

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT ARAÇLARDA MEYDANA GELEN YANGINLAR VE
ETKİLİ SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Cemil ÖZKALAY

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

EKİM 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT ARAÇLARDA MEYDANA GELEN YANGINLAR VE
ETKİLİ SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Cemil ÖZKALAY

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN

EKİM 2025

Cemil ÖZKALAY tarafından hazırlanan “HİBRİT ARAÇLARDA MEYDANA GELEN YANGINLAR VE ETKİLİ SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 10.10.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Hüseyin ALTUNDAĞ**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Gökhan COŞKUN**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Cenk ÇELİK**
Kocaeli Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ali TÜRKCAN**
Kocaeli Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “HİBRİT ARAÇLARDA MEYDANA GELEN YANGINLAR VE ETKİLİ SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../2025)

(imza)

Cemil ÖZKALAY





Eşim, Kızım, Oğlum ve Aileme...



TEŞEKKÜR

Bilimsel araştırma, insanlığın en temel meraklarından doğmuş; bilinmeyeni keşfetme arzusuyla beslenmiş ve her nesilde farklı ellerde büyüyerek ilerlemiştir. Bilim yapmak, yalnızca mevcut sorunlara çözüm üretmek değil, aynı zamanda insan aklının sınırlarını zorlamak ve evrensel bilgi birikimine katkı sağlamaktır. Bu süreç çoğu zaman sabır, disiplin ve özveri gerektirir; sonuçları hemen görünür olmasa da uzun vadede insanlığa yön veren dönüm noktaları yaratır. Tez çalışmam sırasında karşılaştığım güçlükler bana, bilimin yalnızca sonuçlarla değil, sürecin kendisiyle de değerli olduğunu göstermiştir. Çünkü her deney, her analiz ve her tartışma, bilim insanının düşünce ufkunu genişletir, eleştirel bakış açısını keskinleştirir ve geleceğe daha sağlam adımlar atmasını sağlar. Bu bağlamda, bilime katkıda bulunmak yalnızca bireysel bir kazanım değil, insanlık tarihine eklenen küçük fakat anlamlı bir tuğla olarak görülmelidir.

Doktora çalışmam süresince bilimsel merak ve azimle yürüdüğüm bu yolda, desteklerini esirgemeyen başta tez danışmanım Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN olmak üzere; Doç. Dr. Gökhan COŞKUN, Onur MAMMACIOĞLU ve adlarını burada tek tek anamadığım çok değerli katkı sunan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım.

Cemil ÖZKALAY



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Hibrit Elektrikli Araçların Tarihçesi	2
1.1.1. İlk gelişim dönemi (1890–1930)	3
1.1.2. Elektrikli araçlardan hibritlere geçiş (1930–1960)	4
1.1.3. Yeniden İlgi ve Petrol Krizleri (1960–1980)	4
1.1.4. Modern hibritlere geçiş (1980–2000)	4
1.1.5. Günümüz ve gelecek perspektifleri (2000–2025)	5
1.2. Hibrit Elektrikli Araç Türleri ve Donanımları	5
1.2.1. Mikro hibrit araçlar (start–stop)	6
1.2.2. Yarı hibrit araçlar (Mild Hybrid, MHEV)	6
1.2.3. Tam hibrit araçlar (Full Hybrid, HEV)	6
1.2.4. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV)	7
1.2.5. Donanım bileşenleri	7
1.2.5.1. Enerji depolama sistemleri	7
1.2.5.2. Güç üniteleri	8
1.2.5.3. Elektrik motorları	8
1.2.5.4. Güç elektroniği	8
1.2.5.5. Batarya yönetim sistemleri	8
1.3. Lityum Pillerin Çalışma Prensipleri	8
1.3.1. Silindirik hücreler	10
1.3.2. Düğme tipi (coin cell) hücreler	10
1.3.3. Prizmatik hücreler	10
1.3.4. Kase tipi (pouch cell) hücreler	10
2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ YANGINLARI	13
2.1. Hibrit Araç Yangınları Literatür Taraması	13
2.1.1. Başlatıcılar ve termal kaçak	13
2.1.2. Yayılım, HRR ve araç ölçeği	13
2.1.3. Tespit ve bastırma stratejileri	14
2.1.4. Modelleme ve sayısal tahmin	14
2.1.5. BMS ve güvenlik mimarileri	14
2.1.6. Açık sorunlar ve araştırma eğilimleri	14
2.2. Lityum-İyon Pil Yangınlarına Yol Açan Etkenler	15

2.3. İçten Yanmalı Motor Aksamından Kaynaklanan Yangınlar	17
2.4. Benzin ve Lityum-İyon Akü Yangınlarının Etkileşimleri.....	18
2.5. Son Beş Yılda Hibrit Araçlarda Yangın ve Geri Çağırma Örnekleri.....	19
2.5.1. Jeep Wrangler 4xe ve Grand Cherokee 4xe (2024)	19
2.5.2. Stellantis Hibrit Jeep yazılım güncellemesi (2023–2024).....	19
2.5.3. Toyota RAV4 hibrid (2023)	20
2.5.4. Ford Escape, Maverick ve Lincoln Corsair hibrid (2023).....	20
2.5.5. Chrysler Pacifica PHEV (2023)	20
2.5.6. Volvo XC60 T8 plug-in hibrid (2025, Tayland)	20
2.5.7. Çin Shenzhen hibrit otobüs yangını (2016).....	20
2.5.8. MG HS+ hibrid (2023 ve 2024, Avustralya).....	21
2.5.9. MV Morning Midas (2025, Alaska).....	21
2.5.10. MV Fremantle Highway (2023, Kuzey Denizi).....	21
2.6. Vaka Çalışmaları ve Müdahale Örnekleri	21
2.6.1. Tesla Model S, Teksas (2021).....	21
2.6.2. Hyundai Kona EV, Kanada (2019–2022)	22
2.6.3. Jeep Wrangler 4xe, ABD (2023–2024).....	22
2.6.4. MV Fremantle Highway, kuzey denizi (2023).....	22
2.6.5. Enerji depolama sistemi (ESS), Kore (2023)	23
2.7. Söndürme Maddeleri	23
2.7.1. Kuru kimyasal tozlar (dry chemical powders)	25
2.7.2. Su ve su sisi (water and water mist)	25
2.7.3. Katkılı su çözeltileri	26
2.7.4. Gazlı söndürücüler (CO ₂ , HFC-227ea, Novec 1230).....	26
2.7.5. Sıvı azot.....	26
2.7.6. Aerosoller	26
3. LİTYUM İYON PİL YANGINI DENEYLERİ.....	29
3.1. Deney Seti ve Düzeneginin Oluşturulması.....	29
3.2. Deney Prosedürleri	31
3.3. Kapalı Alan Yangın Deneyleri	32
3.4. Açık Alan Yangın Deneyleri	33
4. DENEY SONUÇLARI.....	37
4.1. Kapalı Alan Yangın Deney Sonuçları	37
4.1.1. Tek pil yangın deneyi	37
4.1.2. Su ile müdahale deneyi	40
4.1.3. NOVEC 1230 ile müdahale deneyi	41
4.1.4. BIOVERSAL ile müdahale deneyi	43
4.1.5. Yüksek vizikoziteli sıvı söndürme (YVSS) maddesi ile müdahale deneyi	45
4.1.6. Kapalı alan deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
4.2. Açık Alan Yangın Deney Sonuçları	49
4.2.1. Benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pil deneyi (YVSS uygulamasız)	50
4.2.2. YVSS müdahalesi ile benzin ve 18650 silindirik 6 hücreli li-ion pil deneyi	53
4.2.3. YVSS müdahalesi ile benzin ve 18650 prizmatik tip pil deneyi.....	55
4.2.4. Açık alan deney sonuçlarının değerlendirilmesi	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

BMS	: Batarya Yönetim Sistemi
C₆F₁₂O	: NOVEC 1230
CO₂	: Karbondioksit
EA	: Elektrikli Araç
H₂	: Hidrojen
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
HF	: Hidrojen Florür
HRR	: Isı Salınım Hızı
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IYM	: İçten Yanmalı Motor
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
Li-MnO₂	: Lityum Mangan Dioksit
LİP	: Lityum İyon Pil
Li-SO₂	: Lityum Sülfür Dioksit
LTO	: Lityum Titanat Oksit
MHEV	: Mild Hibrit
NCA	: Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NHTSA	: Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
NMC	: Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit
PHEV	: Plug-in Hibrit
POF₃	: Fosforil Triflorür
SEI	: Katı Elektrolit Ara Yüzeyi
SOC	: Pilin Doluluk Oranı
TKK	: Termal Kontrol Kaybı
TR	: Termal Kaçak
YVSS	: Yüksek Vizkoziteli Sıvı Söndürücü



SİMGELER

%	: Yüzde
~	: Yaklaşık
±	: Sapma aralığı
°C	: Santigrat [Birim]
Ah	: Amper-saat [Birim]
cm	: Santimetre [Birim]
kW	: Kilowatt [Birim]
ppm	: Milyonda bir [Birim]
sn	: Saniye [Birim]
V	: Volt [Birim]
Vol.%	: Hacim yüzdesi [Birim]
W	: Watt [Birim]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Hibrit elektrikli araçların tarihçesi.	5
Tablo 1.2. Hibrit araç türlerinin teknik karşılaştırması.	7
Tablo 2.1. Pil formatına göre HRR değerleri.	15
Tablo 2.2. Söndürme maddelerinin avantaj ve dezavantajları.	27
Tablo 3.1. Ölçüm cihazları hata payı verileri.	31
Tablo 3.2. Deney seti kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların uygulama planı.	32
Tablo 3.3. Benzin katkılı açık alan uygulamalarına ilişkin deneysel plan.	34
Tablo 4.1. Ortam gazları (su ile müdahale).	41
Tablo 4.2. NOVEC 1230 söndürücü uygulamasına ait ortam gaz konsantrasyonları.	42
Tablo 4.3. Ortam gazları (BIOVERSAL ile müdahale).	44
Tablo 4.4. YVSS uygulamasına ait ortam gaz konsantrasyonları.	46
Tablo 4.5. Kapalı alan deney sonuçları karşılaştırma tablosu.	48
Tablo 4.6. Yüksek vizkoziteli sıvı tabanlı yangın söndürücü (YVSS) uygulamasına ilişkin sonuç farklılıkları tablosu.	58
Tablo 4.7. Yüksek vizkoziteli sıvı tabanlı yangın söndürücü (YVSS) SWOT Analizi.	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. 1896 model Armstrong Phaeton hibrit elektrikli araç [9].....	3
Şekil 1.2. Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen hibrit elektrikli araç [10].....	3
Şekil 1.3. 1997 Toyota Prius – ticari olarak başarılı ilk hibrit otomobil [11].....	4
Şekil 1.4. Tipik bir lityum-iyon pil hücresinin şematik gösterimi [21].	9
Şekil 1.5. Lityum-iyon pil geometrilerinin sınıflandırılması [21].	10
Şekil 2.1. Termal kaçak ve yangına yol açan temel koşullar [37].	16
Şekil 2.2. Araç tipine göre yangın istatistikleri [43].	19
Şekil 3.1. Deney seti.	30
Şekil 3.2. Hibrit elektrikli araçlar için deneysel düzenek.	30
Şekil 4.1. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar.	38
Şekil 4.2. Gaz salınımı ve yangın anına ilişkin görseller.....	38
Şekil 4.3. Patlama öncesi ve sonrası gaz konsantrasyonlarının zamanla değişimi. ...	39
Şekil 4.4. Deneye ait termal kamera görüntüsü ve ölçüm verileri.	39
Şekil 4.5. Batarya termal davranışı: sıcaklık eğrisi ve su ile müdahale etkisi.	40
Şekil 4.6. Su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.	41
Şekil 4.7. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (NOVEC 1230 ile müdahale).42	
Şekil 4.8. NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.	43
Şekil 4.9. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (BIOVERSAL ile müdahale). 44	
Şekil 4.10. BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.....	45
Şekil 4.11. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (YVSS ile müdahale).....	46
Şekil 4.12. Gaz salınımı, YVSS müdahalesi, yangın öncesi ve yangın.	47
Şekil 4.13. Söndürücü madde uygulaması olmadan yapılan deney: benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pilin gözlemlerinin grafiksel gösterimi.	51
Şekil 4.14. Söndürücü madde uygulaması olmadan yapılan deney: benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pil deney görselleri.	52
Şekil 4.15. Benzin ve 6 hücreli 18650 silindirik pil bloğu üzerinde yangın söndürücü müdahalesi deneyine ait görseller.	54
Şekil 4.16. Söndürücü madde uygulamalı yapılan deney: benzin ve 6 hücreli 18650 silindirik pil gözlemlerinin grafiksel gösterimi.	55
Şekil 4.17. Benzin ve prizmatik tip pil deneyinde yangın söndürücü müdahalesine ait bütünsel görseller.	56
Şekil 4.18. Benzin ve prizmatik tip pil deneyinde yangın söndürücü müdahalesine ait gözlemlerin grafiksel gösterimi.....	57



HİBRİT ARAÇLARDA MEYDANA GELEN YANGINLAR VE ETKİLİ SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Otomotiv sektöründe yaşanan teknolojik dönüşüm, hibrit elektrikli araçların (HEA – Hybrid Electric Vehicle) ve elektrikli araçların (EA – Electric Vehicle) yalnızca mühendislik açısından değil, aynı zamanda enerji politikaları ve çevresel sürdürülebilirlik bağlamında da kritik bir çözüm alanı haline geldiğini göstermektedir. 19. yüzyılın sonlarına doğru üretilen Armstrong Phaeton, tarihin bilinen ilk hibrit aracı olup içten yanmalı motor ve elektrik motorunu bir arada kullanmıştır. Modern anlamda hibrit araçlar ise 1997’de piyasaya sürülen Toyota Prius ile önemli bir dönüm noktası yaşamış, kısa sürede küresel pazarda yaygınlaşmıştır. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte yangın güvenliği konusu daha görünür hale gelmiştir. Özellikle 2000’li yılların başında Toyota Prius ve Honda Insight gibi modellerde batarya soğutma sistemlerinin yetersizliği nedeniyle küçük çaplı yangınlar rapor edilmiştir. 2012 yılında Chevrolet Volt’un batarya güvenlik açıkları gerekçe gösterilerek geri çağırılması, hibrit elektrikli araç yangınlarının endüstriyel düzeyde ciddiyetle ele alınması gerektiğini açıkça göstermektedir.

Hibrit ve elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte batarya kaynaklı geri çağırımların sayısı artmıştır. Bu geri çağırımların önemli bir kısmı batarya güvenliği ile ilişkilidir. Hücre izolasyon kusurları, Batarya Yönetim Sistemi (BMS – Battery Management System) yazılım hataları, soğutma sıvısı sızıntıları ve kablolama arızaları geri çağırımların başlıca sebepleridir. 2010–2020 yılları arasında milyonlarca hibrit ve elektrikli araç, batarya güvenlik sorunları nedeniyle geri çağırılmıştır. Bu durum, batarya teknolojisinin sunduğu avantajların yanında güvenlik risklerinin hâlâ çözülmesi gereken ciddi bir problem olduğunu ortaya koymaktadır.

Klasik içten yanmalı motorlu araçlarda (IYM – Internal Combustion Engine) yangınlar genellikle yakıt sızıntıları, elektriksel kısa devreler veya mekanik aşırı ısınma sonucu çıkmakta ve çoğunlukla dakikalar içinde birkaç yüz litre söndürücü kullanılarak kontrol altına alınabilmektedir. Buna karşın HEV’lerde lityum-iyon bataryaların kullanılmasıyla süreç daha karmaşık ve uzun süreli seyretmektedir. Lityum-iyon bataryalarda görülen termal kaçak (thermal runaway) süreci belirli aşamalardan oluşmaktadır. Yaklaşık 80–100 santigrat derecede (°C) katot yüzeyinde bulunan SEI tabakasının bozunması ve gaz çıkışlarının başlamasıyla süreç tetiklenmektedir. 120–140 °C aralığında ayırıcı tabakanın erimesi iç kısa devre riskini artırmaktadır. 150–200 °C’ye ulaşıldığında elektrolit bozunmakta, hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler (VOC – Volatile Organic Compounds) açığa çıkmaktadır. 200–250 °C aralığında Lityum Nikel Manganiz Kobalt Oksit (NMC – Nickel-Manganese-Cobalt Oxide) veya Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit (NCA – Nickel-Cobalt-Aluminum Oxide) katot yapılarından oksijen ayrışarak reaksiyonu kendi kendine beslemektedir. Bu aşamadan sonra sıcaklık hızla yükselerek 600–1000 °C seviyelerinde jet alevleri ve zincirleme hücre reaksiyonları meydana

gelmektedir. Bu mekanizma, hibrit araç yangınlarının neden dakikalar değil saatler sürebildiğini ve söndürülmelerinin neden bu kadar zor olduğunu açıklamaktadır.

İstatistiksel değerlendirmeler hibrit araçların yangın sıklığı bakımından en riskli kategori olduğunu ortaya koymaktadır. ABD’de Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) verilerine göre HEV’ler, yüz bin satış başına en yüksek yangın oranına sahiptir. Çin’de yaygın kullanılan Lityum Demir Fosfat (LFP – Lithium Iron Phosphate) bataryaları, yüksek termal kararlılıkları sayesinde daha düşük yangın riski göstermektedir. Tesla gibi üreticilerin tercih ettiği NCA hücreleri yüksek enerji yoğunluğu sağlamasına rağmen NMC gibi daha düşük kararlılık sergilemektedir. Avrupa’da yapılan araştırmalarda hibrit araç yangınlarının özellikle kapalı otoparklarda ve tünel sistemlerinde kritik güvenlik riskleri oluşturduğu vurgulanmaktadır.

Araç yangınlarında yalnızca yakıt ve bataryalar değil, aynı zamanda araç üzerinde bulunan diğer yanıcı malzemeler de yangının seyrini etkilemektedir. Koltuklarda kullanılan poliüretan köpükler, iç döşemelerdeki polipropilen ve ABS plastikler, kabloların PVC izolasyonları, lastikler ve kauçuk malzemeler yüksek miktarda yanıcı yük oluşturmaktadır. Ayrıca motor yağları, hidrolik sıvılar ve şanzıman yağları yüksek sıcaklık altında tutuşarak yangının büyümesine katkı sağlamaktadır. Gövde yapısında kullanılan magnezyum alaşımları, özellikle yüksek ısıda alevlenerek yangının şiddetini artırabilmektedir.

Bu tezde incelenen batarya hücreleri NMC kimyasıyla üretilmiştir. NMC yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle tercih edilmekle birlikte, termal kararlılığı LFP’ye göre daha düşüktür. Deneylerde kullanılan 18650 silindirik hücreler, kompakt yapıları nedeniyle ardışık termal kaçakları en iyi temsil eden formattır. Prizmatik hücreler ise geniş yüzey alanları nedeniyle harici ısıya karşı daha duyarlı olup yangın sırasında daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Deneylerde bu iki hücre tipinin birlikte incelenmesi hibrit araç yangınlarının gerçekçi biçimde modellenmesini sağlamıştır. HEV batarya paketlerinde yüzlerce hücre bulunmakta olup tipik çalışma gerilimleri 200–400 volt (V) aralığındadır. Örneğin Toyota Prius’un batarya paketi yaklaşık 201,6 V nominal gerilime, 6,5 amper-saat (Ah) kapasiteye ve 28 modül × 6 hücre konfigürasyonuna sahiptir. Yeni nesil plug-in hibritlerde (PHEV) ise batarya gerilimi 300–400 V seviyelerine, kapasite ise 8–18 kilovat-saat (kWh) aralığına çıkabilmektedir. Deneyisel çalışmada kullanılan 6 hücreli 18650 bloklar ve prizmatik hücreler, paket davranışlarını ölçekli düzeyde modellemek amacıyla tercih edilmiştir.

