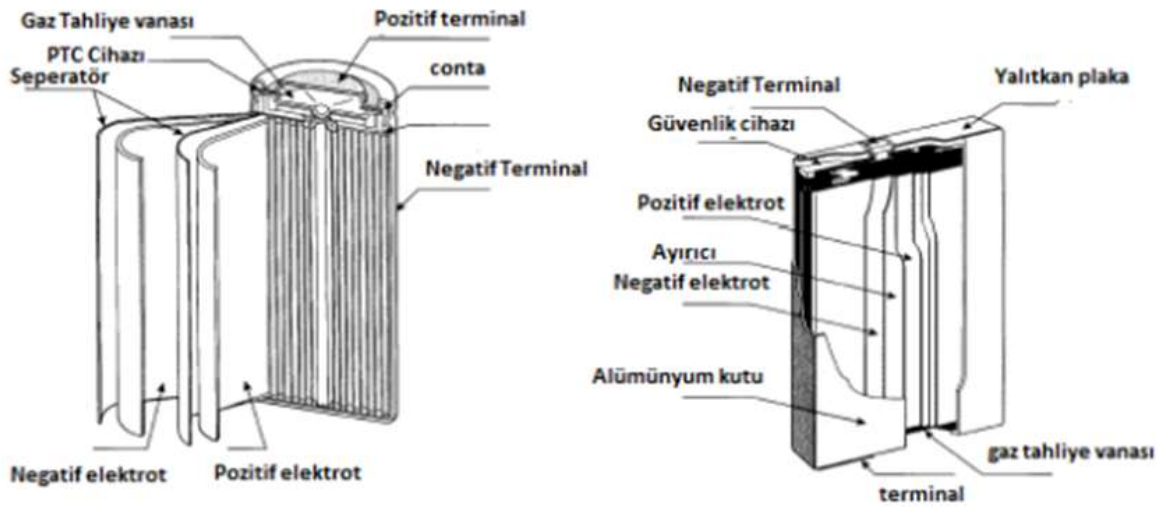
2.1. Özellikleri

- *Elektrikli İtici:* TEA'lar, içten İYM'lere kıyasla elektrik motorlarıyla hareket ederler.
- *Şarj Edilebilir Batarya Paketleri:* TEA'lar, enerjiyi depolamak için şarj edilebilir batarya paketleri kullanır.
- *Sıfır Emisyon:* EA'lar, sürüş sırasında sıfır egzoz emisyonu üretirler, çevreye daha az zarar verirler.
- *Yüksek Verimlilik:* Elektrikli motorlar, İYM'lere kıyasla daha yüksek bir verimlilik sunarlar.
 - *Sessiz Çalışma:* EA'lar, İYM'li araçlara kıyasla daha sessiz çalışırlar.
- *Düşük İşletme Maliyetleri:* EA'lar, İYM'li araçlara kıyasla genellikle daha düşük işletme maliyetlerine sahiptirler.
- *Anlık Tork:* EA'lar, İYM'li araçlara kıyasla daha hızlı ivmelenme sağlayan anlık tork sunarlar.

- *Yeniden Yükleme Frenleme: EA'lar*, frenleme sırasında kinetik enerjiyi geri kazanarak bataryaları şarj edebilirler.
- *Düşük Bakım Gereksinimleri: EA'lar*, İYM'lere kıyasla daha az hareketli parça içerdiği için genellikle daha az bakım gerektirirler.
- *Gelişmiş Teknoloji Entegrasyonu: EA'lar*, genellikle gelişmiş teknoloji özellikleri içerir ve internet bağlantısı gibi modern özelliklerle donatılabilirler (Faraz vd., 2020).

2.2. Batarya Çeşitleri

Birden çok hücrenin bir araya getirilerek oluşturduğu sistemlere batarya denir. Batarya, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Tek bir batarya hücresi, pozitif bir katot ve negatif bir anot olmak üzere, her ikisi de bir elektrolit ile ilişkilidir. Elektrolit ile terminaller arasındaki kimyasal tepkime elektrik enerjisi üretir. Batarya, akımı tersine çevirerek kimyasal tepkimeyi tersine çevirebilir. Bu nedenle, batarya şarj edilebilir. Katotlar ve elektrolit için kullanılan malzemeler ve bunların türleri, batarya özelliklerini belirler (Yong vd., 2015). Şekil 3'te yuvarlak ve yassı şeklinde li-ion batarya hücre yapısı görülmektedir.



Şekil 3. Yuvarlak ve Yassı Batarya Yapısı (Ekici, 2019)

EA'lar için uygun farklı bataryalar bulunmaktadır. Bu bataryalar aşağıda açıklanmıştır.

- *Li-ion Bataryalar*: Daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hafif yapı ve daha uzun ömür gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, çoğu modern EA'larda kullanılırlar.

- *Kurşun-asit (Pb-Acid) Bataryalar*: Bu bataryalar, TEA'larda kullanılan en eski bataryalardan biridir. Bataryanın pozitif terminali kurşun oksit, negatif terminali kurşundur. Bataryanın her iki ucu da sülfürik asit bir elektrolit içinde emdirilmiştir. Deşarj süreci sırasında, negatif terminaldeki kurşun ve pozitif terminaldeki kurşun oksit sülfürik aside yanıt verir. Tepkime sonucunda kurşun sülfat oluşur ve elektrolit suya dönüşür; kimyasal tepkime sırasında enerji açığa çıkar ve enerji devreye girdiğinde tepkime tersine döner. Daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler ancak düşük maliyetleri nedeniyle bazı uygulamalarda hala tercih edilirler.

- *Nikel-Metal-Hidrit (NiMH) Bataryalar*: Bu tür bataryalar, pozitif terminallerinde nikel kullanılmaktadır. Bunlar dört çeşittir: nikel-çinko (Ni-Zn), nikel-demir (Ni-Fe), nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve nikel-kadmiyum (Ni-Cd). Minimum ömürleri ve daha az özgül güçleri nedeniyle Ni-Zn ve Ni-Fe tipi bataryalar, TEA'lar için bir seçenek olarak kabul edilmez. En iyi icat, kadmiyum esaslı Ni-Cd bataryalardır. Bu bataryalar, Ni-MH bataryalarına karşıdır. Ni-MH batarya reaksiyonu, metal hidritin nikel oksihidroksit ile tepkimesiyle nikel hidroksit ve metali ayrı ayrı vermektedir. Orta seviye enerji yoğunluğuna sahiptirler ve daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle Hibrit Elektrikli Araçlarda (HEA) kullanılmaktadır.

- *Lityum Polimer (Li-Po) Bataryalar*: Li-ion bataryalarla benzer özelliklere sahiptirler ancak daha ince yapıları ve daha esnek bir şekil faktörü sunarlar.

• *Kurşun-jel Bataryalar:* Kurşun-asit bataryalara benzerler ancak daha dayanıklı ve bakım gerektirmeyen bir yapıya sahiptirler.