Deney düzeneği hibrit araç yangınlarını temsil edecek biçimde tasarlanmıştır. Açık alan deneylerinde iki litre benzin tutuşturulmuş, prizmatik ve silindirik pil bloklarının alevlere tepkileri gözlemlenmiştir. Kapalı alan deneylerinde çelik kabin kullanılmış; sıcaklık ölçümleri, gaz analiz cihazları ve gözlem pencereleri ile ayrıntılı veriler kaydedilmiştir. Söndürme deneylerinde su, NOVEC 1230, BIOVERSAL ve Yüksek Vizkoziteli Sıvı Söndürücü (YVSS – High-Viscosity Suppression Solution) karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Sonuçlar, hibrit araç yangınlarının karmaşık yapısını net biçimde ortaya koymuştur. Açık alan deneylerinde benzin alevleri bataryaların tepkilerini hızla tetiklemiş; silindirik hücrelerde ardışık termal kaçaklar zincirleme şekilde gelişmiş; prizmatik hücrelerde ise daha geç başlayan fakat daha yüksek sıcaklıklara ulaşan reaksiyonlar kaydedilmiştir. Kapalı alan deneylerinde YVSS yüksek vizkozitesi sayesinde sağladığı ısıl direnç ve tutuşma geciktirme başarısıyla en etkin söndürücü ajan olarak öne çıkmıştır. Su hızlı soğutma sağlamış ancak yeniden tutuşma riskini ortadan

kaldıramamış, BIOVERSAL çevresel avantajlarına rağmen yüksek sıcaklıklarda sınırlı kalmış, NOVEC 1230 ise düşük etkinliği nedeniyle yetersiz bulunmuştur.

Yangınlarda yalnızca alevler değil, ortaya çıkan duman ve gaz karışımları da ciddi bir risk oluşturmaktadır. Elektrolit bozunması sonucu açığa çıkan hidrojen florür (HF – Hydrogen Fluoride), karbon monoksit (CO), hidrojen (H₂), VOC’ler ve metal oksit parçacıkları, yangın ortamını hem zehirleyici hem de patlayıcı hale getirmiştir. Hibrit araçlarda yakıt yanma ürünleri de bu tabloya eklenerek toksisiteyi artırmaktadır. Söndürme sonrası kullanılan binlerce litre su ve kimyasal söndürücüler de çevresel açıdan tehlikeli atığa dönüşmektedir. Elektrolit kalıntıları, ağır metaller ve organik solventler suya karışarak hem insan sağlığı hem de ekosistemler için uzun vadeli riskler oluşturmaktadır.

Sonuç olarak bu tez, hibrit araç yangınlarını tarihsel bağlamından deneysel analizlerine kadar geniş bir çerçevede ele almış, literatüre özgün katkılar sunmuştur. Bulgular hibrit araç yangınlarının yalnızca batarya kaynaklı değil, yakıt ve araç üzerindeki diğer yanıcı malzemelerin etkileşimiyle gelişen çok boyutlu bir süreç olduğunu göstermiştir. Söndürme ajanlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi, özellikle YVSS’nin yüksek ısı direnç ve tutuşma geciktirme başarısı ile gelecekte hibrit araç yangınlarının yönetiminde umut verici bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, mühendislik tasarımları, acil müdahale stratejileri, çevresel yönetim ve politika geliştirme açısından yol gösterici nitelikte olup hibrit araçların güvenli ve sürdürülebilir ulaşım vizyonuna katkı sağlayacak bilimsel bir çerçeve sunmaktadır.



AN INVESTIGATION INTO FIRES IN HYBRID VEHICLES AND THE ASSESSMENT OF EFFECTIVE FIRE SUPPRESSION SYSTEMS

SUMMARY

The technological transformation in the automotive sector has highlighted Hybrid Electric Vehicles (HEVs – Hybrid Electric Vehicles) and Battery Electric Vehicles (BEVs – Battery Electric Vehicles) not only as engineering achievements but also as critical components of global energy policies and environmental sustainability. The Armstrong Phaeton, produced in the late nineteenth century, is recognized as the first hybrid vehicle, integrating an Internal Combustion Engine (ICE – Internal Combustion Engine) with an electric motor. Modern hybrid vehicles emerged with the market introduction of the Toyota Prius in 1997, which represented a significant turning point and accelerated the widespread adoption of hybrid technologies. However, alongside this technological progress, the issue of fire safety became increasingly visible. In the early 2000s, incidents of small-scale battery fires were reported in models such as the Toyota Prius and Honda Insight due to insufficient cooling systems. In 2012, the Chevrolet Volt was recalled over battery safety concerns, clearly indicating that hybrid vehicle fires had become a serious industrial and regulatory issue.

With the expansion of hybrid and electric vehicles, the number of battery-related recalls has increased substantially. Most of these recalls were directly related to safety issues such as insulation failures, malfunctions in the Battery Management System (BMS – Battery Management System), coolant leakage, and wiring faults. Between 2010 and 2020, millions of hybrid and electric vehicles were recalled worldwide because of fire-related risks. This reveals that, while battery technologies provide considerable advantages in terms of energy density and performance, they still present significant safety challenges that must be resolved.

In conventional ICE vehicles, fires typically originate from fuel leaks, electrical short circuits, or overheating of mechanical components and are often brought under control within minutes using relatively small quantities of suppression agents. In contrast, HEVs that rely on high-voltage lithium-ion batteries exhibit much more complex and long-lasting fire behavior. The key mechanism responsible for this is thermal runaway, which unfolds through distinct stages and leads to uncontrolled temperature escalation and chain reactions. The process begins with the decomposition of the Solid Electrolyte Interphase (SEI) layer and gas release, followed by separator degradation, electrolyte decomposition, and finally the liberation of oxygen from cathode materials such as Nickel-Manganese-Cobalt oxide (NMC – Nickel-Manganese-Cobalt Oxide) or Nickel-Cobalt-Aluminum oxide (NCA – Nickel-Cobalt-Aluminum Oxide). These reactions can sustain themselves and escalate to very high temperatures, generating jet flames and propagating to adjacent cells. As a result, hybrid vehicle fires may last for hours and require extraordinary suppression efforts.

Statistical analyses confirm that HEVs present the highest fire risk among vehicle categories. Data from the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration) in the United States indicate that

HEVs experience more fire incidents per 100,000 sales compared to BEVs and ICE vehicles. In China, the prevalence of Lithium Iron Phosphate (LFP – Lithium Iron Phosphate) batteries has contributed to a relatively lower frequency of fires due to their greater thermal stability. Conversely, manufacturers such as Tesla employ NCA batteries to achieve higher energy density, though these chemistries offer narrower safety margins compared to LFP. European studies highlight the particular risk posed by HEV fires in confined infrastructures such as underground car parks and tunnels, where toxic smoke and re-ignition events create severe challenges for emergency response.

Hybrid vehicle fires are not limited to batteries and fuel; other flammable components also play a significant role. Seat cushions made of polyurethane foam, plastic and polymeric materials such as polypropylene and ABS, wiring with PVC insulation, tires, rubber elements, engine oils, hydraulic fluids, and transmission fluids all contribute to fire intensity. Lightweight materials like magnesium alloys, often used for weight reduction, can ignite under extreme heat and amplify fire spread. Thus, hybrid vehicle fires represent a multidimensional hazard rather than a battery-only phenomenon.

In this study, NMC-based cylindrical (18650 format) and prismatic lithium-ion cells were examined. NMC cells were selected because they combine high energy density with relatively lower thermal stability compared to LFP. The 18650 cylindrical cells are particularly suitable for modeling cascading thermal runaway in compact, series-connected formats, while prismatic cells better reflect the large surface-area exposure typical of automotive modules. The combination of these two cell formats provided a more realistic representation of hybrid battery packs. Full HEV battery packs often contain hundreds of cells with operating voltages between 200–400 volts (V – volt), whereas Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) typically employ larger capacities in the range of 8–18 kilowatt-hours (kWh – kilowatt-hour).

The experimental setup was carefully designed to replicate the conditions of hybrid vehicle fires. In open-area trials, gasoline flames were introduced to simulate combined fuel-battery fire scenarios, while in closed-chamber experiments, a reinforced steel enclosure was used to monitor battery responses under controlled conditions. Key measurements included thermal response, flame development, and gas release. Comparative suppression experiments were carried out with water, NOVEC 1230, BIOVERSAL, and a High-Viscosity Suppression Solution (YVSS – High-Viscosity Suppression Solution).

The experimental findings revealed that open-air tests rapidly triggered battery involvement, with cylindrical cells displaying sequential thermal runaway while prismatic cells exhibited delayed but more intense thermal responses. In closed-chamber scenarios, YVSS demonstrated superior performance, delaying ignition and preventing re-ignition through its viscous adherence, which limited oxygen transport and vapor release. Water provided fast cooling but was insufficient in preventing re-ignition; BIOVERSAL had ecological advantages but limited performance under sustained heating; and NOVEC 1230 showed low effectiveness in hybrid fire scenarios.

In addition to the direct suppression challenges, the study also emphasizes the toxic and environmental hazards associated with HEV fires. The breakdown of electrolytes generates hazardous products such as hydrogen fluoride (HF – Hydrogen Fluoride), carbon monoxide (CO), hydrogen (H₂), volatile organic compounds (VOC – Volatile

Organic Compounds), and fine metal oxides. When combined with the products of gasoline combustion, the toxicity of the smoke and gases increases substantially. Moreover, thousands of liters of suppression agents—if not properly managed—may lead to contaminated runoff containing heavy metals, solvents, and fluorinated compounds, with long-term risks for soil, groundwater, and ecosystems.

What distinguishes this dissertation from earlier research is its dual experimental framework. By combining open-air scenarios, where the interaction of gasoline flames with battery modules was observed, and closed-chamber trials, which allowed controlled analysis of thermal runaway and suppression behavior, the study bridges laboratory conditions with real-world fire dynamics. The simultaneous use of both cylindrical and prismatic NMC cells provides a methodological novelty, as it more accurately represents the diversity of cells integrated into HEV battery packs. This dual-cell approach not only enhanced the validity of the findings but also created a foundation for future scaling studies on full battery packs.

Beyond its experimental contributions, the research offers forward-looking recommendations. Engineering strategies such as improved module spacing, advanced cooling systems, and fire-resistant enclosure materials are discussed as potential ways to mitigate fire risks. Furthermore, the study emphasizes the importance of training for emergency response teams, who must adapt suppression tactics to the unique challenges of HEV and BEV fires. Finally, the results provide evidence that may inform the refinement of international standards and regulatory frameworks, including NFPA guidelines and European TS EN norms, ensuring that hybrid vehicles can be safely integrated into the transport systems of the future.

In conclusion, this dissertation provides an original and comprehensive analysis of hybrid vehicle fires, combining historical background, literature review, experimental research, and comparative evaluation of suppression methods. The findings demonstrate that HEV fires are multidimensional events fueled not only by high-voltage lithium-ion batteries but also by fuel and various flammable vehicle components. Among the suppression agents tested, YVSS exhibited the highest potential for enhancing fire safety. These findings contribute significantly to the academic literature and also provide practical insights for engineering design, emergency response planning, environmental management, and policy-making. The work ultimately highlights the need for integrated strategies to ensure the safe and sustainable integration of hybrid vehicles into modern transportation systems..



1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ölçekte artan çevresel kaygılar, enerji verimliliği gereklilikleri ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik uluslararası politikalar, otomotiv sektöründe hibrit elektrikli araç (HEA) teknolojilerine olan ilgiyi belirgin biçimde artırmıştır. Hibrit sistemler, içten yanmalı motor (İYM) ile elektrik motorunun entegrasyonu sayesinde fosil yakıt tüketimini azaltmakta ve sera gazı salımlarında kayda değer düşüş sağlamaktadır [1,2]. Bununla birlikte, hibrit araçlardaki bu teknolojik dönüşüm yalnızca çevresel kazanımlar sunmakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yangın güvenliği, batarya termal davranışları ve yüksek gerilimli elektrik bileşenleri nedeniyle karmaşık ve çok boyutlu risk profilleri ortaya çıkarmaktadır [3].

Özellikle lityum-iyon batarya sistemlerinin hibrit araçlarda yaygın biçimde kullanılmaya başlanması, yangın güvenliği açısından kritik bir tartışma alanı yaratmıştır. Lityum-iyon bataryalar, yüksek özgül enerji, kompakt tasarım ve uzun döngü ömrü gibi avantajları nedeniyle tercih edilmekte; ancak termal kaçak (thermal runaway) olarak adlandırılan zincirleme ısıl reaksiyonlara karşı yüksek hassasiyet göstermektedir [4]. Termal kaçak sürecinde, tek bir hücrede başlayan ısı artışı hızla komşu hücrelere aktarılmakta; bu durum batarya paketi genelinde ani sıcaklık yükselmesi, basınç artışı, toksik gaz salınımı ve nihayetinde yangın riskine yol açmaktadır [4].

Konvansiyonel içten yanmalı motor yangınlarıyla kıyaslandığında, batarya kaynaklı hibrit araç yangınları çok daha hızlı başlamakta, daha yüksek sıcaklıklara ulaşmakta ve müdahale süreleri uzamaktadır. Örneğin, yapılan tam ölçekli deneysel çalışmalar hibrit ve elektrikli araç yangınlarında sıcaklıkların 843 °C'ye kadar yükselebildiğini göstermektedir [5]. Bu bağlamda yangın dinamikleri, hem mühendislik hem de güvenlik açısından yeniden tanımlanmak zorundadır.

Batarya yangınlarının yanı sıra hibrit araçlarda bulunan geleneksel yakıt sistemleri, ilave bir yangın riski oluşturmaktadır. Bu iki farklı enerji sisteminin aynı taşıtta bulunması, çok modlu yangın senaryoları ve çift kaynaklı enerji salımı gibi etkileşimli risk yapılarını beraberinde getirmektedir [2]. Yangına müdahale sırasında batarya

modüllerinin kapalı konumda bulunması, fiziksel erişimi kısıtlamakta; bu durum soğutma performansını düşürmekte ve yeniden tutuşma ihtimalini artırmaktadır. Literatürde, bu tür yangınların söndürülmesi için yoğun miktarda su kullanıldığı, ancak batarya sisteminin tamamen soğutulmasının çoğu zaman mümkün olmadığı vurgulanmaktadır [6].

Tünel, kapalı otopark ve dar sokak gibi erişimi kısıtlı ortamlarda meydana gelen hibrit araç yangınları, yalnızca araç güvenliği açısından değil, kamu sağlığı ve müdahale ekiplerinin güvenliği açısından da hayati riskler taşımaktadır. Bu tür senaryolarda erken uyarı sistemleri, hücre izolasyon teknolojileri, termal koruma malzemeleri ve batarya yönetim sistemleri (BMS) gibi çok katmanlı yaklaşımlar zorunlu hale gelmektedir [6]. Nitekim yayımlanan güncel çalışmalar da, hibrit ve elektrikli araçlardaki batarya sistemlerinin yangın riskleri bağlamında analiz edilmesi gerektiğini; özellikle termal kaçak sürecinin deneysel ve simülasyon temelli yöntemlerle detaylandırılmasının kritik önemde olduğunu vurgulamaktadır [7]. Bu tez çalışması, hibrit araçlardaki batarya yangınlarının nedenlerini, fiziksel ve kimyasal mekanizmalarını ve yangın dinamiklerini disiplinlerarası bir yaklaşımla incelemeyi hedeflemektedir. Aynı zamanda geleneksel içten yanmalı araç yangınları ile karşılaştırmalı analiz sunarak, hibrit araç güvenliği literatürüne hem teorik hem uygulamalı katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1.1. Hibrit Elektrikli Araçların Tarihçesi

Hibrit elektrikli araçlar (HEA), taşıtlarda enerji verimliliğini artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve fosil yakıtlara bağımlılığı düşürmek amacıyla geliştirilen, içten yanmalı motor (İYM) ile elektrik motorunu birleştiren ileri tahrik sistemleridir. Bu araçların tarihsel gelişimi, yalnızca teknolojik evrimi değil, aynı zamanda enerji krizleri, çevre politikaları ve sürdürülebilirlik hedeflerinin bir bütünüdür. Günümüzde yaygın olarak kullanılan hibrit elektrikli araçların arkasında yaklaşık 130 yıllık bir mühendislik ve inovasyon geçmişi bulunmaktadır. Hibrit elektrikli araçların tarihsel gelişimi, yalnızca mühendislik inovasyonları ile değil; enerji politikaları, çevresel düzenlemeler, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar ve tüketici taleplerindeki değişimlerle de şekillenmiştir. Bu süreç beş ana döneme ayrılabilir:

1.1.1. İlk gelişim dönemi (1890–1930)

Hibrit konsepti, 19. yüzyılın sonlarında, elektriğin yeni bir enerji kaynağı olarak ulaşımına entegre edilmeye başlanmasıyla doğmuştur. 1896'da Armstrong Company tarafından üretilen Şekil 1.1'de görülen Armstrong Phaeton, benzinli motor ve elektrikli dinamo-volan kombinasyonu ile tarihin bilinen ilk hibrit otomobili olmuştur [8]. Bu sistem, motoru çalıştırmak, aydınlatma ve ateşlemeyi beslemek için enerji sağlamış ve Cadillac'ın marş motoru buluşundan yaklaşık 16 yıl önce uygulanmıştır.



Şekil 1.1. 1896 model Armstrong Phaeton hibrit elektrikli araç [9].

1900'lerin başında Fransa ve Almanya'da hibrit prototipler geliştirilmiştir. Şekil 1.2'de görülen Ferdinand Porsche'nin Lohner-Porsche Mixte Wagen (1903) modeli, benzinli motorun bataryaları şarj ettiği ve enerjiyi elektrik motoruna aktardığı ilk başarılı seri hibrit sistemlerden birini ortaya koymuştur [8].



Şekil 1.2. Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen hibrit elektrikli araç [10].

1.1.2. Elektrikli araçlardan hibritlere geçiş (1930–1960)

1916'da Woods Motor Vehicle Company, benzinli motor ve elektrik motorunun kombinasyonunu kullanarak ilk seri üretim hibrit modelini geliştirmiştir. Bu sistem, paralel hibrit mimarisinin erken bir örneği olarak kabul edilmektedir. Ancak 1920'lerin ortalarından itibaren petrolün ucuzlaması ve seri üretim bandı sayesinde içten yanmalı motorların ekonomik üstünlüğü, hibrit konseptin yaklaşık 40 yıl boyunca geri planda kalmasına yol açmıştır [8].

1.1.3. Yeniden ilgi ve petrol krizleri (1960–1980)

1960'ların artan hava kirliliği, kentleşme ve fosil yakıt bağımlılığı hibrit araçlara yönelik ilgiyi yeniden gündeme taşımıştır. 1967'de tanıtılan Ford Comuta, dört kurşun-asit batarya ile 64 km menzil sunarak şehir içi ulaşım için tasarlanmıştır. 1970'lerin başında yaşanan petrol krizleri, hibrit ve elektrikli araç projelerine ivme kazandırmıştır. 1973'te Electricité de France elektrikli dönüşüm projeleri yürütürken, Japonya'da Toyota ve Mitsubishi hibrit Ar-Ge programlarına başlamış, Almanya'da Daimler-Benz ve Volkswagen devlet destekli hibrit projeler geliştirmiştir [8].

1.1.4. Modern hibritlere geçiş (1980–2000)

1980'li yıllarda batarya ve invertör teknolojilerinde yaşanan gelişmeler hibritleri teknik açıdan uygulanabilir hale getirmiştir. ABD Enerji Bakanlığı destekli Ford/GE ETX-1 (1988) prototipi, AC indüksiyon motoru ve 160 km menziliyle dönemin en ileri hibrit sistemlerinden biri olmuştur. 1997'de piyasaya çıkan Toyota Prius (Şekil 1.3), seri üretim hibrit araçların küresel ölçekte ilk ticari başarısını temsil etmiş ve hibritlerin otomotiv endüstrisinde kalıcı yer edinmesini sağlamıştır [8].



Şekil 1.3. 1997 Toyota Prius – ticari olarak başarılı ilk hibrit otomobil [11].