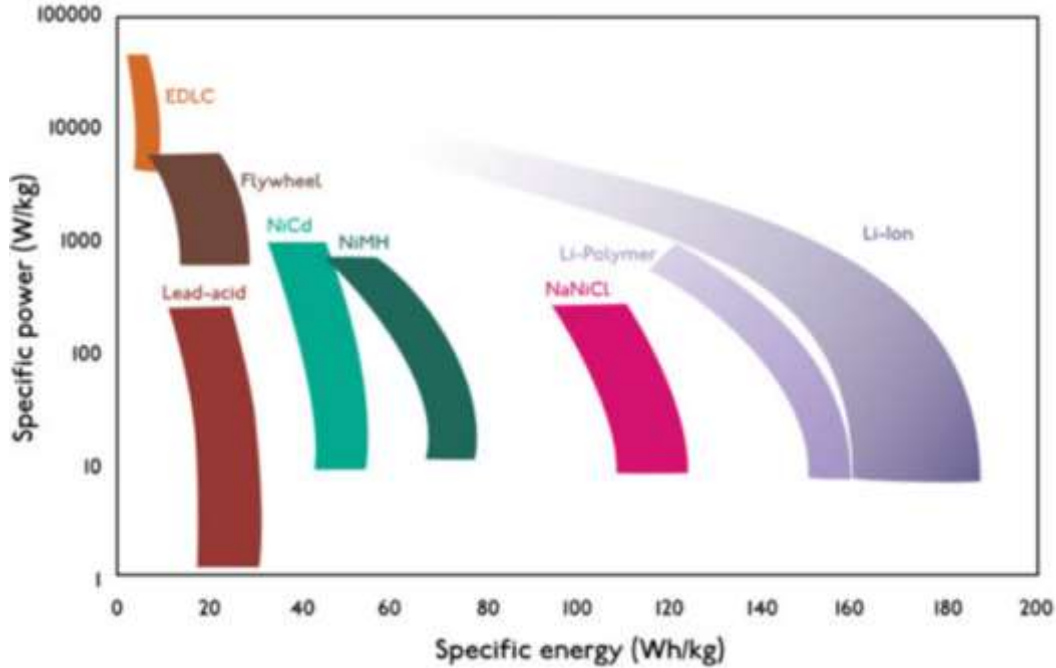
• *Metal Hava Bataryaları:* Diğer bataryalar gibi kolay çalıştırılmaz çünkü çoğu akımı tersine çevirerek yeniden şarj edilemez, bunun yerine anotları farklı malzemelerle değiştirmemiz gerekir. Bu bataryalar mekanik olarak yeniden şarj edilebilir ve enerji birimleri açısından benzerdir. Bu bataryaların önemli bir avantajı, sadece bir reaktif maddeye sahip olması ve diğer reaktif maddenin dış ortamdan alınması gerektiğidir, bu da bataryanın ağırlığını azaltır. Tüm metal hava bataryaları arasında, çinko hava bataryanın en popüler olanıdır, diğer bataryalar ise geliştirilmeye devam etmektedir. Bataryanın büyük enerji kapasitesi, güvenilir bir bataryaya ihtiyaç duyan küçük cihazlar için değerlidir. Şu anda, farklı nominal gerilimlere ve enerji yoğunluklarına sahip çeşitli batarya teknolojileri mevcuttur ve sürekli olarak geliştirilmektedir. EA'larda yaygın olarak kullanılan ve bazıları hala araştırma ve geliştirme aşamasında olan batarya teknolojileri ve özellikleri Tablo 1'de görülmektedir (Yong vd., 2015).

Tablo 1. EA'larda Kullanılan Batarya Çeşitleri ve Özellikleri

Batarya Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Pb-acid	2	35	1000	Yok	+15, +50
NiCd	1.2	50-80	2000	Var	-20, +50
NiMH	1.2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
Li-ion	3.6	118-250	2000	Yok	-20, +60
LiPo	3.7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
LiFePO ₄	3.2	120	>2000	Yok	-45, +70
Li-S	2.5	350-650	300	Yok	-60, +60

Kaynak: Akgündoğdu vd., 2017

Tablo 1'de verilen batarya çeşitleri, EA'lar ve diğer uygulamalar için en yaygın kullanılan batarya türlerinden bazılarıdır. Her birinin farklı avantajları ve dezavantajları vardır ve belirli bir uygulamaya göre tercih edilirler (Faraz vd., 2020). Şekil 4'te farklı bataryaların güç ve enerji yoğunlukları görülmektedir.

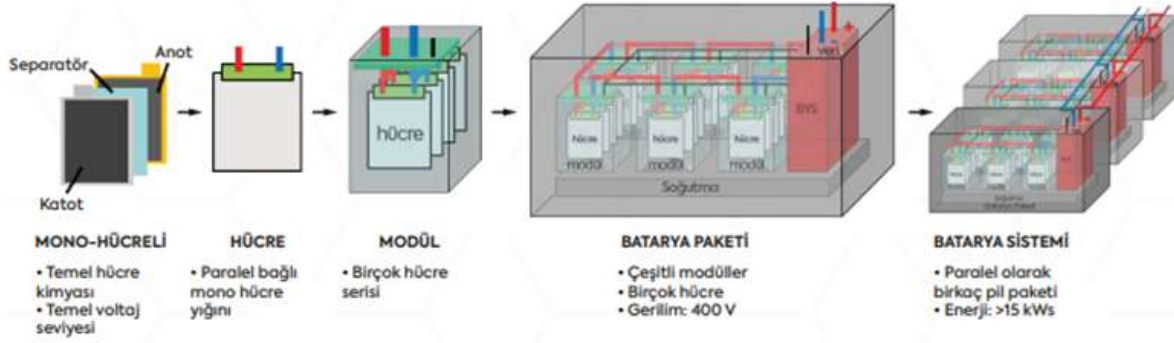


Şekil 4. Farklı Bataryaların Güç ve Enerji Yoğunlukları (Crompton, 2000)

Bireysel batarya hücrelerinin özellikleri, bir EV'nin sürüş performansını belirler. Kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) gibi geleneksel batarya teknolojileri, tümü EV'lerde kullanılmıştır. Li-ion bataryalara göre daha düşük yangın riski oluştursalar da enerji yoğunluğu ve kapasitesi ile şarj/deşarj oranları çok daha sınırlıdır (Evarts, 2015).

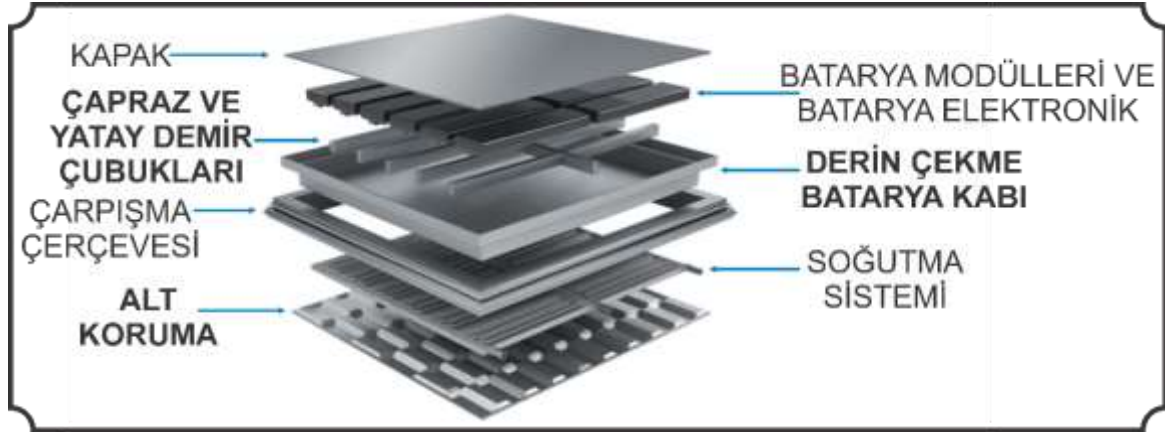
Yüksek voltajlı bir batarya paketi, sıralar ve modüller halinde düzenlenmiş bir dizi batarya hücresinin birleşimidir. Batarya hücresi, batarya paketinin en küçük birimi olarak kabul edilir. Bireysel batarya hücreleri bir araya getirildiğinde veya düzenlendiğinde, bunlar modüller olarak adlandırılır. Daha da ileri gittiğimizde, bu modüller bir araya getirilir ve düzenlenir ve batarya paketlerini oluşturur. Batarya parametrelerine bağlı olarak, ölçeklendirilmiş kalite seviyeleri olabilir. Sıralı olarak düzenlenen hücrelerin

sayısı, toplam batarya paketi voltajını belirler. Batarya kapasitesini artırmak için, dizi kombinasyonları eşit şekilde bağlanmalıdır. Hücre dizileri eşit şekilde bağlandığında, bataryanın kapasitesi ve akım yeteneği katlanarak artar (Faraz vd., 2020). Şekil 5'te batarya sisteminin oluşumu yer almaktadır.



Şekil 5. Batarya Sistemi Oluşumu (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022)

Bir çerçeve, bataryaları bir arada tutmak ve dış darbelerle, ısıya ve titreşime karşı korumak için kullanılır. Batarya paketi, modülleri paket altyapısı içinde entegre eden montajdır. Bu altyapı, yapısal bileşenleri, kabloları, soğutma döngülerini ve güç elektroniğini içerir (Sun vd., 2020). Batarya paketleri dış etkenlerden etkilenmemeleri için batarya kutusu adı verilen koruyucu sistemle donatılmıştır. Şekil 6'da EA'larda bulunan batarya sisteminin koruyucu kısmı yer almaktadır.



Şekil 6. Elektrikli Araçlarda Bulunan Batarya Sistemi (Outokumpu, 2024)

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ YANGINLARI

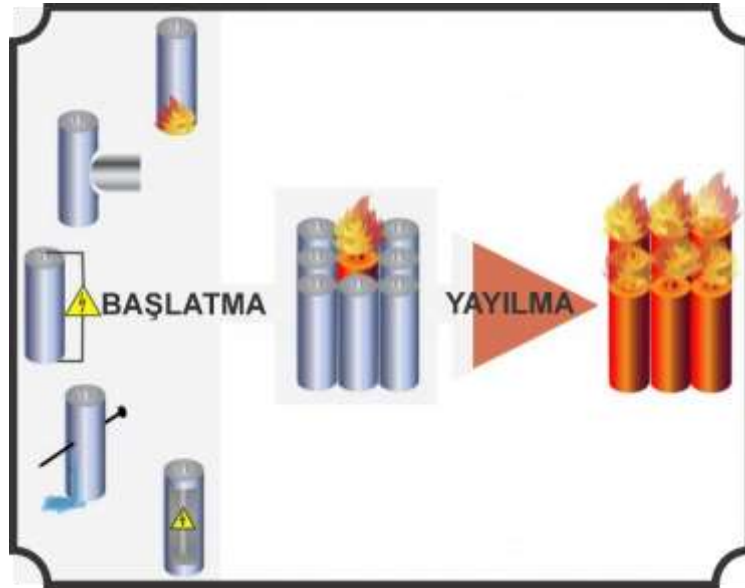
Araçları çevreleyen risklerden biri yangın olaylarıdır. EA'ların sayısı arttıkça, bunlar EA'larda daha belirgin hale gelmeye başlamıştır. TEA yangın durumunun çoğu, özellikle kendiliğinden alev alma durumunda, yangının batarya güç sisteminde başladığı görülmektedir (Sun vd., 2020). Araçlarda yangın güvenliği, yakıt kaynaklarıyla ilgilidir. Geleneksel araçlar için, ortak bir yakıt örneği benzin olabilir. Bu yakıt, güvenli bir şekilde ele alınmaz veya depolanmazsa son derece tehlikeli olabilir. Aynı prensip, bugün çoğu EA'ın yakıt kaynağı olan Li-ion bataryalar için de geçerlidir. Yanan Li-ion bataryaların bazı belirgin özellikleri vardır; termal kaçak olayı, yanıcı, patlayıcı ve toksik gazlar salınımı gibidir (Bisschop, 2020). Bataryalar alev aldıktan sonra ortam sıcaklığı 2000 0C sıcaklıklara ulaşmaktadır (Seber, 2023). EA üretimi ve satışı sonucunda EA yangın sayısında artış yaşanmıştır. Tablo 2'de 6 farklı ülkede gerçekleşmiş EA yangınları bilgisi yer almaktadır.

Tablo 2. 6 Farklı Ülkede Gerçekleşmiş EA Yangın Bilgileri

Ülke	Yıl	EA Yangın Sayısı
Danimarka	2018	3
	2019	10
	2020	18
Kore	2017	21
	2018	21
Hollanda	2020	71
	2021	118
Norveç	2016	17
	2017	28
	2018	8
	2019	18
	2020	24
	2021	32
İsveç	2018	8
	2019	6
	2020	20
	2021	24
	2022	23
Finlandiya	2015	1
	2016	2
	2017	0
	2018	3
	2019	3

Kaynak: Tohir & Martin-Gomez, 2023

EA yangını, batarya ve güç sistemi ile ilişkilendirilen yangın riski ve tehlikesi ile birlikte, batarya paketinin boyutu ve kapasitesi ile bağlantılıdır. Genel olarak, daha fazla batarya ve içerdikleri enerji miktarı ne kadar fazlaysa, EA için yangın riski de o kadar büyük olur (Sun vd., 2020). Li-ion bataryalarda en yaygın ve sık görülen yanma olayı, bataryadaki elektrokimyasalların kısa devre yapması sonucudur. Bataryanın içinde, anot ve katot arasında elektriksel temasın çeşitli nedenlerle oluşması bu duruma yol açabilmektedir. Batarya, mekanik bir hasarla zarar görebilir, batarya içindeki elektrotlar bilinçsizce ve düzensiz bir şekilde kesilebilir veya anot ile katot arasına yabancı bir metal parçası girebilir. Bu tür nedenlerden dolayı, Li-ion batarya üretim teknolojisinin ihlali gibi başka faktörler de kısa devrelere neden olabilir ve sonuç olarak Li-ion batarya yangınları meydana gelebilir. Bataryanın şarj edilirken aşırı yüklenme, düşük şarj seviyelerinde veya aşırı yüksek hava sıcaklıklarında kısa devrelere yol açabilir (Kılınç, 2022). EA batarya paketleri çok küçük bir alanda çok miktarda enerji depolar. Hasar gördüğünde, iç kısa devre termal kaçak olarak adlandırılan bir zincir reaksiyonunu tetikler. Batarya paketi daha fazla ısı üretir ve bu ısıyı dağıtabileceğinden daha fazla ısı üretir ve ateş alır. Batarya yangınlarının yaklaşık %95'i, jet benzeri yönlendirilmiş alevler üreten ateşleme yangınları olarak sınıflandırılır. Diğer %5'i bir buhar bulutu patlamasını içerir (Dia, 2023). Şekil 7'de Li-ion bataryanın yanmasına neden olan etkenler görülmektedir.