1.1.5. Günümüz ve gelecek perspektifleri (2000–2025)

2000'lerden itibaren hibrit araçlar yalnızca Japonya'da değil, ABD ve Avrupa pazarlarında da hızla yaygınlaşmıştır. IEA verilerine göre 2020 itibariyle dünya genelinde 17 milyondan fazla hibrit araç satışı gerçekleşmiştir [1]. Günümüzde hibritler; plug-in hibrit (PHEV), mild hibrit (MHEV) ve tam hibrit (HEV) çeşitleriyle daha geniş ürün gamına sahiptir. Lityum-iyon batarya sistemleri enerji yoğunluğunu artırmış, maliyetleri düşürmüş ve Euro-6/EPA Tier-3 emisyon standartlarının karşılanmasına katkı sağlamıştır [8]. Hibrit elektrikli araçların tarihçesi Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Hibrit elektrikli araçların tarihçesi.

Dönem	Araç / Prototip	Ülke	Özellik	Önemi
1896	Armstrong Phaeton	ABD	Benzinli motor + elektrikli dinamo	İlk hibrit otomobil
1903	Lohner-Porsche Mixte	Almanya	Seri hibrit (İYM batarya şarjı)	İlk başarılı hibrit prototip
1916	Woods Dual Power	ABD	Seri üretim hibrit	Paralel hibritin öncüsü
1967	Ford Comuta	ABD	Kurşun-asit batarya, 64 km menzil	Şehir aracı konsepti
1973	Kriz sonrası prototipler	Fransa, Almanya, Japonya	Devlet destekli hibrit projeler	Petrol krizinin etkisi
1988	Ford/GE ETX-1	ABD	AC motor, 160 km menzil	Modern hibritlere geçiş
1997	Toyota Prius	Japonya	Seri üretim hibrit	Ticari başarı, küresel pazarın başlangıcı

1.2. Hibrit Elektrikli Araç Türleri ve Donanımları

Hibrit elektrikli araçlar (HEA), iki veya daha fazla enerji kaynağını aynı anda kullanan taşıtlardır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'na (IEC) göre hibrit araç, en az bir enerji kaynağı elektrik olan, farklı enerji depolama sistemlerinin birlikte çalıştığı taşıt olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde hibritler yalnızca motor mimarileri açısından

değil, aynı zamanda enerji depolama çözümleri, batarya teknolojileri ve güç elektroniği donanımları bakımından da farklı sınıflara ayrılmaktadır [12].

Hibrit elektrikli araçlarda enerji dönüşüm altyapısı; depolama birimi, güç üretim modülü ve tahrik sistemi olmak üzere üç temel unsurdan meydana gelmektedir. Depolama tarafında en yaygın çözüm bataryalar olsa da, yüksek güç yoğunluğuna sahip süper kapasitörler ile kinetik enerjiyi dönüştürme prensibiyle çalışan volan sistemleri de giderek daha fazla araştırılmaktadır. Batarya sistemlerinin üstünlüğü günümüzde devam etmekle birlikte, alternatif depolama teknolojilerinin hibrit uygulamalardaki performans potansiyeli özellikle son yıllarda bilimsel çalışmaların odak noktasına girmiştir. Güç ünitesi açısından yalnızca geleneksel Otto ve dizel motorları değil; gaz türbinleri ile yakıt pilleri de hibrit mimarilere entegre edilebilmektedir. Tahrik mekanizması bağlamında ise farklı konfigürasyonlar bulunmaktadır: seri hibrit sistemlerde araç hareketi bütünüyle elektrik motorundan sağlanırken, paralel hibrit düzeneklerde içten yanmalı motor doğrudan mekanik katkı sunarak elektrik motoruyla birlikte çekiş görevini paylaşmaktadır [12].

1.2.1. Mikro hibrit araçlar (start–stop)

Mikro hibrit sistemlerde elektrik motoru doğrudan tahrik sağlamaz, yalnızca start–stop işlevi görür. Araç durduğunda motoru kapatarak ve kalkışta devreye girerek şehir içi trafikte yakıt tüketiminde %5–10 oranında azalma sağlar [13]. Ayrıca klima, aydınlatma ve multimedya gibi aksesuar yükleri elektrik motoru ve küçük kapasiteli batarya tarafından karşılanır.

1.2.2. Yarı hibrit araçlar (Mild Hybrid, MHEV)

MHEV sistemler, genellikle 48 V lityum-iyon batarya ile çalışır. İYM’a ek tork sağlayarak yakıt tüketiminde %10–15 iyileşme sunar. Ayrıca rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanılır. Avrupa’da özellikle Euro-6 emisyon standartlarını karşılamak için yaygın olarak tercih edilmektedir [14].

1.2.3. Tam hibrit araçlar (Full Hybrid, HEV)

HEV sistemlerde elektrik motoru tek başına aracı sürebilir. Seri hibrit mimaride İYM sadece jeneratör görevi görürken; paralel hibrit mimaride hem İYM hem elektrik motoru tahrik sistemine güç verebilir. Seri-paralel hibrit ise her iki mimarinin avantajlarını bir arada sunar ve günümüzde en gelişmiş konfigürasyonlardan biridir .

1.2.4. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV)

PHEV’ler, dışarıdan şarj edilebilen batarya sistemleri sayesinde 30–80 km arasında saf elektrikli sürüş menzili sunar. Bu sayede şehir içi kullanımlarda tamamen elektrikli modda çalışabilmektedir [15]. Ancak batarya maliyetleri ve şarj altyapısı, PHEV’lerin yaygınlaşmasında kısıtlayıcı unsurlardır. Tablo 1.2’de Hibrit Araç Türlerinin Teknik Karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 1.2. Hibrit araç türlerinin teknik karşılaştırması.

Tür	Enerji Kaynağı	Elektrikli Sürüş	Yakıt Tasarrufu	Avantaj	Dezavantaj
Mikro Hibrit	İYM + küçük batarya	Yok	%5–10	Düşük maliyet, kolay uygulama	Elektrikli sürüş yok
Yarı Hibrit (MHEV)	İYM + 48V batarya	Yok	%10–15	Euro-6 uyumu, enerji geri kazanımı	Elektrikli sürüş yok
Tam Hibrit (HEV)	İYM + güçlü batarya	Var	%20–35	Elektrikli mod, düşük emisyon	Karmaşık, maliyet yüksek
Plug-in Hibrit (PHEV)	İYM + şarj edilebilir batarya	30–80 km	%40’a kadar	EV modunda kullanım, düşük emisyon	Yüksek maliyet, şarj altyapısı

1.2.5. Donanım bileşenleri

1.2.5.1. Enerji depolama sistemleri

Bataryalar: İlk nesil hibritlerde nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar yaygınken, günümüzde daha yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle lityum-iyon bataryalar tercih edilmektedir [16].

Süper Kapasitörler: Yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj avantajıyla özellikle otobüs hibritlerinde kullanılmaktadır [17].

Yakıt Hücreleri: Bazı hibrit konfigürasyonlarda hidrojen yakıt hücreleri batarya ile birlikte entegre edilmektedir.

1.2.5.2. Güç üniteleri

İYM olarak otto ve dizel motorlar kullanılır. Son yıllarda küçük hacimli turbo motorlar, hibrit verimliliğini artırmak için tercih edilmektedir [18].

1.2.5.3. Elektrik motorları

Hibritlerde en yaygın kullanılan motor tipleri AC indüksiyon motorları ve daimi mıknatıslı senkron motorlardır (PMSM). PMSM motorları, yüksek verim ve tork yoğunluğu nedeniyle özellikle binek hibrit araçlarda tercih edilmektedir [19].

1.2.5.4. Güç elektroniği

İnvertörler: Bataryadan gelen DC akımı AC'ye çevirerek elektrik motorunu sürer.

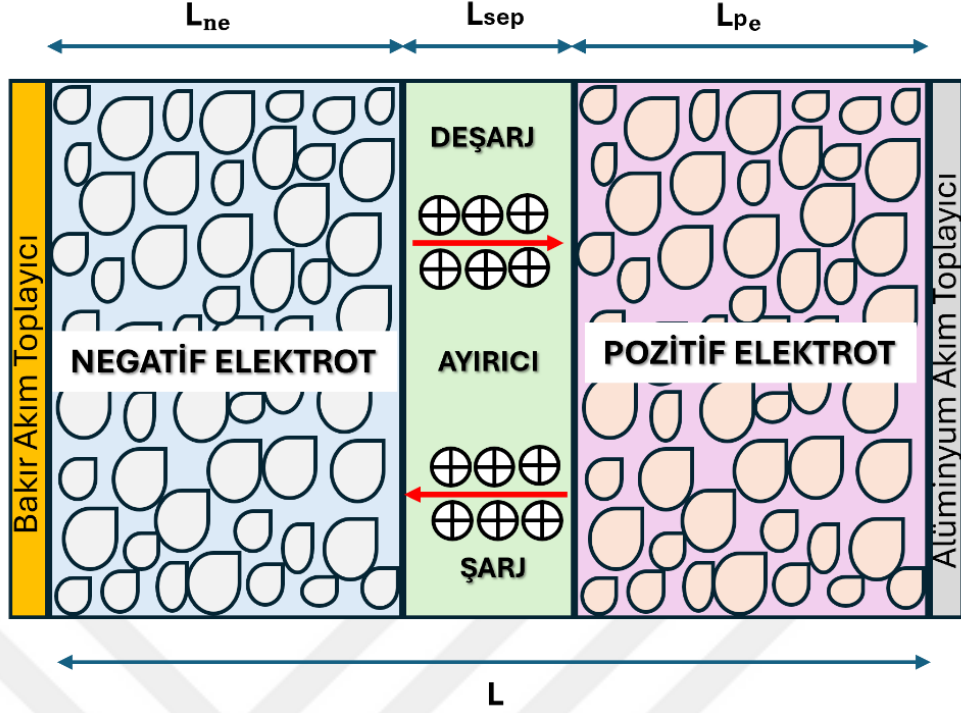
DC/DC dönüştürücüler: Yüksek voltajlı batarya ile araçtaki düşük voltajlı sistemler arasında enerji yönetimini sağlar.

1.2.5.5. Batarya yönetim sistemleri

BMS, bataryaların güvenliğini sağlayan en kritik bileşendir. Hücreler arası dengeleme, sıcaklık izleme, aşırı şarj/deşarj önleme ve yangın riskini azaltıcı güvenlik stratejileri BMS'in temel işlevleri arasındadır [20].

1.3. Lityum Pillerin Çalışma Prensipleri

Lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar; pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), iyon geçişine izin veren ayırıcı, iyon iletimini sağlayan elektrolit, her iki elektrotla bağlantılı akım toplayıcılar ve tüm bileşenleri kapsayan bir muhafaza yapısından oluşmaktadır [21]. Bu yapı, elektrokimyasal enerji dönüşümünün güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleşmesi için kritik öneme sahiptir. Tipik bir lityum-iyon pil hücresinin şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir.

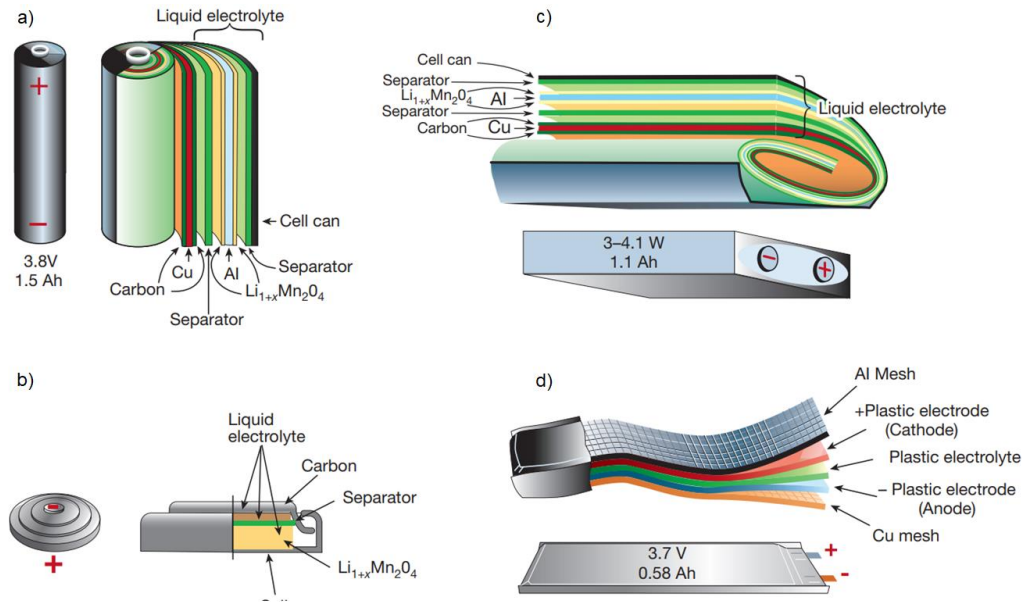


Şekil 1.4. Tipik bir lityum-iyon pil hücresinin şematik gösterimi [21].

Elektrolit çoğunlukla sıvı fazda bulunur ve elektrotların gözenekli yapısını doldurarak iyonların hareketini mümkün kılar. Elektrotlarda farklı boyutlarda aktif parçacıklar yer alır; bu parçacıklar lityum iyonlarının difüzyonuna elverişli bir mikro yapı sunar. Şarj sürecinde lityum iyonları katottan ayrılarak elektrolit aracılığıyla anoda göç eder. Ayırıcı, yalnızca iyonların geçişine izin veren yarı geçirgen bir zar işlevi görürken, elektronların geçişini engelleyerek kısa devreyi önler [21].

Elektronlar, yalnızca harici devre üzerinden hareket edebilir. Katottan ayrılan elektronlar, akım toplayıcı aracılığıyla harici devreye aktarılır ve anot tarafına ulaşarak elektrik akımı oluşturur. Deşarj esnasında bu süreç tersine döner; iyonlar anottan katoda göç ederken, elektronlar da harici devre üzerinden aynı yönde ilerleyerek elektrik enerjisi üretimini sağlar [21].

Li-iyon hücreleri, kullanım alanlarının enerji yoğunluğu, güç ihtiyacı ve paketleme verimliliği gibi gereksinimlerine bağlı olarak farklı geometrilere üretilmektedir. Şekil 1.5'te görüldüğü üzere dört temel tip öne çıkmaktadır: silindirik, düğme (coin cell), prizmatik ve kese (pouch) hücreler [21].



Şekil 1.5. Lityum-iyon pil geometrilerinin sınıflandırılması [21].

1.3.1. Silindirik hücreler

Spiral sarım tekniğiyle üretilen bu tip hücreler, yüksek enerji yoğunluğu, düşük üretim maliyeti ve dayanıklılıkları ile öne çıkmaktadır. Boyutlandırma beş haneli bir kodla ifade edilir; ilk iki hane çapı, son üç hane uzunluğu belirtir. Örneğin 18650, 26650 ve 21700 tipleri yalnızca taşınabilir elektroniklerde değil, dizüstü bilgisayarlardan hibrit ve elektrikli araçlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [21].

1.3.2. Düğme tipi (coin cell) hücreler

Küçük boyutları nedeniyle düşük güçlü sistemlerde tercih edilir. Özellikle tıbbi implantlar, biyosensörler, saatler, otomotiv uzaktan kumanda cihazları ve benzeri uygulamalarda yaygındır [22]. Sınırlı güç kapasiteleri olmasına rağmen, kompakt yapıları sayesinde kritik niş uygulamalara çözüm sunarlar.

1.3.3. Prizmatik hücreler

Yassı ve kompakt tasarımları, paketleme verimliliğini artırır. Bu nedenle taşınabilir elektronik cihazlarda ve elektrikli araç batarya modüllerinde sıkça kullanılır. Yüksek enerji yoğunluğu sağlamaları avantaj olmakla birlikte, mekanik stabilite açısından özel tasarımlar gerektirir [23].

1.3.4. Kese tipi (pouch cell) hücreler

Esnek ve hafif yapıları sayesinde yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Ancak mekanik dayanımları düşük olduğundan ilave koruyucu muhafazalara ihtiyaç duyarlar.

Elektrikli ve hibrit araçlarda giderek daha fazla tercih edilen bu tip, termal yönetim kolaylığı açısından da avantajlıdır [24].

Bu geometrik çeşitlilik yalnızca hücrelerin fiziksel formunu değil; aynı zamanda termal davranışlarını, güvenlik stratejilerini, paketleme yoğunluğunu ve uygulama alanlarını da belirlemektedir.





2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ YANGINLARI

2.1. Hibrit Araç Yangınları Literatür Taraması

Hibrit elektrikli araçlarda (HEA) yangın güvenliği literatürü, son yıllarda üç eksenle yoğunlaşmaktadır: (i) batarya kaynaklı başlatıcılar ve termal kaçak dinamikleri, (ii) paket içi yayılım ve ısı açığa çıkış hızının (HRR) araç ölçeğine yansımaları, (iii) tespit–bastırma–yeniden tutuşma risk yönetimi. Bu çerçevede, hibritlerin hem yüksek gerilim batarya hem de klasik yakıt sistemi barındırmasından doğan “çift kaynaklı” tehlikeyi mühendislik bakışıyla bütünleştirir.

2.1.1. Başlatıcılar ve termal kaçak

HEA’larda birincil tetikleyiciler; mekanik hasar (çarpışma/çukur darbeleri), aşırı şarj veya dengesiz hücre, dış ısı maruziyeti ve üretim kusurları olarak raporlanmaktadır. Bu tetikleyiciler, elektrot/ayırıcı bütünlüğünü bozarak ekzotermik yan reaksiyonları hızlandırır; hücre içi sıcaklık yükselişiyle birlikte elektrolitin buharlaşması ve gaz oluşumu başlar. İncelemeler, hücre → modül → paket ölçeğinde artan ısı geri beslemesi ile kaçak sürecinin komşu hücrelere kısa sürede sıçrayabildiğini göstermektedir. Hibrit mimaride paket boyutları BEV’lere göre görece küçük olsa da, termal kaçak eşiği ve zincirleme reaksiyon mekanizmaları hücre kimyasına ve geometrisine duyarlılığını korur [25–30].

2.1.2. Yayılım, HRR ve araç ölçeği

Modül/paket çalışmalarında kaydedilen ısı yayılım hızı ve gaz deşarjı, aracın gövde içindeki yerleşim ve ısı tahliye yolları ile birlikte değerlendirildiğinde HEA yangınlarının başlama hızı ve zirve sıcaklıklarını belirgin biçimde etkiler. Tam ölçekli ve yarı ölçekli deneyler, hibrit/elektrikli araçlarda HRR eğrilerinin erken fazda daha keskin yükselme gösterebildiğini; klasik ICE araçlara kıyasla duman/gaz toksisite profilinin farklılaştığını rapor eder [26, 29, 31]. Bununla beraber hibritlerde sıvı yakıt varlığı, batarya dışında ikinci bir tutuşma kaynağı ve karmaşık senaryolar (batarya yangını + yakıt havuzu yangını) oluşturur; bu durum olayın bastırma süresini uzatabilir [31].

2.1.3. Tespit ve bastırma stratejileri

Literatür, erken evrede hücre/alt-modül düzeyinde sıcaklık ve gerilim anormalliklerinin izlenmesini, BMS tabanlı erken uyarı ve izolasyon fonksiyonlarını, kabin/döşeme altı alanlar için gaz/sıcaklık algılama sensör füzyonunu öne çıkarır [27, 28]. Bastırmada ise yaygın yaklaşım, paket içine nüfuz eden yüksek debili su soğutma ve ısıl yönetimin sürekli sürdürülmesi; çünkü paket içinde gizli ısı cepleri sönmeye sonrası yeniden tutuşma riskini artırır [32]. Araştırmalar, kimyasal bastırıcıların (ör. aerosol, kuru toz) sıcak noktaları düşürmede sınırlı; su soğutmanın ise ısı taşıma/ısı emme kapasitesi nedeniyle daha etkili olduğunu, fakat pakete erişim ve akış yolları sağlanmadıkça kalıcı soğutmanın zorlaştığını vurgular [25, 32]. Kapalı alanlar (tünel, yeraltı otoparkı) için çalışmalar, duman kontrolü ve ısı boşaltımının gecikmesinin müdahale zaman penceresini daralttığını; HEA/BEV özel risk işaretlemesinin ve çekme–izolasyon protokollerinin zorunlu olduğunu ortaya koyar [25].