Şekil 7. Li-ion Bataryanın Yanmasına Sebep Olan Etkenler (European Commission, 2018)

Grafik 1, 2015-2019 yılları arasında Finlandiya'da gerçekleşen elektrikli araç yangınlarının nedenlerini sıralamaktadır. Bu verilere göre yangınların çeşitli sebepleri şu şekildedir:

- **Teknik Arıza:** Bu kategori, aracın elektrik bileşenlerinde veya bataryasında meydana gelen arızalardan kaynaklanan yangınları kapsar. Özellikle batarya hücrelerinde görülen kısa devre veya aşırı ısınma gibi durumlar, bu kategoride ele alınan yangınların başlıca sebeplerindedir.

- **İnsan Kaynaklı:** Yangınlar, bazı durumlarda insan müdahalesi sonucu meydana gelmektedir. Kundaklama veya kasıtlı yangın çıkarma, yanlış kullanımdan kaynaklanan dikkatsizlikler bu kategori altında değerlendirilir. İnsan hatası veya kasıtlı eylemler, bu yangınların ortaya çıkışında önemli bir rol oynar.

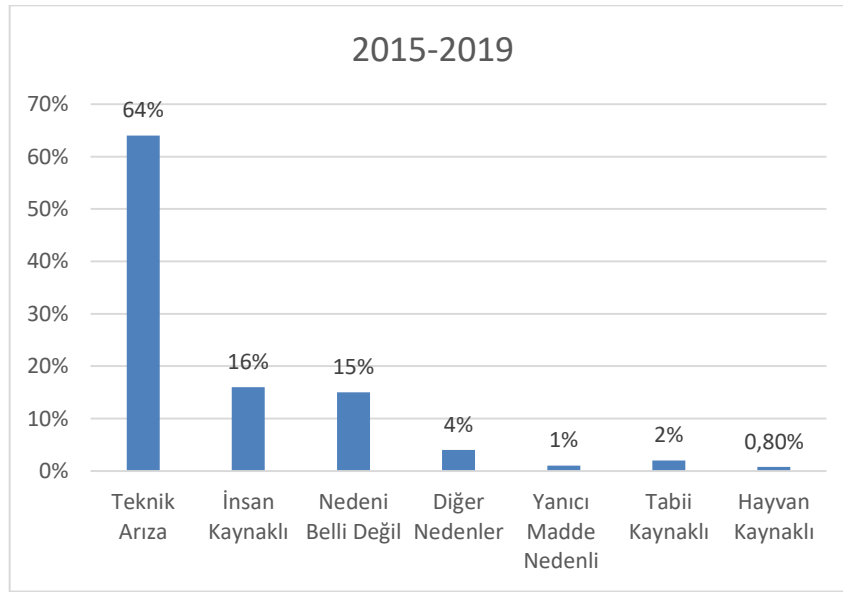
- **Nedeni Belirsiz:** Tüm incelemelere rağmen bazı yangınların kaynağı kesin olarak belirlenememektedir. Bu yangınlar, nedenleri tam olarak tespit edilemediği için "nedeni belli değil" kategorisinde sınıflandırılır.

- **Diğer Nedenler:** Bu kategori, teknik arıza veya insan kaynaklı olmayıp, spesifik olmayan diğer etmenlere bağlı yangınları içerir. Örneğin, aracın maruz kaldığı dış etkenler veya araç içinde bulunan diğer yanıcı bileşenlerin alev alması gibi durumlar bu grupta değerlendirilir.

- **Yanıcı Madde Nedenli:** Araç yakınında veya içinde bulunan yanıcı maddelerin alev alması sonucu meydana gelen yangınlar bu kategori altında toplanır. Bu tür bir yangın, örneğin, aracın yanında bulunan yanıcı bir sıvının tutuşması ile başlayabilir.

- **Tabii Kaynaklı:** Doğal olayların neden olduğu yangınlar, bu kategori altında incelenir. Şiddetli fırtına veya yıldırım düşmesi gibi doğa olayları sonucunda elektrikli araçlarda yangınlar çıkabilir.

- **Hayvan Kaynaklı:** Bu kategori, araçların motor bölgesine sıkışan veya başka şekillerde araçla etkileşime giren hayvanlar tarafından başlatılan yangınları ifade eder. Bu tür durumlar, özellikle motor bölgesinde yuva yapan küçük hayvanlar nedeniyle meydana gelir.



Grafik 1. 2015-2019 Arası Finlandiya'da Gerçekleşen EA Yangın Nedenleri (Linja-aho, 2020)

Grafik 2'deki verilere göre, 2015-2019 arasında insan kaynaklı EA yangınlarının nedenleri şu şekildedir:

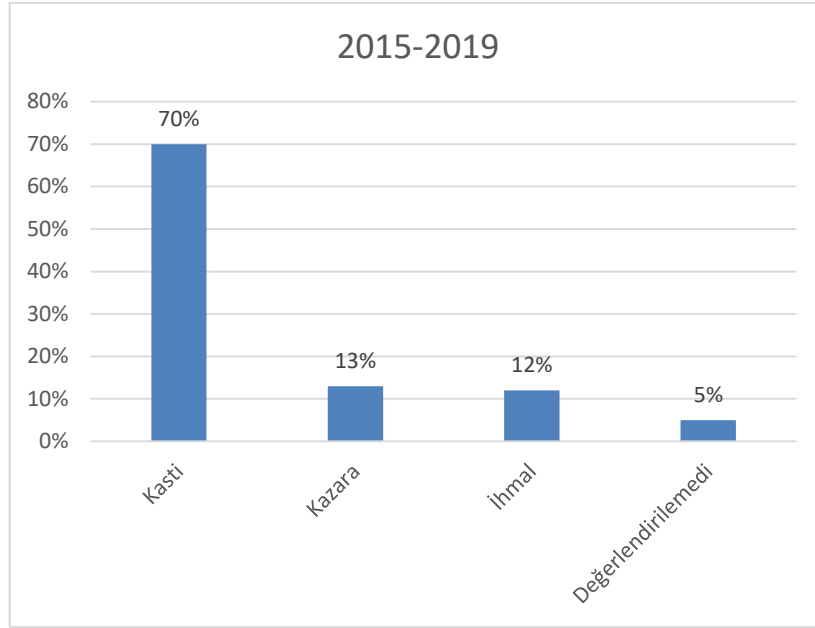
- **Kasti olarak:** Bu yangınlar bilinçli bir eylem sonucu meydana gelmiştir. Bir kişi ya da kişiler tarafından yangının bilerek başlatıldığı durumları ifade eder. Bu tür yangınlar genellikle kundaklama veya kasıtlı yangın olarak adlandırılır.