2.1.4. Modelleme ve sayısal tahmin

Hücre düzeyinde ısı üretimi–iletimi–faz değişimi süreçleri ile gaz oluşumunun eşlenik simülasyonları, kaçak eşiği, kritik sıcaklık ve yayılım hızı parametrelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır [29, 30]. Paket düzeyinde CFD tabanlı yaklaşımlar, soğutma sıvısı debisi, nozul yerleşimi ve paket içi ısı köprülerinin bastırma başarımına etkisini nicel hale getirir. Risk analizinde ise hata ağacı (FTA) ve olay ağaçları, tetikleyici–önlem kombinasyonlarının olasılıklarını değerlendirmek üzere sıkça kullanılmaktadır [33].

2.1.5. BMS ve güvenlik mimarileri

Güncel yayınlar, çok katmanlı güvenlik konsepti (hücre seviyesinde güvenli kimya/separatör, modül seviyesinde termal bariyerler, paket seviyesinde vent yönlendirme, araç seviyesinde erken tespit ve izolasyon) ile BMS yazılım mantığının (SOH/SOC tahmini, anomali tespiti, kaçak öncesi azaltım) birlikte tasarlanmasını önermektedir [27, 28]. Bu yaklaşım hibritlerde, yüksek gerilim sistemleri ile yakıt sistemleri arasındaki elektriksel–termal–mekanik etkileşimleri de hesaba katarak güvenlik marjını artırır.

2.1.6. Açık sorunlar ve araştırma eğilimleri

(i) Paket içine doğrudan nüfuz edebilen bastırma çözümleri (delici lanslar, entegre soğutma kanalları), (ii) yeniden tutuşma olasılığını güvenilir şekilde düşüren soğutma–

dengeleme stratejileri, (iii) kapalı alan senaryoları için yangın–duman yönetimi ve tahliye algoritmaları, (iv) PHEV özelinde batarya–yakıt etkileşiminin nicelleştirilmesi, (v) gerçek dünya kaza verileri ile model kalibrasyonu, literatürde öncelikli başlıklar olarak öne çıkmaktadır [25, 31, 33]. Buna paralel, standart ve yönetmeliklerin hibrit özgül risklerini (etiketleme, tehlikeli gaz tahliyesi, çekme–depolama kuralları) daha ayrıntılı kapsayacak şekilde güncellenmesi çağrısı güçlüdür [25, 31].

Özetle, 2020 sonrası literatür hibrit araç yangınlarını yalnızca “batarya yangını” olarak değil, çok modlu tehlikeler bütünü olarak ele alır: termal kaçak–yayılım fiziği, paket mimarisi ve bastırma erişilebilirliği, BMS karar mantığı ve operasyonel protokoller birbirini tamamlayan bileşenlerdir.

2.2. Lityum-İyon Pil Yangınlarına Yol Açan Etkenler

Lityum-iyon bataryalarda güvenlik açısından en kritik süreç, termal kaçak (thermal runaway) olgusudur. Hücre içi sıcaklık, üretici tarafından belirlenen çalışma aralıklarının ötesine geçtiğinde elektrot ve elektrolit bileşenleri kararsız hale gelir ve ekzotermik reaksiyonlar yoluyla ek ısı açığa çıkarır. Açığa çıkan bu ısının yeterli hızda uzaklaştırılamaması halinde sıcaklık yükselmesi kendini besleyen zincirleme bir sürece dönüşür; sonuçta hem hücre hem de komşu hücrelerde termal bozulmalar tetiklenir [34].

Pil yangınlarının şiddetini belirleyen ısı salınım oranı (Heat Release Rate – HRR) değerleri Tablo 2.1’de farklı pil formatlarına göre özetlenmiştir [35].

Tablo 2.1. Pil formatına göre HRR değerleri.

Hücre Formatı	Tek Hücre HRR (kW)	Modül HRR (kW)	Paket HRR (kW)
18650	2-5	100-200	500+
21700	4-7	200-300	700+
Prizmatik	10-15	300-600	1000+
Kese tipi	8-12	250-500	900+

Termal kaçak (thermal runaway), Li-ion pillerde yangınların en önemli tetikleyicisi olarak kabul edilmektedir. Bu süreç, dışsal tetikleyiciler (mekanik darbe, aşırı şarj, kısa devre, yüksek sıcaklık) sonucu hücre içi sıcaklığın 150–200 °C üzerine çıkmasıyla başlar. Kritik sıcaklık eşiğinin aşılmasıyla: SEI tabakası bozulur, Elektrolitler

parçalanır, Anot ve katot malzemeleri ekzotermik reaksiyonlara girer, Gaz ve ısı açığa çıkar ve reaksiyon hücreden modüle, modülden tüm pakete yayılarak zincirleme etki oluşturur. Termal kaçak sırasında açığa çıkan gazlar ciddi toksik ve yanıcı özellik taşımaktadır:

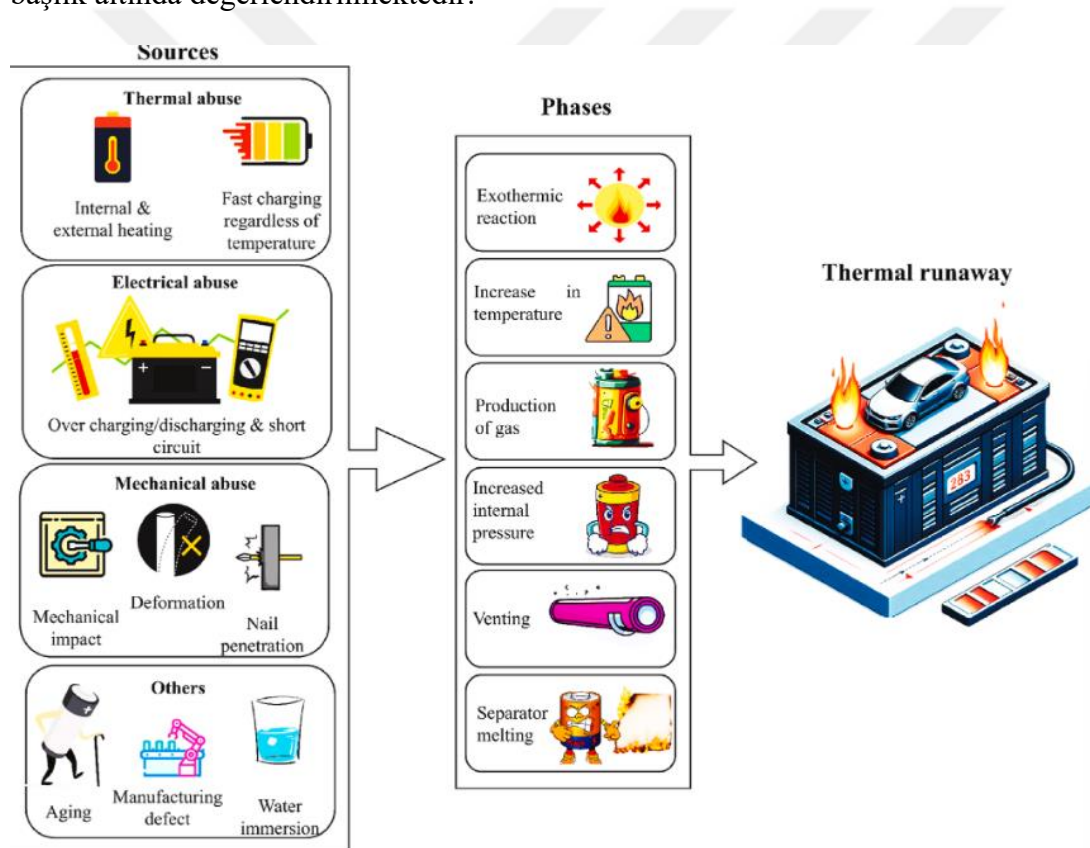
HF (Hidrojen florür): 20–50 ppm aralığında; ölümcül sınır ≈ 30 ppm.

CO (Karbon monoksit): 1000–5000 ppm; yüksek konsantrasyonda ölümcül etki.

Hidrokarbonlar: %1–3; patlayıcı karışım oluşturur.

Organofosfatlar: Solunum ve sinir sistemi üzerinde toksik etki [36].

Termal kaçak ve yangına yol açan temel koşullar Şekil 2.1’de gösterilmiş olup, dört başlık altında değerlendirilmektedir:



Şekil 2.1. Termal kaçak ve yangına yol açan temel koşullar [37].

Elektriksel kötüye kullanım (aşırı şarj/deşarj): Önerilen voltaj ve akım sınırlarının aşılması anot yüzeyinde lityum kaplanmasına ve dendrit oluşumuna yol açar. Bu dendritler ayırıcıyı delerek elektrotlar arasında iç kısa devreye neden olur ve kaçak sürecini başlatabilir [34].

Aşırı ısınma: 90–120 °C aralığında elektrolit ve katı polimer bileşenlerin ekzotermik bozulması başlar. 200 °C üzerindeki sıcaklıklarda organik çözücüler hızla ayrışarak yanıcı gazların açığa çıkmasına sebep olur [38].

Mekanik hasar: Araç kazaları veya üretim kaynaklı deformasyonlar, elektrolit yoluyla anot ve katot arasında kısa devre oluşmasına neden olur. Bu tür hasarlar lokal ısınmayı tetikleyerek zincirleme reaksiyonları hızlandırır [21].

İç kısa devre: Ayırıcının yapısal arızalanması sonucu elektrotlar doğrudan temas eder. Bu durum üretim kusurlarından, yüksek sıcaklığa maruziyetten veya yukarıda belirtilen kötüye kullanım senaryolarından kaynaklanabilmektedir [21].

Bu nedenlerle lityum-iyon pil yangınları yalnızca başlatıcı faktörlerden değil, paket düzeyi ısı yayılımı ve gaz emisyonu gibi ikincil süreçlerden de etkilenmektedir. Söndürme sürecinde termal kaçakla başa çıkmak genellikle uzun süreli ve sürekli soğutma gerektirir; aksi halde hücrelerde gizli kalmış ısı cepleri yeniden tutuşmaya yol açabilir [39].

2.3. İçten Yanmalı Motor Aksamından Kaynaklanan Yangınlar

Araçlarda meydana gelen yangınlar genellikle kısa devrelerden kaynaklanabileceği gibi aşırı ısınmış motor aksamı üzerine hidrokarbon yakıtın dökülmesi veya yakıt hortumundaki bir sızıntının yanmasıyla meydana gelebilir. Bunun yanı sıra elektrik tesisatlarından kaynaklanan kısa devreler, aşırı ısınmalar, gevşek bağlantılar ile diğer mekanik parçalardan kaynaklı olarak karşımıza çıkacaktır. Bu yangınların çıkması sonrası ise hibrit araca ait diğer yanıcı malzeme ve kısımlara sirayeti de kaçınılmaz olacaktır. Aynı şekilde hibrit aksamda meydana gelebilecek yangınlarda diğer kısımları tehdit edecektir. Hibrit araçlarda yalnızca batarya sistemleri değil, içten yanmalı motor (İYM) aksamı da yangın kaynağı olabilir.

Araç yangınlarının en sık karşılaşılan sebepleri arasında yakıt ve elektrik sistemlerine bağlı arızalar öne çıkmaktadır. Özellikle hidrokarbon esaslı yakıtların, motorun aşırı ısınmış yüzeyleri üzerine sızması ya da dökülmesi, ani tutuşmalara zemin hazırlamaktadır. Benzer şekilde yakıt hortumlarında meydana gelen kaçaklar, motor bölmesindeki yüksek sıcaklık ve açık alev kaynaklarıyla etkileşime girerek yangın riskini artırmaktadır. Elektrik tesisatındaki kısa devreler, yalıtım zafiyetleri veya gevşek bağlantılar da yangınların bir diğer önemli nedenini oluşturmaktadır. Ayrıca

aşırı sürtünme, yetersiz soğutma ya da bakım eksiklikleri sonucu ısınan mekanik bileşenler, yakıt buharları veya çevredeki yanıcı malzemeler için tutuşma kaynağı haline gelebilmektedir. Bu faktörler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, içten yanmalı motorlu araçlarda yangın çıkış noktalarının yakıt sistemleri ile elektrik ve mekanik aksamın etkileşiminden doğduğu açıkça görülmektedir [40].

İçten yanmalı motor teknolojisinin uzun yıllardır kullanılması ile tecrübelerin fazlasıyla yeterli seviyede olması bazı tedbirlerin alınması ve bir yangın sonrası etkin müdahale edilebilmesi açısından bize birçok ipucu vermektedir. İYM yangınları, uzun yıllar boyunca otomotiv sektöründe deneyimlenmiş olduğundan, gerek önleyici tedbirler gerekse acil müdahale protokolleri iyi belgelenmiştir. Ancak hibritlerde bu tip yangınların batarya bölgesine sıçrama riski ek karmaşıklık yaratmaktadır [40].

2.4. Benzin ve Lityum-İyon Akü Yangınlarının Etkileşimleri

Hibrit araçların en özgün tehlikelerinden biri, yakıt tankı ile lityum-iyon bataryaların aynı sistem içinde bulunmasıdır. Benzin, yüksek yanıcılık özelliği nedeniyle yangının hem büyüme hızını hem de şiddetini artırır. Dolayısıyla batarya kaynaklı bir yangın sırasında yakıtın tutuşması, yangının kontrol altına alınmasını zorlaştıran çok modlu senaryolar ortaya çıkarır [41].

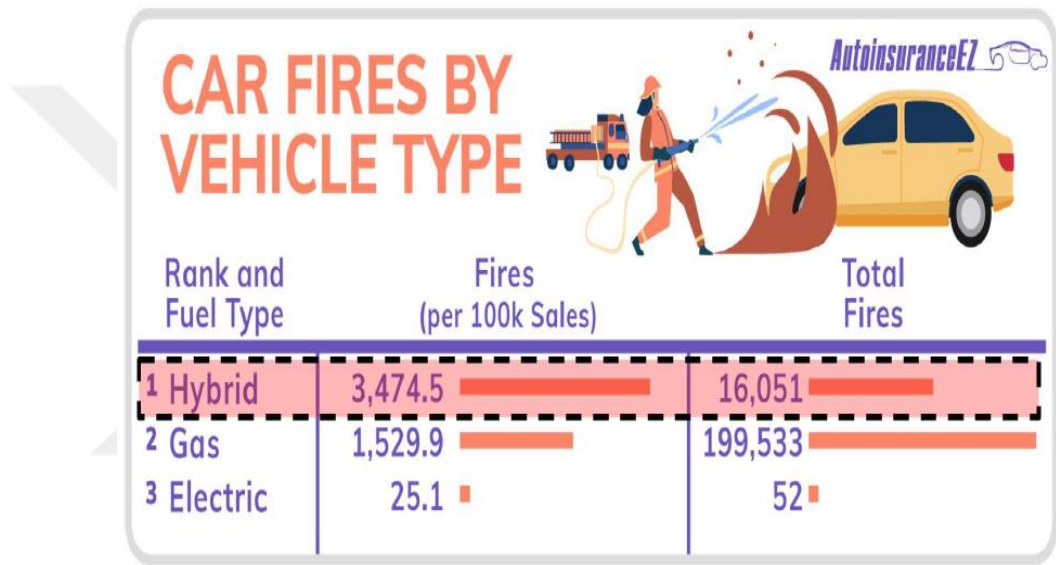
Benzinin yanması sonucu açığa çıkan karbon monoksit (CO), bataryalardan salınan hidrojen florür (HF) ve diğer toksik gazlarla birleşerek son derece tehlikeli atmosferler oluşturur. Bu toksik karışımlar, hem yolcular hem de acil müdahale ekipleri için yüksek mortalite riski taşımaktadır [35].

Yangın dinamikleri açısından, ısı salınım oranı (Heat Release Rate – HRR) en kritik parametrelerden biridir. Literatür, benzin varlığında HRR'nin daha yüksek değerlere ulaştığını, bu nedenle yangının daha kısa sürede büyüdüğünü ve müdahale stratejilerinin daha karmaşık hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca benzin buharlarının patlayıcı özellik göstermesi, batarya elektrolitlerinden çıkan yanıcı gazlarla birleştiğinde patlama olasılığını belirgin biçimde yükseltir [42].

Sonuç olarak, hibrit araçlarda benzin ve batarya yangınlarının eş zamanlı ortaya çıkması klasik söndürme yöntemlerinin yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Benzin yangınlarında etkili olan köpüklü veya tozlu söndürücüler, batarya termal kaçaklarını bastırmada yetersiz kalırken; bataryaya yönelik uzun süreli su soğutması da yakıt

yangınlarını kontrol edememektedir. Bu nedenle literatürde, her iki risk faktörünü birlikte dikkate alan özel söndürme stratejilerinin ve kombine müdahale yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [33].

Araç tipine göre araba yangınlarının oranını bulmak için, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Ulaşım Güvenliği Kurulu (NTSB), Ulaşım İstatistikleri Bürosu (BTS) ve Recalls.gov verilerinden oluşturulan Şekil 2.2’de gösterilen yangın istatistiklerine bakıldığında; 100.000 satış başına en fazla yangın olayında birinci sırada hibrit araçlar geliyor. Bu verilere göre yangınlar için en tehlikeli durum hibrit araçlar gibi görünüyor, ardından içten yanmalı motora sahip araçlar geliyor.



Şekil 2.2. Araç tipine göre yangın istatistikleri [43].

2.5. Son Beş Yılda Hibrit Araçlarda Yangın ve Geri Çağırma Örnekleri

2.5.1. Jeep Wrangler 4xe ve Grand Cherokee 4xe (2024)

2024 yılında Jeep, 2020–2024 Wrangler 4xe ve 2022–2024 Grand Cherokee 4xe modellerinde batarya paketinde yangın riski nedeniyle 154.000 aracı geri çağırmıştır. 13 yangın ve 2 yaralanma vakasının kayda geçtiği bu olay, hibrit araç bataryalarının tasarım ve üretim hatalarının büyük ölçekli geri çağırılara yol açabileceğini göstermiştir [44].

2.5.2. Stellantis Hibrit Jeep yazılım güncellemesi (2023–2024)

Stellantis, 2023 yılında iki yangın raporu sonrası 32.000 hibrit Jeep aracına yazılım güncellemesi yapmıştır. Buna rağmen 2024 yılında yangınların devam etmesi üzerine

Samsung SDI ile ortak bir teknik inceleme başlatılmıştır. Olay kapsamında 13 yangın ve 2 yaralanma resmi kayıtlara geçmiştir [45].

2.5.3. Toyota RAV4 hibrid (2023)

Toyota, 2013–2018 RAV4 Hibrid modellerinde batarya terminal bağlantılarının gevşeyerek kıvılcım ve yangın riskine yol açması nedeniyle 1,9 milyon aracı geri çağırmıştır. Bu olay, olgun hibrit modellerde dahi üretim kaynaklı yangın riski olabileceğini göstermektedir [46].

2.5.4. Ford Escape, Maverick ve Lincoln Corsair hibrid (2023)

ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA), Ford Escape, Maverick ve Lincoln Corsair hibrit araçlarında motor yağı ve buhar birikiminden kaynaklı yangın riski nedeniyle 125.322 aracın geri çağırıldığını duyurmuştur. Bu vaka, hibrit araç yangınlarının yalnızca bataryaya değil, aynı zamanda içten yanmalı motor bileşenlerine de bağlı olabileceğini ortaya koymaktadır [47].

2.5.5. Chrysler pacifica phev (2023)

Chrysler, 2023 model 967 adet Pacifica PHEV minivanı, yakıt hattında üretim kaynaklı hata nedeniyle yangın riski gerekçesiyle geri çağırmıştır. Yakıt sistemleri, hibrit araçlarda batarya dışında önemli bir yangın kaynağı olarak öne çıkmaktadır [48].