- **Kazara:** Bu yangınlar tesadüfi bir olay sonucunda meydana gelir. İnsanların istemeden veya dikkatsizlik sonucu yangına sebep olduğu durumları kapsar. Örneğin, bir aracın bakımı sırasında yapılan hatalı işlemler veya bir ekipmanın yanlış kullanımı gibi durumlar bu kategoriye girer.

- **İhmal:** Bu yangınlar, insanların gerekli özeni göstermemesi veya güvenlik kurallarına uyulmaması sonucunda meydana gelir. Örneğin, bir aracın şarj edilirken dikkat edilmemesi veya batarya bakımının düzenli yapılmaması gibi durumlar ihmal kaynaklı yangınlara yol açabilir.

- *Değerlendirilemedi*: Bu durumda, yangının sebebi tam olarak belirlenememiştir. Yangının kaynağı hakkında yeterli bilgi veya kanıt bulunmamaktadır, bu nedenle yangının kesin nedeni belirlenememiştir.

Grafik 2. 2015-2019 Arası İnsan Kaynaklı EA Yangınlarının Nedenleri (Linja-aho, 2020)



Li-ion bataryalar, termal kaçak sırasında ve sonrasında meydana gelen yangınlar sonucunda yanıcı, patlayıcı, boğucu ve zehirli gazları çevreye salırlar. Li-ion batarya yanması sonucunda ortama salınan gazlar Tablo 3'te ayrıntılı olarak listelenmiştir.

Tablo 3. Li-ion Batarya Yangını Sonrası Ortama Salınan Gazlar

Gaz İsmi	Gaz Tehlikeleri
Hidrojen (H₂)	Yanıcı, Patlayıcı
Hidrojen Florür (HF)	Yanıcı değil, Zehirleyici,
Karbonmonoksit (CO)	Yanıcı, Patlayıcı, Zehirleyici
Karbondioksit (CO₂)	Boğucu
Etilen (C₂H₄)	Yanıcı, Patlayıcı, Boğucu
Fosfor Pentaflorürü (PF₅)	Zehirleyici, Yanıcı gazlar (Ayrışma),
Sülfür Dioksit (SO₂)	Yanıcı değil, Zehirleyici

Kaynak: Kazak, 2023

EA üreticileri daha büyük elektrikli sürüş menzillerini hedeflerken ve daha fazla Li-ion bataryayı uyguladıklarında, bir yangın meydana geldiğinde bir EA'dan yayılan potansiyel ısı da artar. Bu yangın riskindeki artış, batarya (veya yakıt) ağırlığı ve kapasitesindeki artışla orantılıdır. EA yangınlarından kaynaklı tehlikeler aşağıda verilmiştir:

- *Yangın ve patlama tehlikesi*: Li-ion bataryalarının alev alma ve patlama riski yüksektir. Dış etkenler, aşırı koşullar veya arıza durumlarında bataryalar alev alabilir veya patlayabilir, bu da ciddi yangın ve patlama tehlikelerine yol açabilir.
- *Zehirli gazlar*: Yanan bataryalardan yayılan dumanlar ve gazlar, zehirli olabilir ve solunum yoluyla zararlı etkilere neden olabilir.
- *Toksik kimyasalların salınımı*: Li-ion bataryalarının içerdiği kimyasalların yanması sonucu, toksik kimyasal maddeler ortaya çıkabilir ve çevreye zarar verebilir.
- *Termal kaçak*: EA'lardaki bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve kapasitesi, termal aşırı yüklenme riskini artırır. Bu durum, aşırı şarj, aşırı deşarj veya batarya hasarı gibi faktörlerle tetiklenebilir.
- *Zorlu söndürme*: EA yangınlarını söndürmek geleneksel yangın söndürme yöntemlerinden daha zor olabilir. Bataryaların alev alması veya patlaması durumunda, özel ekipman ve kimyasal köpükler gibi spesifik söndürme yöntemleri gerekebilir.
- *Yakınlardaki diğer araçlara ve altyapıya zarar verme*: EA yangınları, yakındaki diğer araçlara, binalara veya altyapıya zarar verebilir ve çevresel etkilere neden olabilir.

- *Acil durum müdahale zorlukları*: EA yangınlarına müdahale etmek, geleneksel araç yangınlarına kıyasla daha karmaşık olabilir ve acil durum müdahale ekipleri için ek zorluklar doğurabilir (Sun vd., 2020).

3.1 Tamamen Elektrikli Araç Yangınlarına Müdahale

Bataryanın termal kaçak ve koruma stratejileri üzerine yapılan yaygın çalışmalarla karşılaştırıldığında, batarya yangınlarının bastırılması ve yangın söndürme teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar çok daha azdır. Buna rağmen, bunlar Li-ion yangınlarının söndürülmesinin zor olduğunu, büyük miktarda bastırıcı gerektiğini ve yeniden alevlenme olasılığı olduğunu belirlemiştir (Kong, Li, Jiang, & Pecht, 2018). Ayrıca, geleneksel araç yangınlarına kıyasla, yeniden alevlenme riski her zaman mevcuttur. Bu yeniden alevlenen yangınlar rastgele ortaya çıkabilir ve başlangıç termal kaçak olayından sonra uzun bir süre geçse bile meydana gelebilir, bu nedenle bunlarla başa çıkmak zordur. Tekrar alevlenmenin olmamasını sağlamanın bir yolu, aracın veya Li-ion batarya paketinin tamamen yanmasına izin vermektir. Li-ion batarya paketindeki tüm aktif materyal tüketildiğinde, yeniden alevlenme riski çok daha düşük hale gelir. Bununla birlikte, uygulamada, bu her zaman mümkün olmayabilir veya uygun bir yaklaşım olmayabilir ve bastırma veya söndürme gerekebilir. EA'larda yüksek voltaj tehlikesi unutulmamalıdır.

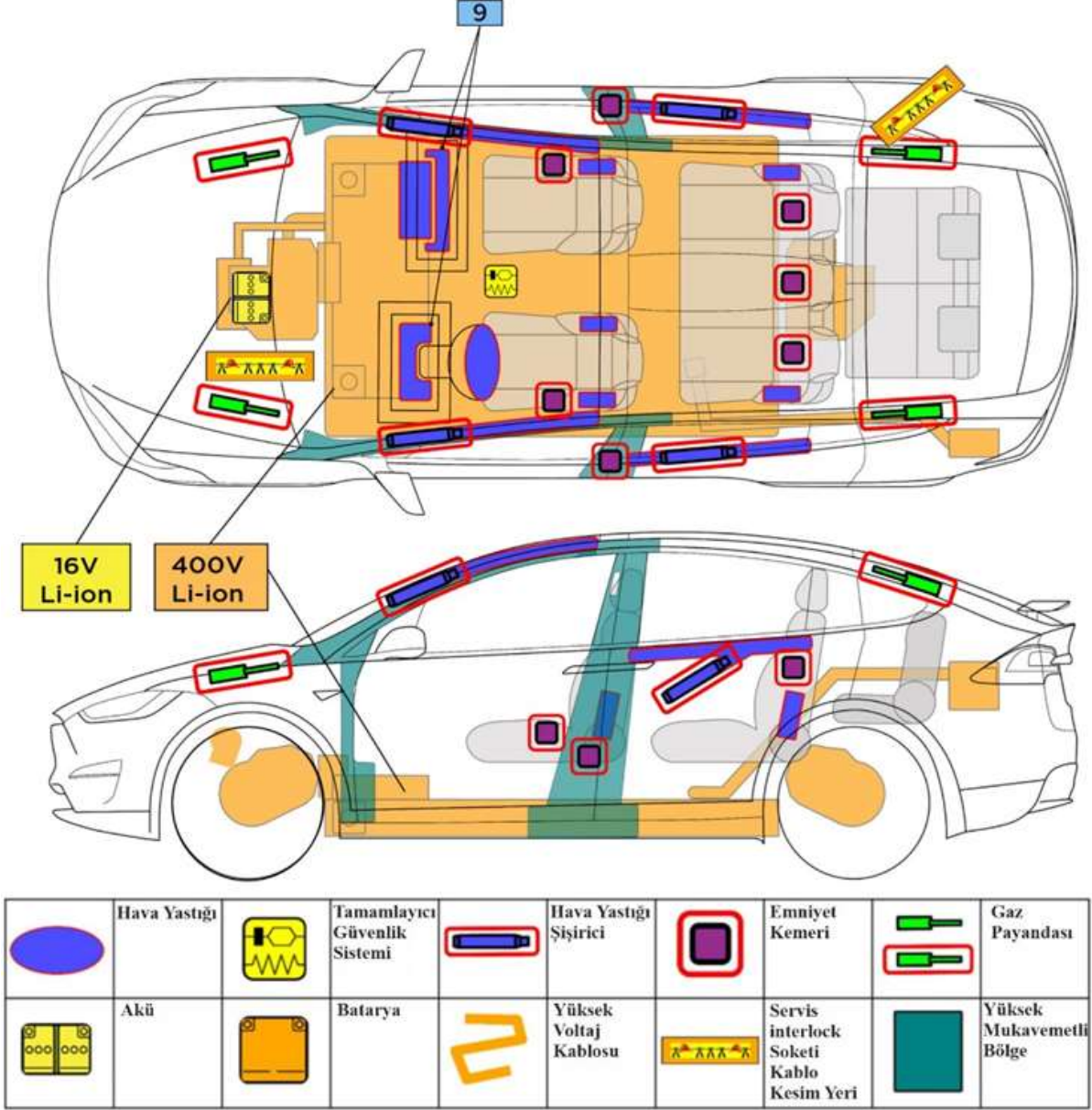
Farklı ülkelerdeki farklı uygulama kurallarının özetlenmesiyle, önerilen EA yangınla mücadele süreci aşağıdaki gibi açıklanır:

- Araç tanımlanır. Bazı Avrupa ülkelerinde, itfaiye teşkilatları, aracın plaka numaralarına dayalı bilgi isteyebilir. Bu, itfaiyecilerin doğru kurtarma veri sayfasını kesin olarak belirlemelerine yardımcı olabilir.
- Duruma göre yangın söndürme planı belirlenir.
- Öncelikle insanlar korunur.
- Yangın kontrol altına alınır veya söndürülür ve araç şarj ediliyorsa, mümkünse şarj altyapısı kapatılır.
- Yangın söndürüldükten sonra araç hemen hareket ettirilmemelidir.
- Son adım yerinde temizliktir. Yangın kazasından sonra belirli imha prosedürleri de önerilir, yani aracın bataryanın yeniden alevlenme yeteneği nedeniyle kazadan sonra açık bir yerde park edilmesi gerekmektedir (Sun vd., 2020).

EA'da farklı nedenlerden yangın çıkabilir. Bunlar şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

İtfaiyeciler için bilgi ve uygulamaların sahaya daha etkin bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Kurtarma ve itfaiye personeline net ve kısa talimatlar gerekmektedir. Basit talimatların iyi bir örneği, ABD'den SAE standardı J2990:2019 Hibrit ve EA İlk ve İkinci Müdahaleci Önerilen Uygulaması'dır (Linja-aho, 2020). Şekil 8'de TEA yangınlarına müdahalede yardımcı olacak görsel verilmiştir.

TESLA MODEL X



Şekil 8. Tesla Model X TEA Yangınına Müdahalede Yardımcı Olacak Görsel (Tesla, 2021)

Her EA üreticisinin, belirli modeller için tüketicilere kılavuz sağlaması, yangın acil durumları da dahil olmak üzere beklenir. Araç operatörlerinin güvenlik bilgi ve uygulamalarına dair yönergelerle tanışık olmaları gerekir. EV Rescue ve ANCAP Rescue gibi telefon uygulamalarında EA'lar için müdahale kitapçığı yer almaktadır. Manuel servis kesmeleri, yüksek voltajlı bataryayı doğrudan kesme veya bileşenlere dokunmadan devre dışı bırakabilir, ancak kötü iletkenlik ciddi yaralanmalara veya ölüme yol açabilir. Bir TEA yangın kazasıyla karşı karşıya kalındığında, acil prosedürler aşağıdaki gibi önerilir. Herhangi bir araçta olduğu gibi, araçtan kıvılcıklar, duman veya alevler görüldüğünde, sürücüler aracı kenara çekmeli, aracı kapatmalı, araçtan çıkmalı ve acil durum hizmetlerini aramadan önce araçtan uzaklaşmalıdır. Ayrıca, müşterilerin acil durum hizmetlerine, sorunun hangi tür aracı ilgilendirdiği hakkında bilgi sağlamaları gerekir, örneğin, TEA veya HEA. Herhangi bir araç yangını gibi, insanların yanmakta olan araç tarafından salınan dumanı, buharları veya gazı solunmaları gerektiği konusunda bilgilendirilmeleri gerekir çünkü bunlar tehlikeli olabilir. Bu en iyi şekilde, güvenli bir mesafeyi koruyarak sağlanabilir, mümkünse araç yangınından rüzgârın olmadığı veya esmediği tarafta olunması gerekir. Son olarak, sürücülerin acil müdahale ekibinin varışını beklerken yoldan uzak durmaları ve gelen trafiğin yolunu kesmemeleri gerekmektedir (Sun vd., 2020). Yangınla mücadele ederken kişisel koruyucu donanım giyilmesi zorunludur. Şekil 9'da EA yangınlarına müdahalede kullanılacak birçok ekipman yer almaktadır.