2.5.6. Volvo XC60 T8 plug-in hibrid (2025, Tayland)

2025 yılında Tayland'da bir Volvo XC60 T8 PHEV, ev garajında şarj esnasında alev almış ve araçla birlikte carport çatısı yanmıştır. Daha önce bataryada uyarı ışığı görülmesine rağmen tamirden sonra bile yangın meydana gelmesi, onarım sonrası güvenlik kontrollerinin kritik önemini göstermektedir [49].

2.5.7. Çin Shenzhen hibrit otobüs yangını (2016)

Çin'de (Shenzhen) 2016 yılında hibrit bir otobüs arka bölümünden alev almış, bu yangının içten yanmalı motor kısmından başladığı ve otobüsün her iki kısmında bulunan batarya bölümüne sıçramadığı raporlanmıştır. Rapora yangın batarya paketi kaynaklı olmadığı olarak geçmiştir. Bu olayda bize gösteriyor ki hibrit elektrikli araç yangınlarının tek sebebi batarya değil, araç aksamının diğer kısımları veya alternatif yakıt kaynaklı çıkabilmektedir [50].

2.5.8. MG HS+ hybrid (2023 ve 2024, Avustralya)

Avustralya’da yeni satın alınan bir MG HS+ Hybrid araç, satın alındıktan hemen sonra iki kez güç kaybı yaşamıştır. Yangına dönüşme de araç sahibinin güvenlik endişesi nedeniyle iade talebiyle gündeme gelen bu olay, hibrit araçlarda erken arıza belirtilerinin de risk sinyali olabileceğini göstermektedir. Mayıs 2023'te ise, yanlış yerleştirilen halıya ait altlığın elektrik topraklama saplamasına olan yangın riski etkisi nedeniyle 5.100'den fazla HS+EV ve Plug-In Hybrid (PHEV) modeline geri çağırma uygulandı [51].

2.5.9. Mv morning midas (2025, alaska)

Alaska açıklarında 3.000’den fazla araç taşıyan MV Morning Midas gemisinde çıkan yangında, 681 hibrit ve 70 elektrikli araç taşıyan güvertede yangın uzun süre kontrol altına alınamamıştır. Olay, hibrit araçların lojistik taşımacılıkta toplu yangın riskleri doğurabileceğini göstermektedir [52].

2.5.10. Mv fremantle highway (2023, kuzey denizi)

2023 yılında Kuzey Denizi’nde 3.783 araç taşıyan MV Fremantle Highway gemisinde yangın çıkmış, mürettebattan bir kişi yaşamını yitirmiştir. Araçlar arasında hibrit modellerin de bulunduğu olay, uluslararası deniz taşımacılığında hibrit/elektrikli araçların büyük ölçekli güvenlik riskleri barındırdığını göstermektedir [52].

2.6. Vaka Çalışmaları ve Müdahale Örnekleri

Hibrit ve elektrikli araç yangınları, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak özgün müdahale zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Aşağıda sunulan örnekler, son yıllarda meydana gelen yüksek profilli olaylardan seçilmiş olup, batarya teknolojilerinin doğasından kaynaklanan riskler ve müdahale tekniklerinin etkinliği üzerine önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

2.6.1. Tesla model s, teksas (2021)

2021 yılında Teksas eyaletinde meydana gelen yüksek enerjili kaza sonrasında bir Tesla Model S aracı alev almış ve yangın, batarya paketinin termal kaçak süreciyle hızla ilerlemiştir. Olay yerinde 4 saat süre boyunca yapılan söndürme çalışmaları kapsamında itfaiye, yaklaşık 30.000 galon su kullanmak zorunda kalmıştır. Buna rağmen batarya modüllerinde yeniden alevlenme (re-ignition) vakaları gözlenmiştir. NTSB raporlarında, yangına su ve kuru kimyevi toz ajanları ile müdahale edildiği

ancak batarya hücrelerinin içsel kimyasal reaksiyonlarının yangının tekrar tutuşmasına yol açtığı kaydedilmiştir. Bu durum, lityum-iyon batarya yangınlarının klasik yangın söndürme maddelerine karşı dirençli olduğunu göstermektedir [53, 54].

2.6.2. Hyundai kona ev, kanada (2019–2022)

Kanada’da 2019’dan itibaren çeşitli Kona EV yangınları bildirilmiştir. 2022 yılında Quebec City’de bir Kona EV’nin kapalı otoparkta yanması sonucu, araç tamamen kullanılamaz hale gelmiştir. Yerel raporlara göre yangın hızlı şekilde gelişmiş ve çevrede ciddi yapısal hasara yol açmıştır. Resmî raporlarda yangının batarya hücresindeki üretim kaynaklı hatalar ile ilişkili olabileceği ifade edilmiş; bu nedenle Hyundai, dünya çapında geri çağırma (recall) süreci başlatmıştır. Müdahale sırasında kullanılan ajanlara dair ayrıntılı bilgiler paylaşılmamış olsa da, yangının kontrol altına alınmasında suyla soğutma yöntemlerinin temel rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu olay, üretim kusurlarının batarya güvenliği üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır [55, 56].

2.6.3. Jeep Wrangler 4xe, ABD (2023–2024)

Stellantis tarafından üretilen hibrit Jeep Wrangler 4xe ve Grand Cherokee 4xe modelleri, 2023 ve 2024 yıllarında yangın riski nedeniyle geniş çaplı geri çağırımlara konu olmuştur. Özellikle park hâlindeki araçlarda batarya paketinin içsel arızaları sonucunda 13 yangın olayı rapor edilmiştir. Bu yangınlarda müdahale yöntemlerine ilişkin ayrıntılı kamuya açık veri bulunmamakla birlikte, üretici firmanın açıklamalarında olayların tamamının araçlar kapalı ve park hâlindeyken geliştiği belirtilmiştir. Bu durum, hibrit araç bataryalarının kullanım dışı anlarda dahi latent (gizli) yangın riski taşıyabileceğini göstermektedir. Vakaların ardından yazılım güncellemeleri uygulanmış, batarya üreticisi Samsung SDI ile ortak teknik inceleme başlatılmıştır [57–59].

2.6.4. MV Fremantle Highway, kuzey denizi (2023)

2023 yılında Kuzey Denizi’nde seyir hâlinde olan ve 3.783 araç taşıyan MV Fremantle Highway gemisinde büyük çaplı bir yangın çıkmıştır. Araçlar arasında hibrit ve elektrikli modellerin bulunduğu yangın, geminin sabit su püskürtme sistemleri ile kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Ancak lityum-iyon bataryaların yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle, yangın günlerce devam etmiş ve bir mürettebat yaşamını yitirmiştir. Hollanda Güvenlik Kurulu (DSB) tarafından yayımlanan raporda, deniz

taşımacılığında hibrit ve elektrikli araçların toplu yangın riskleri için mevcut yangın söndürme stratejilerinin yetersiz olduğu, dolayısıyla yeni standartlara ihtiyaç bulunduğu vurgulanmıştır [60, 61].

2.6.5. Enerji depolama sistemi (ESS), Kore (2023)

Kore’de 2023 yılında bir enerji depolama sistemi (ESS) tesisinde çıkan yangın, batarya modüllerinde lokal termal kaçak sonucu gelişmiştir. Müdahalede aerosol tabanlı sistemler ve su sisi birlikte uygulanmış, yangının ilk evrede kontrol altına alınmasına rağmen modül düzeyinde yeniden alevlenme gözlenmiştir. Akademik çalışmalar, bu tür yangınlarda kullanılan Novec 1230, F-500 köpük ve su sisi kombinasyonlarının ilk bastırma için etkili olduğunu; ancak lityum-iyon bataryaların içsel gaz çıkışı ve ısı dengesizliği nedeniyle uzun süreli gözetim olmaksızın kalıcı söndürmenin garanti edilemeyeceğini ortaya koymaktadır [62–64].

2.7. Söndürme Maddeleri

Lityum iyon piller (LİP), günümüzde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanı bulan, modern enerji depolama sistemlerinin temelini oluşturan teknolojilerden biridir. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve kompakt tasarım avantajları sayesinde farklı sektörlerde hızla yaygınlaşmaktadır [65]. Bununla birlikte, elektrokimyasal yapılarında yer alan yanıcı organik elektrolitler ve yüksek depolanan enerji miktarı, bu sistemleri yangın güvenliği bakımından kritik hale getirmektedir. Özellikle hibrit ve tam elektrikli araçlarda, batarya paketlerinin yüksek voltajlı yapıları ve karmaşık modüler tasarımları, yangın risklerini geleneksel yakıt sistemlerine kıyasla farklı boyutlara taşımaktadır [66].

Lityum iyon pil yangınlarının en önemli tetikleyicisi termal kaçak (thermal runaway, TR) olayıdır. TR; mekanik darbe, aşırı şarj, kısa devre veya harici ısı gibi dış etkenler sonucu hücre sıcaklığının 150–200 °C aralığını aşmasıyla tetiklenir [67]. Bu aşamada:

Katı elektrolit ara yüzeyi (SEI) tabakası bozulur,

Anot ile elektrolit arasında ekzotermik reaksiyonlar başlar,

Katot malzemesi oksijen salar,

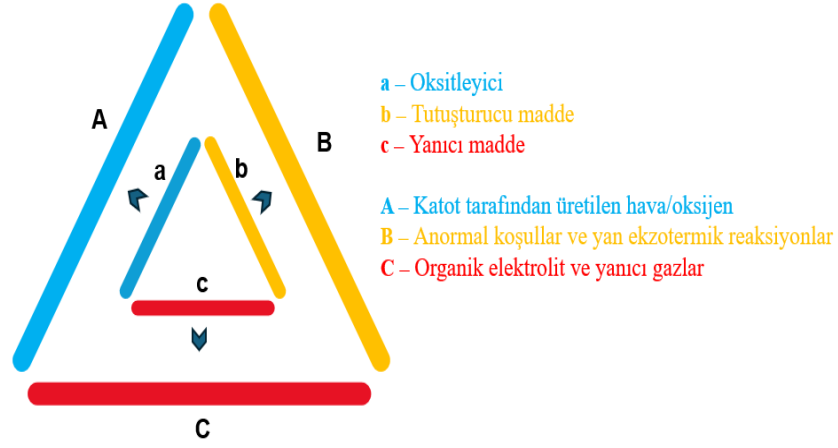
Elektrolitler bozunarak hidrojen (H₂), metan (CH₄), etilen (C₂H₄) ve etan (C₂H₆) gibi yanıcı gazlar açığa çıkar.

Bu reaksiyonlar zincirleme şekilde hücreden modüle, modülden tüm batarya paketine yayılır. Böylece klasik yangınlara kıyasla daha şiddetli, uzun süreli ve kontrol altına alınması güç yangın senaryoları ortaya çıkar [68].

Termal kaçak sürecinde ortaya çıkan yanıcı türler yalnızca yangının büyümesine değil, aynı zamanda toksik etkilere de neden olmaktadır. Literatürde özellikle hidrojen florür (HF) ve fosforil triflorür (POF₃) salınımı kritik seviyelere ulaşmakta; bu gazlar düşük konsantrasyonlarda bile insan sağlığı için ölümcül riskler taşımaktadır [25]. Bu nedenle, lityum iyon pil yangınlarının yönetiminde yalnızca söndürme stratejileri değil, aynı zamanda toksik gaz tahliyesi ve kişisel koruyucu donanım kullanımı da büyük önem arz etmektedir.

Lityum iyon pil yangınları aynı zamanda karmaşık yanma karakteristikleri sergiler. Termal kontrol kaybı sürecinde tutuşabilir malzemeler (grafit anot, organik elektrolit, gaz fazı ürünler ve lityum metal) farklı evrelerde yanmaya katılır. Bu durum yangının ısı salınım hızını (HRR) artırır, sıcaklık yükselme hızını hızlandırır ve yangının uzun süreli olarak devam etmesine yol açar [69]. Ayrıca pilin doluluk oranı (State of Charge, SOC) da yangın davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Tam şarjlı hücrelerde HRR değerleri belirgin şekilde yükselmekte ve yangın yayılımı hızlanmaktadır [70].

Sonuç olarak, lityum iyon pil yangınları klasik yangın üçgenine ek olarak kimyasal zincir reaksiyonlarının da devreye girdiği karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle “Lityum iyon pil yangın üçgeni” modeli geliştirilmiş ve yanıcı madde, ısı ve oksijenin yanı sıra pil bileşenlerinden açığa çıkan oksitleyici ajanların ve gazların da bu süreçte kritik rol oynadığı gösterilmiştir. Bu model, klasik yangın teorilerinin batarya yangınlarında yetersiz kaldığını ve yeni risk modellerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır [71].



Şekil 2.3. Lityum iyon pil yangın üçgeni [72].

Yangın söndürücü maddeler, genel olarak ısıyı emme, oksijenin ortadan kaldırılması ve yanmayı sürdüren kimyasal zincir reaksiyonlarının kesilmesi prensipleriyle çalışmaktadır. Ancak lityum iyon pil (LİP) yangınlarında görülen yanma fenomenleri, bu klasik mekanizmalara doğrudan karşıt özellikler taşıdığından, LİP yangınlarının söndürülmesi özel zorluklar barındırmaktadır. Bu nedenle günümüzde kullanılan söndürme maddeleri; katı, sıvı ve gazlı ajanlar olarak sınıflandırılmakta, her birinin kendine özgü avantajları, dezavantajları ve uygulama senaryoları literatürde geniş biçimde tartışılmaktadır [73].

2.7.1. Kuru kimyasal tozlar (dry chemical powders)

Li ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, ABC tipi kuru kimyasal toz LCO pil yangınlarına uygulanmış, görünür alevin kısa sürede söndürüldüğü, ancak yalnızca 8 saniye içinde yeniden alevlenmenin gerçekleştiği rapor edilmiştir [74]. Ayrıca toz uygulamasının ardından önemli miktarda kalıntı kaldığı, bu kalıntıların nemi emerek iletken hale geldiği ve kısa devre riskini artırdığı görülmüştür. Bu nedenle, kuru tozun LİP yangınları için kalıcı bir çözüm sunmadığı kabul edilmektedir.

2.7.2. Su ve su sisi (water and water mist)

Su, yüksek özgül ısı nedeniyle bataryaların soğutulmasında oldukça etkilidir. Xu ve ark. [75], su sisi uygulamalarının termal kaçak yayılımını geciktirdiğini ve bataryaların soğumasında etkin olduğunu göstermiştir. Ancak Zhang ve ark. 243 Ah kapasiteli hücreler üzerinde yürüttükleri çalışmada, su sisi uygulamasının ısı salınım hızını artırabildiğini ve toplam enerji salınımını azaltmakta yetersiz kaldığını tespit etmiştir [76]. Ayrıca parçacıkların hücre yüzeyine ulaşmasını zorlaştıran havalandırma

koşulları ve yapısal engeller, yöntemin etkinliğini sınırlamaktadır. Larsson ve ark. ise, su sisi uygulamalarının HF emisyonlarını artırabileceğini, dolayısıyla toksisite riskinin yükseldiğini ortaya koymuştur [75].

2.7.3. Katkılı su çözeltileri

Peng ve ark. su sisinin etkinliğini artırmak amacıyla iyonik olmayan yüzey aktif maddeler (FS3100, Tween 80, APG0810) ekleyerek karşılaştırmalı deneyler gerçekleştirmiştir. Bulgulara göre, APG0810, suyun yüzey gerilimini düşürerek soğutma ve söndürme performansını artırmış, Tween 80 ise köpük oluşturma kapasitesi sayesinde yüzey sıcaklığını azaltmada daha başarılı olmuştur [77]. Ayrıca F-500 katkılı çözeltiler, ateşleme indüksiyon süresini uzatmış ve tepe sıcaklıklarını düşürmüştür. Bununla birlikte, suyun yüksek elektriksel iletkenliği, geniş ölçekli uygulamalarda hâlâ önemli bir sınırlayıcı faktör olarak kalmaktadır.

2.7.4. Gazlı söndürücüler (CO₂, HFC-227ea, Novec 1230)

Klasik yangınlarda yaygın olarak kullanılan CO₂, oksijen konsantrasyonunu düşürerek etki göstermektedir. Ancak LİP yangınlarında hücre içinden oksijen üretimi devam ettiği için etkinliği sınırlıdır. Xu ve ark. [78], CO₂ ile yapılan söndürmelerde yeniden alevlenmenin sık görüldüğünü rapor etmiştir. Benzer şekilde, HFC-227ea kullanımının yalnızca kapalı hacimlerde ve erken müdahalelerde etkin olabildiği; açık alanlarda büyük ölçekli hücrelerde başarısız olduğu gözlemlenmiştir [79]. Bunun yanında, C₆F₁₂O (Novec 1230) kullanımı, modül yangınlarını bastırmada başarılı sonuçlar verse de, Liu ve ark. tarafından yapılan çalışmada, bu maddenin toksik gaz emisyonlarını artırdığı bildirilmiştir [80].

2.7.5. Sıvı azot

Huang ve ark. [81], sıvı azotun batarya yüzeyini -0 °C'nin altına kadar soğutabildiğini ve termal kaçak başlamadan önce süreci tamamen durdurabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, sıvı azot teorik olarak en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak depolama ve taşıma zorlukları nedeniyle pratik uygulamaları sınırlıdır.

2.7.6. Aerosoller

Rao ve ark. aerosol bazlı söndürücülerin yalnızca başlangıç aşamasında kısa süreli soğutma sağladığını, ancak ekzotermik reaksiyonları kalıcı olarak durduramadığını ortaya koymuştur [82]. Yeniden alevlenme sorunu bu yöntemin en büyük zayıflığıdır. Ayrıca, su emilimi sonrasında korozyif özellik kazanabilen aerosol kalıntıları, pil

hücrelerinde yeni kısa devre risklerine yol açabilmektedir. Bu nedenle, aerosol ajanların LİP yangınları için tek başına uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, mevcut söndürme yöntemlerinin hiçbiri lityum iyon pil yangınlarında tek başına tam etkinlik sağlayamamaktadır. Literatür, özellikle hibrit yaklaşımların ( rne in su sisi + katkı maddeleri, gazlı ajanlar + soğutma yöntemleri) daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca, bataryaların güvenlik tasarımlarının geliştirilmesi (daha kararlı elektrolitler, geli mi  ayırıcılar, termal bariyerler) ve BMS (Battery Management System) sistemlerinin optimize edilmesi, yangın riskinin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır [30].

Tablo 2.2’de söndürme maddelerinin avantajları ve dezavantajları tablo olarak gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Söndürme maddelerinin avantaj ve dezavantajları.