Şekil 9. EA Yangınlarına Müdahalede Kullanılması Gereken Ekipmanlar (Kazak & Öncel, 2024)

3.2 Söndürme Maddeleri

Li-ion bataryaya sahip EA'ların etkili bir şekilde söndürülmesi için büyük miktarda su gerekmektedir. Ayrıca, geleneksel araç yangınlarına kıyasla, yeniden alevlenme riski her zaman mevcuttur. Büyük Li-ion bataryalara sahip EA'lar, nispeten yeni bir teknolojidir ve arabaların 15-20 yaşına ulaştığında performanslarının nasıl olduğuna dair herhangi bir veri mevcut değildir (Linja-aho, 2020). Batarya yangını bastırmak için sadece karbondioksit (CO₂) veya diğer kimyasallar kullanılırsa, yangın kontrol altına alınabilir ancak batarya paketini soğutamaz veya yeniden alevlenmeyi önleyemez. Öte yandan, su spreyi uygulanırsa hem yangını bastırabilir hem de EA'ı soğutabilir, ancak zamanla daha fazla elektriksel arızayı tetikleyebilir ve Li ile reaksiyona girerek hidrojen gazı salabilir (Schiemann vd., 2016).

Li-ion batarya yangınlarının söndürülme mekanizması hakkında nispeten az bilgi bulunmakta ve literatürdeki çoğu yangın bastırma testi, küçük ölçekli taşınabilir Li-iyon batarya yangınlarına odaklanmıştır. Bu nedenle, yangın söndürme maddelerinin etkinliği ve mevcut yangın bastırma stratejilerinin güvenilirliği genellikle sorgulanmaktadır. CO₂, kuru kimyevi tozlu (KKT) veya kimyasallar yanmakta olan Li-ion bataryanın alevlerini söndürebilir. Ancak, alevlerin söndürülmesi, yanıcı gaz birikimi ve gecikmiş bir ateşleme ile gaz patlamasına neden olma olasılığına karşı dengelenmelidir. Li-ion bataryanın soğutulması veya ısı transferinin engellenmesi, genellikle olumlu bir etki yapar gibi görünmektedir. Yangın söndürmede yaygın olarak kullanılan su, Li-ion batarya yangınlarını kontrol altına almak için iyi bir söndürme maddesi olmasına rağmen kısa devreler veya toksik drenaj suyu gibi potansiyel negatif etkileri olmasına rağmen mükemmel bir soğutma kapasitesi sunar (Andersson vd., 2017).

Jiajia ve arkadaşlarının yapmış olduğu Li-ion batarya söndürme deneyinde 3 söndürme maddesi kullanılmıştır. Bunlar CO₂, HFC-227ea ve su sisidir. Yapılan söndürme deneyinde 3 söndürme maddesi de yangını söndürmüştür. Fakat CO₂ ve HFC-227ea söndürme maddesi bataryanın sıcaklık artışını önleyememiştir. Su sisi ise söndürmede etkili ve hızlı olduğu kadar soğutma işleminde de o kadar etkilidir (Kazak, 2023).

Lin ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneyde CO₂, HFC-227ea, FM-200 (C₆H₁₂O), sıvı azot, aerosol, su enjeksiyonu, sprinkler su, su sisi, köpük ve KKT söndürme maddeleri kullanmışlardır. Yapılan deney sonucunda en etkili söndürme maddeleri sıvı azot ve su bazlı söndürme maddeleri olmuştur (Zhang vd., 2022).

Junchao ve arkadaşlarının yapmış deneyde Li-ion batarya üzerine dört yangın söndürme maddesi 20 saniye boyunca uygulandı ve engelleme etkileri farklıydı. Soğutma verimliliği, Li-ion bataryaların yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Su spreyi, en yüksek soğutma verimliliğine sahiptir ve Li-ion batarya dizileri arasındaki termal kaçak yayılmasını başarıyla engellemiştir. Novec 1230, termal kaçağın yayılmasını engellemekte başarısız olur. Bununla birlikte, Novec 1230, yangın oluşumunu ve toksik gazların oluşumunu en iyi şekilde engeller. Genel olarak, bu çalışma, yangın söndürme maddelerinin seçimi için değerli bilgiler sunmaktadır (Zhao vd., 2021).

Paola ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneyde çeşitli söndürme maddeleri arasında, su ve köpüğün etkili söndürme yaptığı sonucuna varılmıştır (Russoa vd., 2018).

11 batarya üreticilerinin uygun bulduğu söndürme maddeleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Batarya Üreticilerinin Uygun Bulduğu Söndürme Maddeleri

Üretici	Ülke	Batarya Çeşiti	Su	CO ₂	Köpük	KKT	Kum	Halon*
Yuka energy	Çin	LCO (Lityum-Kobalt-Oksit)		X	X	X	X	
Makita	Amerika	NCO (Lityum-Nikel-Kobal-Oksit)	X		X	X		
Enertech	Kore	NMC (Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt)	X			X	X	
Samsung	Kore	NMC	X			X		
Saft	Fransa	LCO	X	X		X		X
Bipower	Amerika	LCO	X	X		X		
Motorola	Amerika	LCO	X	X	X	X		
İdeal	Amerika	LCO		X	X	X		
SDPT	Çin	LCO	X	X				
IDX	Japonya	LMO (Lityum-Manganez-Oksit)	X	X	X	X		
Panasonic	Amerika	NMC	X	X	X	X		
Toplam			9	8	6	10	2	1

*: Halon söndürme maddesi yasaklanmıştır. (Askeri yerlerde kullanılmaktadır)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, TEA'lar ve özellikle Li-ion bataryalar kullanılarak çalıştırılan araçlardaki yangın risklerini ve yönetim stratejilerini incelemiştir. Bulgular, yüksek enerji yoğunluğuna ve verimliliğe rağmen, Li-ion bataryaların fiziksel zarar görmesi durumunda ciddi yangın ve patlama riskleri taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu riskler özellikle trafik kazalarında ve termal kaçak durumlarında artmaktadır. Çalışma, TEA'ların popülaritesinin artmasıyla birlikte yangın olaylarının da artış göstereceğini ve bu durumun hem araç üreticileri hem de acil servisler için yeni stratejiler ve yöntemler geliştirilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

- *Araştırma ve Geliştirme:* Batarya teknolojisi, özellikle termal yönetim ve güvenlik üzerine daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmalıdır. Batarya yangınlarını etkin bir şekilde kontrol altına alacak yangın söndürme maddeleri ve stratejileri üzerine yoğunlaşılmalıdır.

- *Yangın Güvenliği Protokolleri:* EA üreticileri, yangın güvenliği protokollerini güncellemeli ve araçlarda kullanılan bataryaların güvenliğini maksimize edecek şekilde tasarlamalıdır. Acil durum müdahale ekipleri, TEA yangınlarına müdahale konusunda özel eğitimler almalı ve yangın durumunda hızlı ve etkili müdahale edebilmek için donanımlı olmalıdır.

- *Kamu Bilinci ve Eğitimi:* Tüketicilere ve araç kullanıcılarına, TEA'ların yangın güvenliği konusunda detaylı bilgiler sunulmalı ve bu araçların güvenli kullanımı hakkında eğitimler verilmelidir. Kamuoyunun EA'ların potansiyel riskleri konusunda daha bilinçli olması için bilgilendirme kampanyaları düzenlenmelidir.

- *Politika ve Yönetmelikler:* EA'ların yaygınlaşmasıyla birlikte, yangın güvenliği standartları ve yönetmeliklerin gözden geçirilmesi ve gerekirse yeniden düzenlenmesi önem kazanmaktadır. Yangın riskini azaltacak teknolojik yeniliklerin teşvik edilmesi ve desteklenmesi gerekmektedir.

Bu öneriler, TEA'ların hem daha güvenli hale getirilmesine yönelik stratejileri içermekte hem de bu araçların kullanımının artmasıyla potansiyel olarak artabilecek yangın olaylarına karşı proaktif bir yaklaşım sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akgündoğdu, A., Karadeniz, O., Şahin, U., İn , S., Tiryaki, H., Erdoğan, G., . . . & Kocaarslan, İ. (2017). Elektrikli Araçlar için Batarya Paketi ve Batarya Yönetim Sisteminin Gerçeklenmesi. *World Electro Mobility Conference (WELMO'17)*, 1, s. 56-62. İzmir.
- Andersson, P., Wikman, J., Arvidson, M., Larsson, F., & Willstrand, O. (2017). *Safe introduction of battery propulsion at sea*. RISE Research Institutes of Sweden.
- AUDI. (2022). *e-tahrik ile geleceęe*. AUDI: <https://www.audi.com.tr/tr/web/tr/elektromobilite/elektrikli-araclar.html>
- Bisschop, R. (2020). Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events. *Fire Technology*, 56, 2671-2694. doi:10.1007/s10694-020-01038-1
- BMW. (2023). *Elektrikli Otomobil Türleri*. BMW: <https://www.bmw.com.tr/tr/topics/fascination-bmw/bmw-i-ve-e-mobilite/elektrikli-otomobil-turleri.html#bev>
- Boehmer, H., Klassen, M., & Olenick, S. (2020, Temmuz 1). Modern Vehicle Hazards in Parking Garages Vehicle Carriers. *Combustion Science & Engineering*. <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/modern-vehicle-hazards-in-parking-garages-vehicle-carriers?l=401>
- Brzezinska, D., & Bryant, P. (2022). Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. *Energies*, 15, 649. doi:10.3390/en15020649
- Crompton, T. (2000). *Battery Reference Book*.
- Dia, H. (2023, Eylül 15). *Electric vehicle fires are very rare. The risk for petrol and diesel vehicles is at least 20 times higher*. The Conversation: <https://theconversation.com/electric-vehicle-fires-are-very-rare-the-risk-for-petrol-and-diesel-vehicles-is-at-least-20-times-higher-213468>
- Ekici, Y. (2019). *Batarya Yönetim Sistemleri*. Malatya: Yüksek Lisans Tezi: İnönü Üniversitesi. <http://abakus.inonu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11616/42922/558222.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- European Commission. (2018, Mart). *Workshop: Safer Li-Ion Batteries by Preventing Thermal Propagation?* <https://ec.europa.eu/newsroom/eusciencehubnews/items/614941>
- Evarts , E. (2015). Lithium batteries: To the limits of lithium. *Nature*, 526, 93-95. doi:10.1038/526S93a
- Faraz, A., Ambikapathy, A., Thangavel, S., Logavani, K., & Prasad , G. (2020). Battery Electric Vehicles (BEVs). *Electric Vehicles*, 137-160. doi:10.1007/978-981-15-9251-5_8
- He, X., Restuccia, F., Zhang, Y., Hu, Z., Huang, X., Fang, J., & Rein, G. (2020). Experimental Study of Self-heating Ignition of Lithium-Ion Batteries During Storage: Effect of the Number of Cells. *Fire Technology*, 56, 2649-2669. doi:10.1007/s10694-020-01011-y
- Kazak, D. (2023, Kasım-Aralık). Su Sisi, CO2 ve HFC-227ea Söndürme Maddelerinin, Lityum İyon Batarya (LIB) Üzerinde Deneysel Çalışma. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*, 243, 38-46. <https://www.yanginguvenlik.com.tr/edergi/5/243/40/index.html>
- Kazak, D., & Öncel, H. (2024). İtfaiye Ekiplerinin, Tamamen Elektrikli Araç Yangınlarıyla Mücadelesinin İncelenmesi. *Social Sciences Studies Journal*, 10(3), 384-394. doi:10.5281/zenodo.1090340
- Kılınç, T. (2022, Eylül 29-30). Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonlarında Yangın Güvenliği. *Uluslararası Katımlı Yangın Sempozyumu*, 11-34. <http://yanginsempozyumu.org/wp-content/uploads/2022/09/002.pdf>
- Kong, L., Li, C., Jiang, J., & Pecht, M. (2018). Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. *Energies*, 11(9), 2191. doi:10.3390/en11092191
- Linja-aho, V. (2020). Hybrid and Electric Vehicle Fires in Finland 2015–2019. *Presented in Fires in Vehicles (FIVE)* -. Finlandiya. <https://www.ri.se/sites/default/files/2020-12/linja-aho-paper-FIVE%20Hybrid%20and%20Electric%20Vehicle%20Fires%20in%20Finland%202015%E2%80%932019.pdf>

- Matulka, R. (2014, Eylül 15). *The History of the Electric Car*. Energy: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Energy*, 18(5), 252-264. doi:10.1016/j.mattod.2014.10.040
- Outokumpu. (2024). Forta H-Series - Build stronger and lighter vehicle structures with stainless steel. [www.outokumpu.com: https://www.outokumpu.com/expertise/2020/build-stronger-and-lighter-vehicle-structures-with-stainless-steel](https://www.outokumpu.com/expertise/2020/build-stronger-and-lighter-vehicle-structures-with-stainless-steel)
- Russoa, P., Barib, C., Mazzaroc, M., Rosac, A., & Morriellod , I. (2018). Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-ion Battery. *CET*, 67, 727-732. doi:10.3303/CET1867122
- Schiemann, M., Fischer, P., Bergthorson, J., & Scherer, V. (2016). A review on lithium combustion. *Applied Energy*, 162(6), 948-965. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.172
- Seber, H. (2023, Kasım-Aralık). İtfaiyecilerin Elektrikli Araç Yangını Operasyonlarını Planlanması. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*, 243, 16-17.
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, 56, 1361-1410. doi:10.1007/s10694-020-00958-2
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2022). *Mobilite Araç ve Teknolojileri*. Ankara. <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/MobiliteAracveTeknolojileriYolHaritasi.pdf>
- Tesla. (2021). *Emergency Response Guide*. (Model S Emergency Response Guide) https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/2021_Model_S_Emergency_Response_Guide_en.pdf
- Tohir, M., & Martin-Gomez, C. (2023). Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis. *Open Res Europe*, 1-20. doi:10.12688/openreseurope.16538.1
- Yong, J., Ramachandaramurthy, V., Tan, K., & Nadarajah, M. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:10.1016/j.rser.2015.04.130
- Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2022). A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*. doi:10.1007/s10694-022-01278-3
- Zhao, J., Xue, F., Fu, Y., Cheng, Y., Yang, H., & Lu, S. (2021). A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents. *iScience* 24, 10.1016/j.isci.2021.102854.