Söndürme Maddesi	Avantaj	Dezavantaj
Su / Su Sisi	Yüksek soğutma, yeniden alevlenmeyi azaltır	Elektrik riski, nüfuz sınırlı
Köpük	Oksijen kesici	Isıl kontrol zayıf
Kuru Toz	Hızlı bastırma	Yeniden alevlenme oranı yüksek
Aerosol	Reaksiyon zincirini kırar	Paket içine etki sınırlı
YVSS	Uzun süreli soğutma, oksijen engeli	Deneysel, maliyetli



3. LİTYUM İYON PİL YANGINI DENEYLERİ

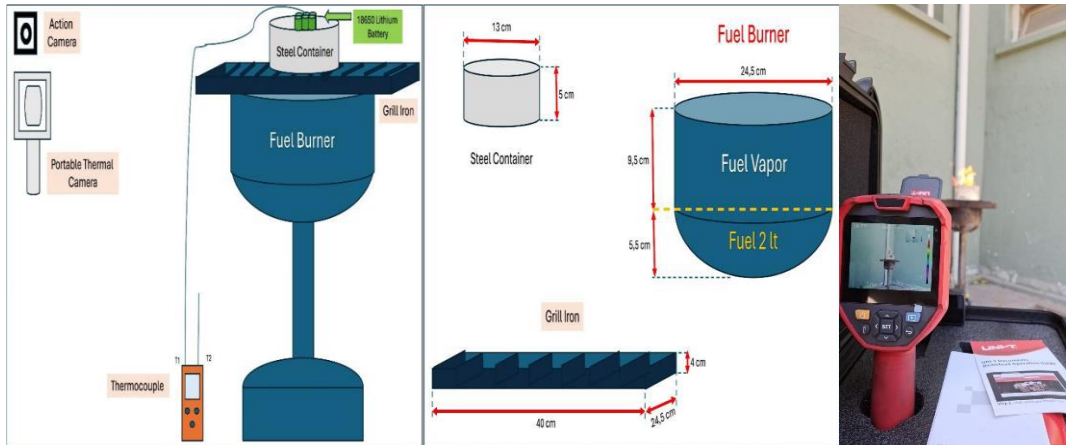
3.1. Deney Seti ve Düzeneginin Oluşturulması

Bu araştırma kapsamında, hibrit araçlarda meydana gelen akü yangınlarını incelemek için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, akülerin benzine maruz kalmaya verdiği tepkiyi, yangın yayılma sürecini, sıcaklık değişimlerini ve yangın söndürme maddesinin (YVSS) etkinliğini analiz etmek üzere tasarlanmıştır. Çalışmada 18650 tipi lityum iyon aküler, prizmatik aküler ve benzin kombinasyonları kullanılmıştır. Deney seti ve düzeneginin etkin bir şekilde oluşturulması sürecinde veri toplamak için kullanılabilecek yöntem ve metodlar literatürde yer alan örnekler incelenerek belirlenmiştir. Örnek deney düzeneklerinin incelenmesi neticesinde genel olarak iki ayrı deney düzenegi tasarlanmış olup; benzin yanmasının pil üzerindeki etkileri, reaksiyon süreci, meydana gelen ısıнын çevresel etkisi, ısı yayılım hızı, ve söndürme maddesi etkinliği açık alan deneylerinde incelenirken, bu verilere ilave olarak gaz analizlerinin, harici bir ısı kaynağı kullanılarak pil davranışlarının gözlemlenmesi ise kapalı alan deneyleriyle gözlemlenmiştir. Deneylerdeki verilerin elde edilmesi ve değerlendirilmesinde, sadece pil yanmalarının gaz emisyonu ve yanma reaksiyonlarının sürecini takip etmek amacıyla Şekil 3.1’de görülen deney seti, benzin yanmalarının eşlik edeceği riskler nedeniyle açık alan deneylerinin gerçekleştirileceği deney düzenegine ait görsel ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Kapalı alan deneyleri için kurulan deney seti, tekil bir hücrede başlatılan yanma sürecinin kontrollü bir ortamda gerçekleşmesini ve ardından ortaya çıkan etkilerin farklı bölmelerde izlenebilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle, batarya yangınlarına sebep olabilecek koşullar laboratuvar ortamında taklit edilmekte ve gelişim süreci gözlemlenebilmektedir. Düzenekte, ısı transfer mekanizmaları olan iletim, taşınım ve ışıınım tek başına veya birlikte uygulanabilmekte; bu yöntemlerin seçimi deneyin amacına göre uyarlanmaktadır.

Deney setinde dışarıdan kontrolle ısıtma düzeneginin çalıştırılması, gerektiğinde durdurulması, ısıya ve patlamaya karşı dayanımlı temperli camlar, bölmeler arası geçiş kapakları, sağlam iç bölmeler, doğal ve mekanik havalandırma imkânı sağlayan

Hibrit araç yangınlarında benzin yanmasının sonucunda lityum iyon pil grubuna sirayet, tepkimelerin deneysel çalışmalarının gözlemlenebilmesi ve kayıt altına alınabilmesi için hazırlanan deney düzeneğinin şematiği Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Bu deney düzenekleri kapsamında; 2 lt benzin (her deney için ayrı ayrı), 6 adet paralel bağlı 3,6 V 18650 ebatında Lityum-İyon pil bloğu (her deney için), 1 adet 3,6 V 18650 ebatında Lityum-İyon pil (her deney için), 1 adet Prizmatik Tip Lityum-İyon pil (her deney için), yakıt yakma düzeneği ve pürmüs, ızgara demir ile çelik kap, 1 adet

aksiyon kamerası, 1 adet termal kamera, sıcaklık ölçüm verilerinin kayıt altına alınabilmesi için Cem DT-3891G 4 Kanal Termokupl, gaz verileri toplanabilmesi için Testo 330 LL cihazı, koruyucu teçhizat, fotoğraf ve videoların kayıt altına alınabilmesi amacıyla GoPro Hero 7 ile termal görüntüler için ise Uni-T UTI730E profesyonel termal kamera kullanılmıştır.

Kullanılan ölçüm cihazlarına ait hata payı verileri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Ölçüm cihazları hata payı verileri.

Ölçüm cihazı	Ölçülen değer	Ölçüm aralığı	Hata payı
Cem DT-3891G 4-Kanallı Termokupl Sıcaklık Veri Kaydedici	K tipi termokupl	-200 – 1372°C	± 1°C
Testo 330 LL	O ₂	0 to 21 Vol. %	±0.2 Vol. %
Testo 330 LL	CO	0 to 4000 ppm	±20 ppm (0 to 400 ppm) ±5 % of mv (401 to 2000 ppm) ±10 % of mv (2001 to 4000 ppm)
Testo 330 LL	CO ₂	0 to 1 Vol. % 0 to 10000 ppm	±75 ppm or ±3 % of mv (0 to 5000 ppm) ±150 ppm or ±5 % of mv (5001 to 10000 ppm)
Uni-T UTI730E Profesyonel Termal Kamera	Termal görüntü	-40°C~400°C	±2°C or ±2%

3.2. Deney Prosedürleri

Lityum-iyon bataryalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, potansiyel olarak yüksek riskler barındıran ve tehlikeli koşullarla ilişkilendirilen araştırmalardır. Bu nedenle, deney süreçlerinde güvenliğin en üst düzeyde sağlanabilmesi için kişisel koruyucu donanımların (KKD) sistematik biçimde kullanılması zorunluluk arz etmektedir.

Deneysel çalışmalarda, süreçlerin belgelenmesi ve verilerin güvenilir biçimde toplanması amacıyla çok yönlü ölçüm ve kayıt sistemleri kullanılmıştır. Deneylerin farklı aşamaları aksiyon kameraları aracılığıyla görsel olarak kaydedilmiş, oluşan ısı dağılımı ise her bir bölmeye yerleştirilen sıcaklık sensörleri ve termal kamera ile izlenmiştir. Ayrıca, termal kararsızlık (thermal runaway) ve duman içerisindeki yanma ürünlerinin belirlenebilmesi için baca gazı analiz cihazından yararlanılmıştır.

Çalışmada kullanılan enerji depolama birimleri, nominal 3,6 V gerilime ve 3200 mAh kapasiteye sahip, silindirik 18650 formunda Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) tipi lityum-iyon pillerdir. Bu pillerin seçilmesinde yaygın erişilebilirlikleri, maliyet açısından uygun olmaları ve dünya genelinde hibrit ile elektrikli araçlarda en sık kullanılan hücre tiplerinden biri olmaları etkili olmuştur.

Deneyisel çalışmalar, uygulanacak ortam koşullarındaki farklılıklar dikkate alınarak kapalı alan ve açık alan olmak üzere iki aşamalı bir plan çerçevesinde tasarlanmıştır.

3.3. Kapalı Alan Yangın Deneyleri

Araştırma metodolojisi iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, hücre yanması sonucu ortaya çıkan gaz bileşenleri ve sıcaklık değişimleri analiz edilmekte; böylece bataryanın yanma davranışına ilişkin veriler elde edilmektedir. İkinci aşamada ise, termal dengenin bozulmasının ardından hücrelerin çeşitli yangın söndürücü ajanlara karşı verdiği tepkiler sistematik olarak incelenmektedir.

Deney seti kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların uygulama planı Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

Tablo 3.2. Deney seti kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların uygulama planı.

Deney Aşamaları	Deneyin Açıklaması	3.6 V 3200 mAh NMC Tekli Li-I Pil
Aşama 1	1 Alevli yanmanın başlangıç anının tespiti	X
	Yanma süresince sıcaklık artışının zamana bağlı eğrisinin analizi	X
	2 Yanma sırasında oluşan CO ve CO ₂ emisyonlarının nicel ölçümü	X
	Yanma esnasında ortam atmosferindeki O ₂ konsantrasyonunun izlenmesi	X
Aşama 2	3 Söndürme maddesi olarak suyun uygulanması ve etkinliğinin değerlendirilmesi	X
	4 Söndürme maddesi olarak NOVEC 1230’un uygulanması ve performansının incelenmesi	X
	5 Söndürme maddesi olarak BIOVERSAL’in uygulanması ve etkilerinin analiz edilmesi	X
	6 Söndürme maddesi olarak yüksek viskoziteli sıvı bazlı söndürücünün uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesi	X

Termal kararsızlık ve yanma senaryoları, deney düzeneğinin kontrollü ısıtma özelliği kullanılarak başlatılmıştır. Böylelikle, pil hücreleri aşırı ısınmaya maruz bırakılarak

yangın davranışları gözlemlenmiştir. Kullanılan deneysel düzenek, olası patlama ve yoğun dumanın dışarı sızmasını önleyecek şekilde yalıtımlı ve dayanıklı olarak tasarlanmıştır. Deney süresince oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit ve ortam sıcaklığı değerleri sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Isı ve duman verileri, hem termal kaçak öncesinde hem de kaçak süresince toplanarak, duman içerisindeki gaz bileşenleri analiz edilmiştir. Lityum-iyon hücrelerin yangın davranışı, herhangi bir müdahalede bulunulmadan doğal sönme anına kadar takip edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında farklı tip söndürücü ajanlar uygulanmış ve elde edilen parametreler dikkatle kayıt altına alınmıştır. Deneysel sürecin sonunda veri toplama ve işleme adımları sistematik bir yaklaşım çerçevesinde yürütülmüştür. İlk olarak, aksiyon kamerasından elde edilen kayıtlar değerlendirilerek söndürücü maddelerin etkileri analiz edilmiştir. Ardından baca gazı ölçüm cihazından elde edilen veriler işlenerek zamana bağlı grafiklere dönüştürülmüş, sıcaklık sensörlerinden alınan bilgilerle de sistemin termal davranışını ortaya koyan sıcaklık-zaman eğrileri oluşturulmuştur. Son aşamada termal kamera verileri incelenerek, deney süresince oluşan ısı dağılımı ve yoğunluk alanları değerlendirilmiştir. Böylece deneysel bulgular çok yönlü bir biçimde analiz edilmiş, sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Her bir deney, ölçümlerin doğruluk ve tutarlılığını garanti etmek amacıyla üç kez tekrarlanmıştır.

3.4. Açık Alan Yangın Deneyleri

Hibrit araçlarda meydana gelen yangınların incelenmesine yönelik yürütülen deneysel çalışmada, deney düzeneğine, bataryaların termal kaçak ve jet alevi davranışlarını tetikleyici ve tamamlayıcı etki sağlamak üzere 2 litre benzin ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan “Benzinli Yanma Kabı”, belirli bir hacimde dökülen veya artan yakıtın kontrollü yanma davranışını temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Izgara demiri, araç altı şasisi ile benzin yanmasının etkilediği boşlukları simüle etmek üzere yerleştirilmiştir. Çelik kap ise batarya bloğunun dış koruyucu tabakası olarak görev yapmakta ve yanma süreci boyunca deney düzeneğinin hiyerarşik bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır.

Bu araştırma kapsamında hibrit araçlarda meydana gelen batarya yangınlarını incelemek üzere çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, bataryaların benzine maruz kalması durumundaki tepkisini, yangının yayılma sürecini, sıcaklık

değişimlerini ve yangın söndürücü madde (YVSS) etkinliğini analiz etmek amacıyla tasarlanmıştır. Çalışmada 18650 tipi lityum-iyon piller, prizmatik tip lityum-iyon piller ve benzin kombinasyonları kullanılmıştır.

Özel olarak tasarlanmış deney düzeneği kullanılarak benzin katkılı açık alan uygulamalarına ilişkin deneysel plan Tablo 3.3'te sistematik biçimde verilmiştir.

Tablo 3.3. Benzin katkılı açık alan uygulamalarına ilişkin deneysel plan.

Deneysel Aşamalar	İzlenen Parametre / Kriter	3.6 V 3200 mAh NMC Li- on Pil+ Benzin	Prizmatik Tip NMC Li-on Pil+ Benzin
Yanma Başlangıcı ve Tetikleyici Koşullar Güvenlik Mekanizmalarının İzlenmesi	Pilde ilk alev oluşumunun gözlemlendiği anın belirlenmesi	X	X
	Benzinin varlığında yangının yayılmaya başladığı kritik sıcaklığın tespit edilmesi	X	X
	Pilin emniyet valfinin açılma anının ve sürecinin izlenmesi	X	X
	Emniyet valfi devreye girdikten sonra yalnızca batarya paketine yangın söndürme maddesinin tatbik edilmesi	X	X
Yangın Süreci ve Söndürme Uygulamaları	Hücre veya paket düzeyinde alevli yanmanın ortaya çıkışının tespit edilmesi	X	X
	Uygulanan yangın söndürme maddesinin (YVSS) batarya yangınlarını kontrol etme ve söndürme performansının incelenmesi	X	X
	Sıcaklık değişimlerinin izlenmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesi	X	X
Termal ve Yakıt Etkilerinin Analizi	Benzin ilavesinin batarya yangınlarının gelişim hızı, şiddeti ve yayılım dinamikleri üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi	X	X

Bu çalışmada hibrit araç yangınlarına yönelik deneysel uygulamalar, iki farklı senaryo çerçevesinde planlanmış ve analiz edilmiştir. Senaryo 1'de, batarya bloğunda meydana gelen termal kaçak süreci üzerinde herhangi bir dış müdahalede bulunulmamış, süreç doğal dinamikleri içerisinde ilerlemesine bırakılmıştır. Bu yaklaşım, termal kaçakın kendiliğinden gelişim sürecinin ayrıntılı biçimde gözlemlenmesine olanak sağlamıştır.

Senaryo 2'de ise, batarya bloğunda başlayan termal kaçak sürecine yüksek viskoziteli sıvı bazlı bir söndürme maddesi uygulanmıştır. Bu uygulamada, sistemin ısı

sürekliği korunarak kullanılan söndürme maddesinin yangın üzerindeki koruyucu ve önleyici etkileri deneysel olarak test edilmiştir.

Her iki senaryonun sonuçları karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiş ve özellikle söndürme maddesinin yangının ilerleme hızını yavaşlatma, yayılımı sınırlama ve kontrol altına alma konusundaki etkinliği ortaya konulmuştur.





4. DENEY SONUÇLARI

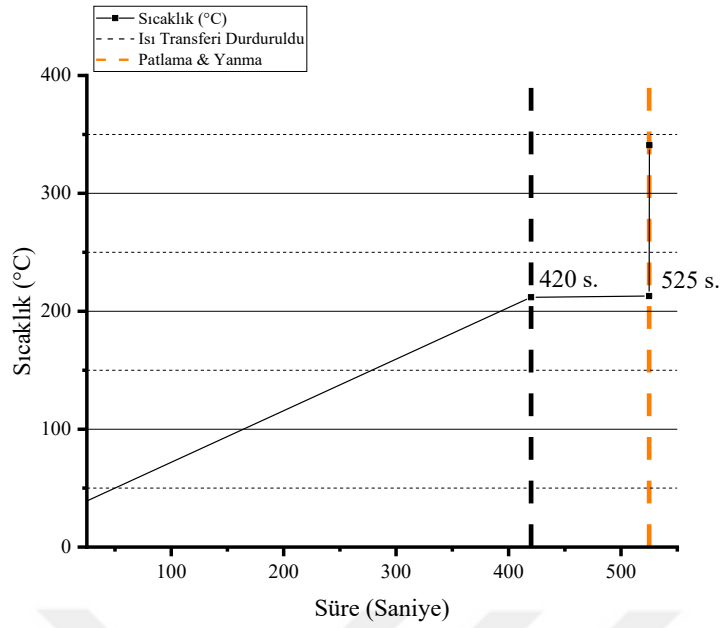
4.1. Kapalı Alan Yangın Deney Sonuçları

Kapalı ortamda deney seti kullanılarak gerçekleştirilen deneyler tek pil yangın deneyi, su ile müdahale deneyi, NOVEC 1230 ile müdahale deneyi, BIOVERSAL ile müdahale deneyi ve Yüksek vizikoziteli sıvı söndürme (YVSS) ile müdahale deneyleri olmak üzere 5 ayrı kombinasyonda gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Tek pil yangın deneyi

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, tek hücreli batarya yanma senaryosu uygulanmıştır. Bu kapsamda, 18650 tipinde, 3,6 V gerilim ve 3200 mAh kapasiteye sahip NMC lityum-iyon pil, iletim metoduyla 150 W elektriksel enerji verilerek 7 dakika boyunca ısıtılmıştır. Bu süre, hücrenin ortalama olarak 8. dakikada patlama eğilimi gösterdiği daha önceki gözlemler doğrultusunda referans olarak seçilmiştir. Pil, içsel bozunma mekanizmasını tetiklemek amacıyla 7 dakika boyunca ısıya maruz bırakılmış ve bu süreç sonunda ekzotermik reaksiyonun dış müdahale olmaksızın devam etmesi sağlanmıştır.

Başlangıç sıcaklığı 28,2 °C olan pil, 7 dakikalık ısıtma süresi sonunda 211,9 °C seviyesine ulaşmıştır. Bu noktada harici ısı transferi sonlandırılmış ve pil davranışı gözlem altında tutulmuştur. Isıtma durdurulduktan sonra da ekzotermik reaksiyonun devam ettiği, hücrenin kendi içinde ısı üretmeye sürdüğü kaydedilmiştir. Yaklaşık 1 dakika 45 saniye sonrasında sıcaklık 212,9 °C değerine çıkmış, bu esnada ani ve yoğun bir gaz salımı gözlenmiştir. Gaz çıkışını takiben yalnızca 22 milisaniye içinde hücrede patlama meydana gelmiş ve yanma başlamıştır. Patlama sonrası sıcaklık, yaklaşık 128 °C'lik artışla 340,9 °C seviyesine yükselmiştir. Bu deneysel bulgular ve sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 4.1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

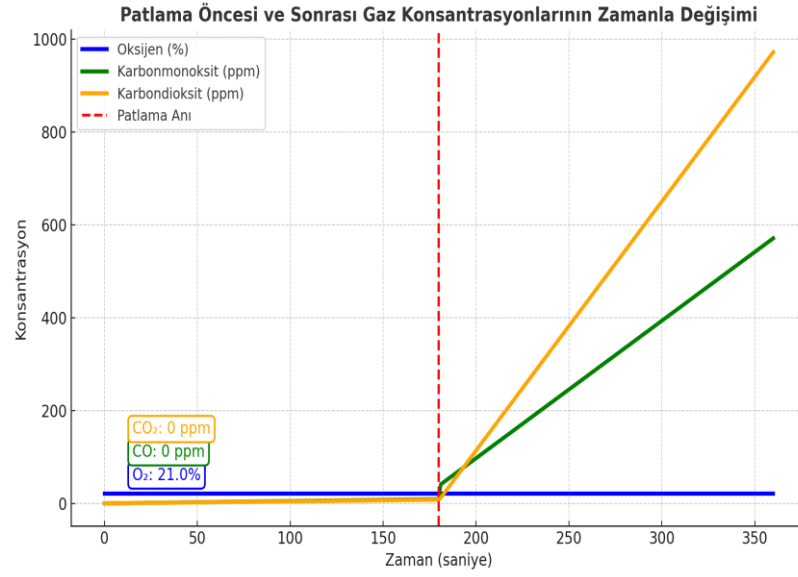


Şekil 4.1. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar.

Patlamadan önce, ortam gaz seviyeleri, %21 oksijen konsantrasyonu, 0 ile 9 ppm arasında değişen karbonmonoksit ve 0 ile 8 ppm arasında değişen karbondioksit seviyeleri gözlemlenmiştir. Patlama anında, ortam oksijen konsantrasyonu hafif bir azalma göstererek %20 ile %21 arasında değişmiş, karbonmonoksit 10 ile 41 ppm aralığına ve karbondioksit seviyesi ise 9 ile 11 ppm aralığına yükselmiştir. Patlamanın ardından, ortam oksijen konsantrasyonu tekrar %21'e dönmüş, ancak karbonmonoksit seviyelerinde önemli bir artış gözlemlenmiş ve 41 ile 571 ppm arasında değişmiştir. Benzer şekilde, karbondioksit seviyesi büyük oranda artış göstererek 12 ile 972 ppm arasında seyretmiştir. Bu değişimler, patlamanın ortam gaz bileşimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Gaz salınımı ve yangın anına ilişkin görseller Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Patlama öncesi ve sonrası gaz konsantrasyonlarının zamanla değişimi ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



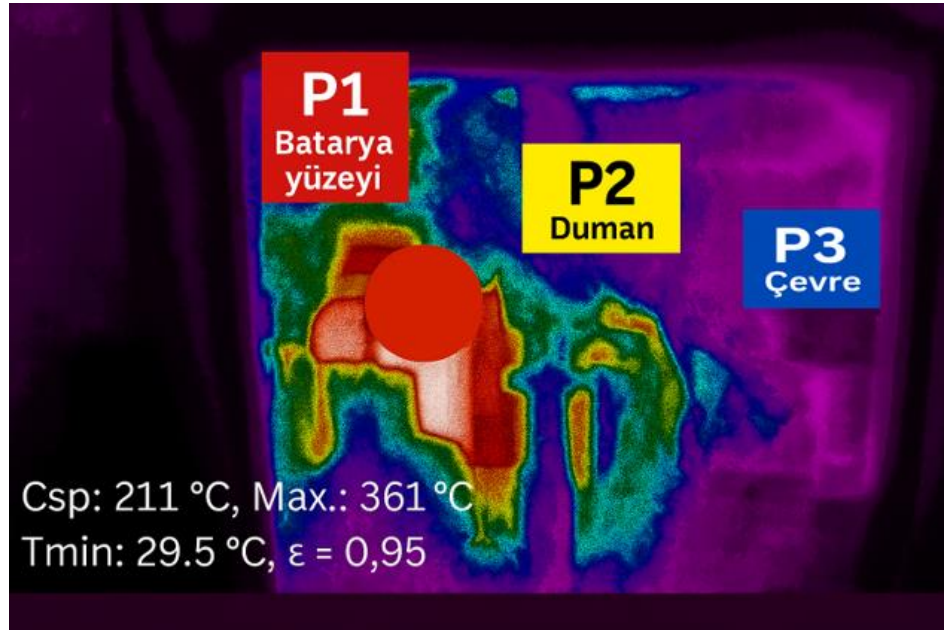
Şekil 4.2. Gaz salınımı ve yangın anına ilişkin görseller.



Şekil 4.3. Patlama öncesi ve sonrası gaz konsantrasyonlarının zamanla değişimi.

Bu kapsamda termal kamera görüntüsünde üç farklı nokta işaretlenmiştir: P1, batarya yüzeyini temsil etmekte olup 213 °C sıcaklığa ulaşmıştır. P2, duman bölgesini göstermekte ve 79,1 °C sıcaklık ölçülmüştür. P3 ise çevre bölgesini temsil etmekte olup 48,3 °C sıcaklığa sahiptir.

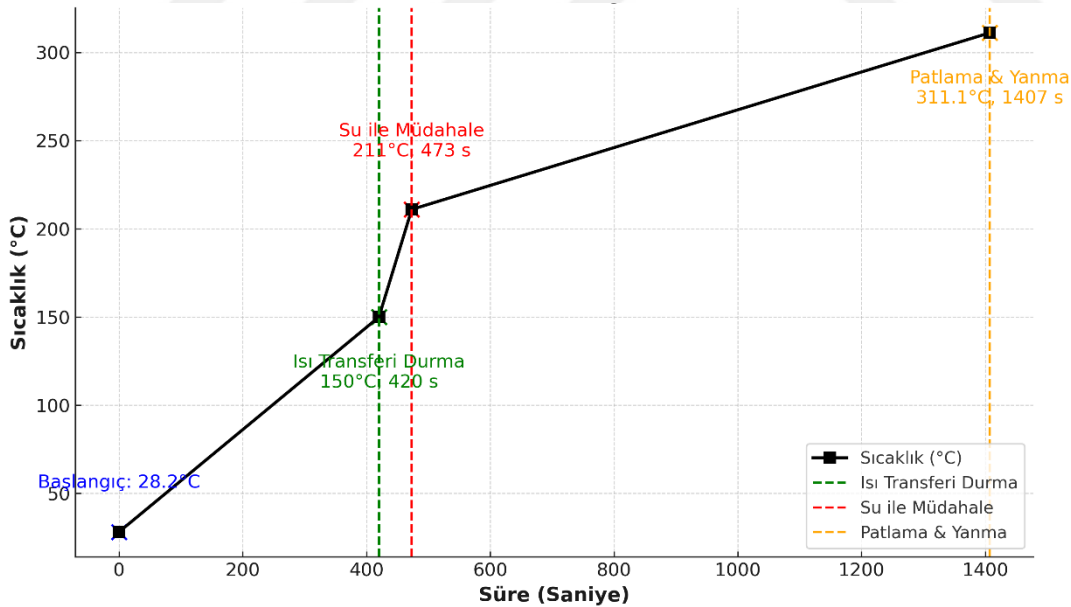
Termal kamera verilerine göre merkez noktası sıcaklığı (Csp) 211 °C, maksimum sıcaklık (Max.) 361 °C, minimum sıcaklık (Tmin) 29,5 °C olarak kaydedilmiştir. Emisyon katsayısı (ϵ) tüm ölçümlerde 0,95 olarak dikkate alınmıştır. Deneye ait termal kamera görüntüsü ve ölçüm verileri Şekil 4.4'te ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Deneye ait termal kamera görüntüsü ve ölçüm verileri.

4.1.2. Su ile müdahale deneyi

Deneyin ikinci aşamasında, söndürücü madde olarak su kullanılmıştır. Bu deneyde, 18650 model 3.6 volt, 3200 mAh NMC lityum iyon pil iletim yoluyla 150 W'lık elektrik enerjisi ile 7 dakika süreyle ısıtılmıştır. Ardından ısı kaynağı durdurulmuş ve pil sürekli olarak gözlemlenmiştir. Bu noktaya kadar ölçülen sıcaklık ve CO₂, CO ile O₂ değerleri, tek pil yanma deneyinde elde edilenlerle benzer olduğundan, bu veriler bu bölümde tekrarlanmamıştır. Isı kaynağının durdurulmasından sonra, pilin ekzotermik reaksiyonu devam etmiş ve sıcaklık artmaya devam etmiştir. Sıcaklık arttıkça, emniyet tapası açılmış ve hemen ardından 5 ml su, emniyet tapası üzerine yerleştirilen bir aparat aracılığıyla pile enjekte edilmiştir. Bu müdahalenin ardından, 15 dakika 34 saniye sonra bir patlama ve yangın meydana gelmiştir. Bu aşamada pilin sıcaklığı, tek pil yanma deneyinde olduğu gibi yaklaşık 210-215 °C'ye ulaşmıştır. Patlamanın ardından sıcaklık hızla yaklaşık 311.1 °C'ye yükselmiştir. Bu veriler Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre, suyun söndürücü madde olarak kullanılması, ısı emme konusunda zayıf bir etki göstermiştir. Bunun nedeni, bataryanın yüksek kalorifik değeri olup, bu durum elektrikli araç yangınlarında büyük miktarlarda su kullanımının gerekliliğini açıklamaktadır.



Şekil 4.5. Batarya termal davranışı: sıcaklık eğrisi ve su ile müdahale etkisi.

Su ile yapılan müdahalenin ardından bataryanın çevresindeki gaz konsantrasyonlarındaki değişimler Tablo 4.1'de sunulmuş olup, bu değerler müdahale

öncesi, müdahale sonrası ve patlama sonrası aşamalar dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.1. Ortam gazları (su ile müdahale).

Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
Su ile müdahale öncesi %21	0 – 10 ppm aralığında, düşük ve ihmal edilebilir seviyede	0 – 12 ppm aralığında, düşük ve doğal ortam seviyelerine yakın
Su ile müdahale sonrası %21	Önce 10 ppm'den 13 ppm'e yükselmiş, kısa süreli olarak 2 ppm'e gerilemiş, ardından ekzotermik reaksiyon etkisiyle patlama öncesi tekrar 37 ppm seviyesine ulaşmıştır	Başlangıçta 12 ppm'den 13 ppm'e yükselmiş, ardından 10 ppm'e düşmüş, fakat patlama öncesinde yeniden artış göstererek 14 ppm seviyesine ulaşmıştır
Patlama sonrası %20 – 21 aralığında	37 – 931 ppm aralığında, toksik seviyelere ulaşarak insan sağlığı açısından ciddi risk oluşturmaktadır	14 – 18 ppm aralığında, nispeten sınırlı bir artış göstermiştir

Deney süresince elde edilen; su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

4.1.3. NOVEC 1230 ile müdahale deneyi

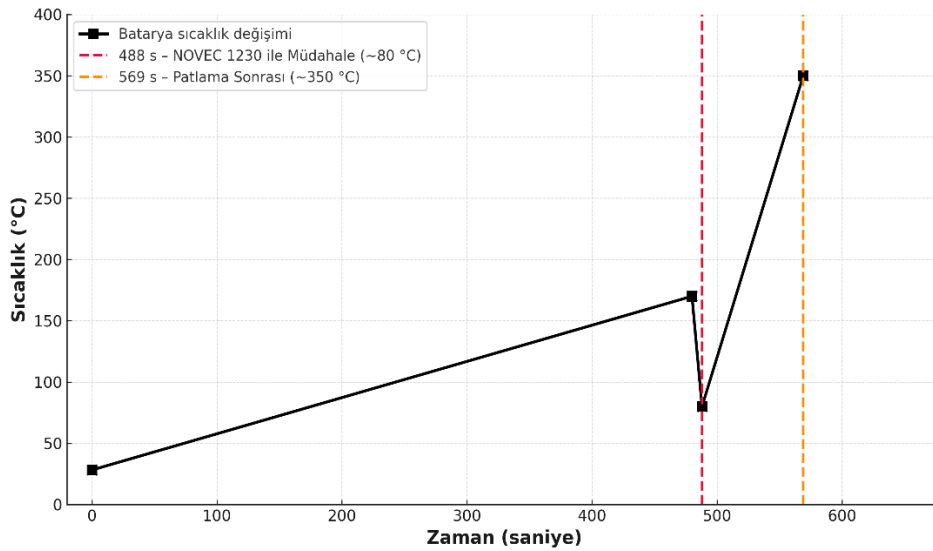
Deneyin bu aşamasında, söndürücü ajan olarak NOVEC 1230 test edilmiştir. NOVEC 1230, esas bileşeni dodekafluoro-2-metilpentan-3-on olan, sıfır ozon tükenme potansiyeline ve oldukça düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip çevre dostu bir yangın söndürücü madde olarak tanımlanmaktadır. Yanmayı, ısıyı absorbe ederek ve yanma zincirini keserek durdurması nedeniyle, özellikle veri merkezleri, müzeler ve tıbbi tesisler gibi hassas alanlarda tercih edilmektedir.

Bu deney kapsamında, 18650 tipi, 3,6 V gerilime ve 3200 mAh kapasiteye sahip NMC lityum-iyon pil iletim yoluyla 150 W elektrik enerjisi kullanılarak ısıtılmıştır. Isıtma işleminin 8. dakika 8. saniyesinde emniyet tapasında köpürme belirlenmiş ve

pil sıcaklığı 164,8–180 °C aralığında ölçülerek kaydedilmiştir. Bu esnada 5 ml NOVEC 1230 enjeksiyonu yapılmış ve pilin davranışı izlenmiştir.

NOVEC 1230'un uygulanmasının ardından pil sıcaklığı yaklaşık 20 saniye içinde 61,5–100,4 °C seviyelerine kadar düşmüştür. Bununla birlikte, söndürücü etkisine rağmen uygulamadan 81 saniye sonra pilde patlama meydana gelmiş ve alevli yanma gözlenmiştir. Patlama ve yanma sırasında sıcaklık 178,9 °C ile 349,7 °C aralığında seyretmiş, ardından pil yaklaşık 43 saniye boyunca yanmaya devam etmiştir.

Elde edilen bulgular Şekil 4.7'de sunulmakta olup, sonuçlar NOVEC 1230'un kısa süreli sıcaklık düşüşü sağladığını, ancak batarya hücresindeki ekzotermik reaksiyonun tamamen bastırılmadığını göstermektedir.



Şekil 4.7. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (NOVEC 1230 ile müdahale).

Deney sürecinde elde edilen sonuçlar, üç temel aşama üzerinden sistematik biçimde incelenmiş; ölçülen emisyon parametreleri ise Tablo 4.2'de derlenerek sunulmuştur.

Tablo 4.2. NOVEC 1230 söndürücü uygulamasına ait ortam gaz konsantrasyonları.

Deney Aşaması	Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
NOVEC 1230 ile müdahale öncesi	%21	0 ila 9 ppm arasında	0 ila 11 ppm arasında
NOVEC 1230 ile müdahale sonrası	%21	9 ila 328 ppm arasında	11 ila 15 ppm arasında
Patlama sonrası	%17 – 21 aralığında	328 ila 1610 ppm arasında	15 ila 37 ppm arasında

Deney süresince elde edilen; NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

4.1.4. BIOVERSAL ile müdahale deneyi

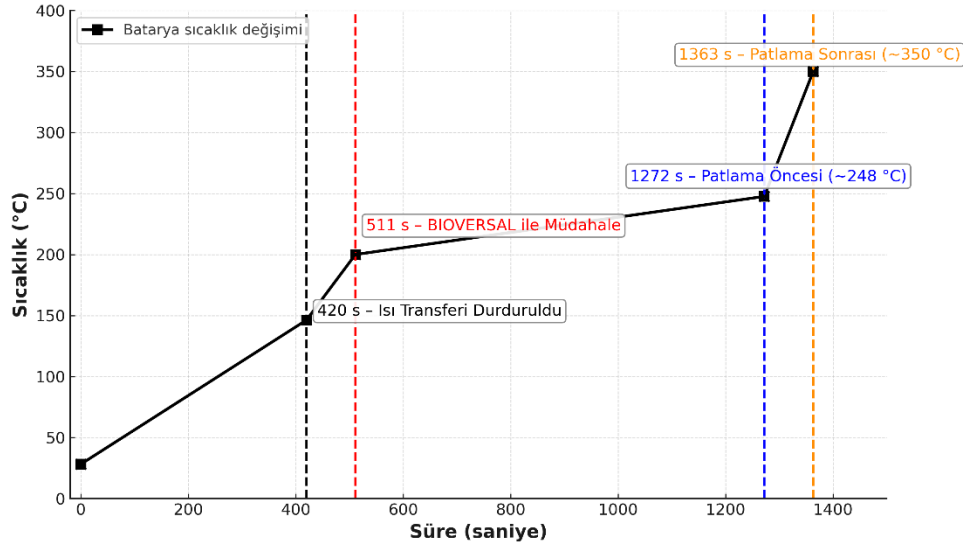
Deneyin üçüncü aşamasında, alternatif bir söndürücü ajan olarak BIOVERSAL kullanılmıştır. BIOVERSAL; bitkisel kökenli, biyolojik olarak parçalanabilir yapısı sayesinde çevre dostu kabul edilen bir kimyasal olup, hidrokarbon temelli yangınlarda kapsülleme ve izole etme mekanizmasıyla etkili olabilmektedir. Bu özellikleri, yanıcı bileşiklerin oksijen ile temasını engelleyerek alevlenmenin baskılanmasını ve yanma sonrası toksik kalıntıların azaltılmasını sağlamaktadır.

Çalışmada, 18650 formunda, 3,6 V nominal gerilime ve 3200 mAh kapasiteye sahip NMC lityum-iyon hücre tercih edilmiştir. Pil, deney düzeneğinde 150 W elektriksel güç uygulanarak 7 dakika boyunca iletim yoluyla ısıtılmış, ardından harici enerji kesilerek serbest tepkime süreci izlenmiştir. Bu noktaya kadar kaydedilen sıcaklık ve gaz parametreleri (O_2 , CO ve CO_2), tek hücreli referans deneyin sonuçları ile paralellik gösterdiğinden, tekrar verilmemiştir.

Harici ısı kaynağının durdurulmasıyla hücrede ekzotermik tepkimeler sürmüştür ve sıcaklık artışı devam etmiştir. Artan sıcaklık sonucu emniyet tapasının açılmasıyla birlikte, deney düzeneğine entegre edilen özel bir aparat yardımıyla 5 ml BIOVERSAL doğrudan batarya üzerine uygulanmıştır. Bu sırada pil sıcaklığı 146,3 °C düzeyine ulaşmıştır.

BIOVERSAL enjeksiyonundan yaklaşık 14 dakika 12 saniye sonra bataryada patlama ve alevli yanma meydana gelmiştir. Tutuşma öncesinde sıcaklığın 247,6 °C seviyesine çıktığı, ardından yanma sürecinin hızlandığı gözlemlenmiştir.

Sonuçlar, Şekil 4.9’da sunulmuş olup, BIOVERSAL’ın ilk aşamada sıcaklık yükselişini yavaşlatıcı bir etkisi olsa da, ekzotermik reaksiyonun ilerleyen safhalarında batarya yangınına tamamen bastırmaya yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (BIOVERSAL ile müdahale).

Deney sürecinde elde edilen sonuçlar, üç temel aşama üzerinden sistematik biçimde incelenmiş; ölçülen emisyon parametreleri ise Tablo 4.3’te derlenerek sunulmuştur.

Tablo 4.3. Ortam gazları (BIOVERSAL ile müdahale).

Deney Aşaması	Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
BIOVERSAL ile müdahale öncesi	%21	0 – 17 ppm aralığında, düşük ve ihmal edilebilir seviyededir.	0 – 10 ppm aralığında, doğal ortama yakındır.
BIOVERSAL ile müdahale sonrası	%20 – 21 aralığında	CO değeri başlangıçta 17 ppm’den kademeli olarak 2 ppm’e düşmüş, ancak kısa süre içerisinde tekrar yükselerek patlama öncesinde 84 ppm seviyesine ulaşmıştır.	10 – 11 ppm aralığında sabit kalmıştır.
Patlama sonrası	%20 – 21 aralığında	CO konsantrasyonu ani bir artışla 200 – 1025 ppm aralığına çıkmış ve toksik düzeylere ulaşmıştır.	14 – 18 ppm aralığında ölçülmüştür.

Deney sürecinde kaydedilen BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımları ve yangın anlarına ilişkin görseller Şekil 4.10’da sunulmuştur.



Şekil 4.10. BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

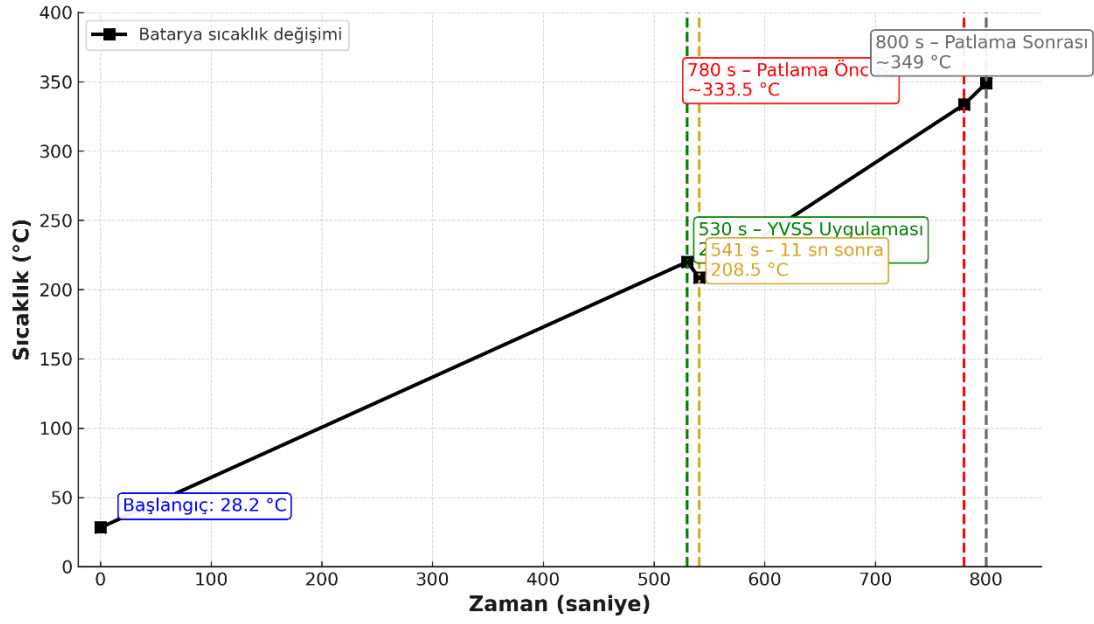
4.1.5. Yüksek vizikoziteli sıvı söndürme (YVSS) maddesi ile müdahale deneyi

Kapalı alan deneysel çalışmanın son etabında, yangınla mücadelede alternatif bir çözüm olarak yüksek vizikoziteli sıvı söndürücü (YVSS) test edilmiştir. Bu deneyde kullanılan hücre, 18650 formatında, 3,6 V nominal gerilim ve 3200 mAh kapasiteye sahip NMC lityum-iyon batarya olmuştur. Pil, kurulan deney düzeninde 150 W gücünde elektriksel ısıtma ile sürekli enerjiye maruz bırakılmıştır. Isıtma sırasında emniyet tapasının açılmasıyla eşzamanlı olarak 10 ml YVSS uygulanmış ve sonrasında hücrenin davranışı dikkatle takip edilmiştir.

Yaklaşık 8 dakika 50 saniyelik ısıtma sonunda bataryanın sıcaklığı 220 °C düzeyine çıkmıştır. YVSS müdahalesinden 2 saniye sonra sıcaklıkta belirgin bir düşüş kaydedilmiş, 11 saniye içinde 208,5 °C seviyelerine gerileme olmuştur. Ancak bu geçici etkiden sonra sıcaklığın yeniden yükselmeye başladığı görülmüştür. Batarya, yaklaşık 3 dakika 36 saniye süreyle söndürücü maddenin etkisi altında kalmış ve bu esnada ani alevlenme ile hızlı sıcaklık yükselişi önlenmiştir.

Gaz çıkışının artmasıyla birlikte hücrede yaklaşık 125 °C ek sıcaklık artışı meydana gelmiş ve ardından patlama gözlemlenmiştir. Patlamayı takiben batarya yaklaşık 30 saniye süreyle kontrollü şekilde yanmaya devam etmiştir.

Bu deneysel bulgular, Şekil 4.11’de sunulan sıcaklık-zaman eğrisi üzerinde kritik aşamalarla birlikte gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (YVSS ile müdahale).

Deney sürecinde elde edilen sonuçlar, üç temel aşama üzerinden sistematik biçimde incelenmiş; ölçülen emisyon parametreleri ise Tablo 4.4'te derlenerek sunulmuştur.

Tablo 4.4. YVSS uygulamasına ait ortam gaz konsantrasyonları.

Deney Aşaması	Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
YVSS ile müdahale öncesi	%21	0 – 7 ppm aralığında, düşük ve ihmal edilebilir seviyede	0 – 11 ppm aralığında, doğal ortama yakın
YVSS ile müdahale sonrası	%21	Başlangıçta 7 ppm'den 3 ppm'e düşmüş, ancak kısa süre içinde yeniden yükselerek patlama öncesi 24 ppm seviyesine ulaşmıştır.	10 – 11 ppm aralığında sabit kalmıştır.
Patlama sonrası	%20 – 21 aralığında	24 – 659 ppm (toksik seviyeler)	10 – 19 ppm aralığında ölçülmüştür.

Deney sırasında kaydedilen gaz emisyonları, YVSS müdahalesine ilişkin süreç ile yangın öncesi ve yangın anına ait görsel bulgular Şekil 4.12'de sunulmaktadır.



Şekil 4.12. Gaz salınımı, YVSS müdahalesi, yangın öncesi ve yangın.

4.1.6. Kapalı alan deney sonuçlarının karşılaştırılması

Tek hücreli lityum-iyon pil yangını üzerine gerçekleştirilen deneylerde, farklı söndürücü ajanların uygulanmasının ardından meydana gelen patlama ve yanma süreçlerinde ortam gazlarının değişimi incelenmiştir. Yapılan ölçümler, oksijen (O_2), karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) konsantrasyonlarının olayın şiddetine ve kullanılan söndürücü tipe bağlı olarak farklı eğilimler sergilediğini göstermektedir.

Referans deney olan tek hücreli yangın senaryosunda, O_2 seviyesi sabit şekilde %21’de kalırken, CO değerleri 41–571 ppm aralığında yükselmiş, CO_2 konsantrasyonları ise 12–972 ppm gibi oldukça geniş bir dağılım göstermiştir. Bu durum, doğrudan alevli yanma koşullarında yüksek miktarda gaz salınımı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Su müdahalesinin ardından meydana gelen patlama ve yanma sürecinde, O_2 konsantrasyonu %20–21 aralığında kalmıştır. CO seviyeleri 37 ppm’den 931 ppm’e kadar artış göstermiştir. CO_2 ise görece daha kararlı bir seyir izleyerek 14–18 ppm aralığında sabit kalmıştır. Bu sonuç, suyun kısmen soğutucu etkisi bulunsa da gaz emisyonlarını tamamen kontrol altına alamadığını göstermektedir.

NOVEC 1230 uygulamasında, O_2 değerleri %17–21 aralığında dalgalanmış, CO emisyonları 41–571 ppm arasında kalmış, CO_2 seviyeleri ise 15–37 ppm aralığında ölçülmüştür. Bu tablo, NOVEC 1230’un oksijen tüketimini kısmen artırdığını, ancak karbonmonoksit üretimini sınırlı düzeyde tutabildiğini göstermektedir.

BIOVERSAL müdahalesi sonrasında gerçekleşen patlama ve yanma olayında, O_2 seviyeleri %20–21 arasında kalmıştır. CO konsantrasyonları ise diğer ajanlara kıyasla daha yüksek bir artış göstererek 200–1025 ppm aralığında kaydedilmiştir. CO_2 konsantrasyonları ise önceki deneylerle tutarlı şekilde 14–18 ppm aralığında sabit

kalmıştır. Bu durum, BIOVERSAL'ın başlangıçta yangını geciktirici etki sağladığını ancak ekzotermik süreci uzun vadede baskılayamadığını göstermektedir.

Son olarak, YVSS uygulamasında patlama sonrası O₂ konsantrasyonlarının %20–21 arasında kaldığı, CO değerlerinin ise 24–659 ppm aralığında ölçüldüğü görülmüştür. CO₂ seviyeleri ise 10–19 ppm aralığında seyretmiştir. Bu bulgular, YVSS'nin gaz salınımını özellikle karbonmonoksit açısından önemli ölçüde sınırladığını, böylece diğer söndürücülere kıyasla daha kontrollü bir yanma süreci sağladığını ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda elde edilen kapalı alan deney sonuçları karşılaştırma tablosu Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

Tablo 4.5. Kapalı alan deney sonuçları karşılaştırma tablosu.

Deney Senaryosu	Kritik sıcaklık (yanma/patlama)	Kritik sıcaklığa ulaşma zamanı	Müdahale sonrası kritik sıcaklığa ulaşma süresi	Yanma ve Patlama sonrası ortam gaz değerleri
Tek pil yanma deneyi (ısı enerjisi 7. dakikada kesildi)	~213 °C	8 dk. 51 sn.	(Söndürme maddesi ile müdahale yapılmadı)	O ₂ : 21%, CO: 41 to 571 ppm CO ₂ : 12 to 972 ppm
Su ile müdahale deneyi (ısı enerjisi 7. dakikada kesildi)	~ 215°C	-	15 dk. 34 sn.	O ₂ : 20 - 21%, CO: 37 to 931 ppm CO ₂ : 14 to 18 ppm
NOVEC 1230 ile müdahale deneyi (harici ısı kaynağı kesintisiz sürdürüldü)	~ 236,2 °C	-	1 dk 21 sn. (toplam deney süresi 9 dk. 29 sn.)	O ₂ : 17 - 21%, CO: 328 to 1610 ppm CO ₂ : 15 to 37 ppm
BIOVERSAL ile müdahale deneyi (ısı enerjisi 7. dakikada kesildi)	~ 247,6 °C	-	14 dk. 12 sn.	O ₂ : 20 - 21%, CO: 200 to 1025 ppm CO ₂ : 14 to 18 ppm
YVSS ile müdahale deneyi (harici ısı kaynağı kesintisiz sürdürüldü)	~247°C	-	3 dk. 36 sn. (toplam deney süresi 12 dk. 25 sn.)	O ₂ : 20 - 21%, CO: 24 to 659 ppm CO ₂ : 10 to 19 ppm

Farklı deneysel koşullar altında gerçekleştirilen çalışmalar, yangın ve patlama sıcaklıklarına ulaşma sürelerinin söndürücü madde türü ve ısı uygulama yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Tek hücreli pil yanma

senaryosunda, ısı enerjisinin yedinci dakikada kesilmesiyle birlikte, yangın ve patlama olayının 8 dakika 51 saniye sonra gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Su ile müdahalenin gerçekleştirildiği deneyde ise benzer şekilde ısı enerjisi yedinci dakikada kesilmiş olmasına rağmen, yangın ve patlamaya ulaşma süresinin uzadığı ve 15 dakika 34 saniyeye çıktığı gözlemlenmiştir. Sürekli ısıtmanın sağlandığı NOVEC 1230 uygulamasında, kritik sıcaklık değerine oldukça kısa bir sürede, yalnızca 1 dakika 21 saniyede ulaşıldığı belirlenmiştir.

BIOVERSAL müdahalesi ile yürütülen deneyde ise ısı enerjisinin tekrar yedinci dakikada kesilmesi sonucunda, yangın ve patlamanın 14 dakika 12 saniye sonra meydana geldiği kaydedilmiştir. Sürekli ısıtmanın uygulandığı YVSS deneyinde ise bataryanın yangın ve patlamaya ulaşma süresi yalnızca 3 dakika 36 saniye olarak saptanmıştır.

Bu bulgular, farklı söndürme ajanlarının ve ısı enerjisi sağlama yöntemlerinin, bataryaların kritik sıcaklıklara erişim sürecini doğrudan etkilediğini ve yangın güvenliği açısından farklı düzeylerde koruma sağladığını ortaya koymaktadır.

4.2. Açık Alan Yangın Deney Sonuçları

Açık alan yangın deneyleri için oluşturulan düzenek kapsamında, riskli olduğu değerlendirilen benzin eşlikli yanma deneyleri ile kapalı alanda daha önce gerçekleştirilen söndürme maddesi deneylerinin en etkili olanı olarak belirlenen yüksek vizkositeli sıvı söndürme maddesinin (YVSS) müdahale etkileri incelenmiştir.

Bu kapsamda yürütülen deneysel çalışmalar üç aşamalı olarak planlanmıştır:

- Kontrol deneyleri: YVSS müdahalesi olmadan, yalnızca benzin ile birlikte prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pil üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.
- YVSS müdahaleli deney (silindirik pil): Benzin ile birlikte 6 hücreli 18650 silindirik pil üzerinde YVSS söndürme maddesi uygulanarak yangına müdahale edilmiştir.
- YVSS müdahaleli deney (prizmatik pil): Benzin eşlikli yangın senaryosunda prizmatik tip pil üzerinde YVSS söndürme maddesinin etkinliği test edilmiştir.

Bu deneyler sonucunda, YVSS'nin özellikle benzin kaynaklı ısı yükü ile tetiklenen pil yangınlarında etkili bir baskılama mekanizması oluşturduğu gözlenmiş, kontrol deneyleri ile karşılaştırmalı analiz imkânı sağlanmıştır.

4.2.1. Benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pil deneyi (YVSS uygulamasız)

Bu çalışma, deney düzeneğinde bulunan yakıt yakma kabına yerleştirilen 2 litre benzinin pürmüz ile tutuşturulması ile başlatılmıştır. Deney süresince düzende hem prizmatik tip pil hem de 6 hücreli 18650 silindirik pil bloğu birlikte gözlemlenmiş, bu pillerin yakıt yanmasından kaynaklanan ısı yayılımına verdikleri tepkiler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sıcaklık değişimleri, 18650 pil bloğu için T1 konumuna bağlanan K tipi termokupl, prizmatik pil için ise T2 konumuna bağlanan K tipi termokupl aracılığıyla kaydedilmiştir. Deney boyunca yanma reaksiyonu herhangi bir dış müdahale yapılmaksızın doğal seyri içerisinde ilerlemiştir.

Yakıt tutuşturulmadan önce ölçülen sıcaklık değerleri T1 için 27,0 °C, T2 için 24,5 °C olarak kaydedilmiştir. Deneyin 466. saniyesinde T1 sıcaklığı 112,0 °C, T2 sıcaklığı ise 89,0 °C'ye yükselmiştir. İlerleyen aşamalarda, 570. saniyede 18650 pil bloğundaki ilk hücrenin emniyet valfi açılmış, bu anda T1 sıcaklığı 135,8 °C, T2 sıcaklığı 107,8 °C olmuştur. 578. Saniyede ikinci hücre emniyet valfi açılmış, T1 136,5 °C, T2 108,9 °C; 618. saniyede üçüncü hücre emniyet valfi açıldığında T1 148,5 °C, T2 117,6 °C olarak ölçülmüştür. 619. Saniyede dördüncü hücrenin emniyet valfi açıldığında T1 149,8 °C, T2 119,1 °C; 630. saniyede beşinci hücre emniyet valfi açıldığında T1 156,6 °C, T2 120,0 °C olarak kaydedilmiştir. Son olarak, 635. Saniyede altıncı hücre emniyet valfi açılmış ve bu anda T1 sıcaklığı 158,2 °C, T2 sıcaklığı 123,1 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14 (h)).

Deneyin 657. saniyesinde 18650 pil bloğunda yaklaşık 7 saniye süren termal kaçak ve jet alevleri gözlenmiş, bu sırada T1 sıcaklığı 184,6 °C, T2 sıcaklığı 124,2 °C olmuştur. Bunu, 669. saniyede gerçekleşen ve yaklaşık 9 saniye süren ikinci termal kaçak izlemiş, bu anda T1 sıcaklığı 206,3 °C, T2 sıcaklığı 131,7 °C değerine ulaşmıştır. Deneyin 683. saniyesinde ise yaklaşık 7 saniye süren üçüncü termal kaçak ve jet alevleri yaşanmış; T1 sıcaklığı 211,6 °C, T2 sıcaklığı 133,4 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.14 (k)).

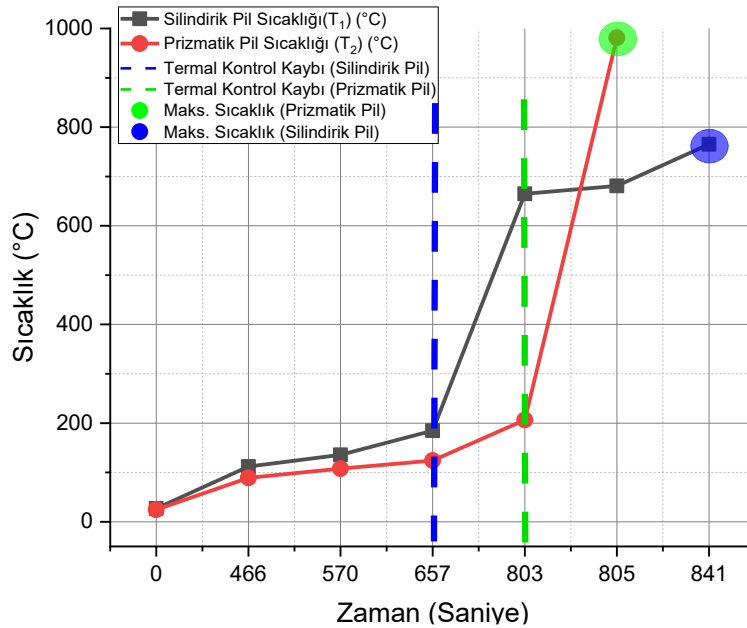
Deneyin 803. saniyesinde prizmatik tip pilin emniyet valfi açılmış ve bu anda T1 sıcaklığı 664,8 °C, T2 sıcaklığı 206,4 °C olmuştur. Deney süresince ölçülen en

yüksek T2 değeri 805. saniyede gerçekleşmiş ve 981,3 °C'ye ulaşmıştır; aynı anda T1 sıcaklığı 681,0 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14 (l)). Takip eden süreçte, 841. saniyede deneyin en yüksek T1 değeri kaydedilmiş, prizmatik pilde emniyet valfi açılmıştır. Bu anda T1 sıcaklığı 765,4 °C, T2 sıcaklığı ise 208,9 °C olmuştur (Şekil 4.14 (m)).

Deneyin 1316. saniyesinde prizmatik tip pilde eş zamanlı termal kaçak ve jet alevleri gözlenmiş, T1 sıcaklığı 481,5 °C, T2 sıcaklığı ise 197,4 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 4.14 (n)). Yanma süreci prizmatik tip pilde 1399. saniyede de devam etmiş, bu sırada T1 sıcaklığı 454,6 °C, T2 sıcaklığı 225,2 °C olmuştur.

Deneyin 1532. saniyesinde prizmatik tip pildeki yanma sona ermiş, ancak düşük seviyede gaz salınımı gözlemlenmiştir. Bu anda T1 sıcaklığı 425,8 °C, T2 sıcaklığı ise 277,5 °C olarak kaydedilmiştir. Deney sonunda, 6 adet 18650 tipi NMC lityum-iyon pil hücresinin tamamının termal olaylardan geçtiği, hem lityum-iyon hücrelerin hem de prizmatik pilin reaksiyon sürecini tamamladığı belirlenmiştir. Buna karşılık benzin yanmaya devam etmiş ve deney, güvenlik gerekçesiyle harici müdahale ile sonlandırılmıştır.

Yangın söndürücü müdahalesi olmaksızın gerçekleştirilen deneyden elde edilen grafiksel veriler Şekil 4.13'te ve deneye ilişkin görseller Şekil 4.14'te sunulmaktadır.



Şekil 4.13. Söndürücü madde uygulaması olmadan yapılan deney: benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pilin gözlemlerinin grafiksel gösterimi.

		
(a) İlk tutuşturma T1: 27,0 °C / T2: 24,5 °C	(b) Sıcaklık değeri T1: 112,0 °C / T2: 89,0 °C	(c) 18650 Pil emniyet valfi açılması-1 sıcaklık değeri T1: 135,8 °C / T2: 107,8 °C
		
(d) 18650 Pil emniyet valfi açılması-2 sıcaklık değeri T1: 136,5 °C / T2: 108,9 °C	(e) 18650 Pil emniyet valfi açılması-3 sıcaklık değeri T1: 148,5 °C / T2: 117,6 °C	(f) 18650 Pil emniyet valfi açılması-4 sıcaklık değeri T1: 149,8 °C / T2: 119,1 °C
		
(g) 18650 Pil emniyet valfi açılması-5 sıcaklık değeri T1: 156,6 °C / T2: 120,0 °C	(h) 18650 Pil emniyet valfi açılması-6 sıcaklık değeri T1: 158,2 °C / T2: 123,1 °C	(i) 18650 Pil termal kaçak ve jet alevleri sıcaklık değeri T1: 184,6 °C / T2: 124,2 °C
		
(j) 18650 Pil termal kaçak ve jet alevleri sıcaklık değeri T1: 206,3 °C / T2: 131,7 °C	(k) 18650 Pil termal kaçak ve jet alevleri sıcaklık değeri T1: 211,6 °C / T2: 133,4 °C	(l) Prizmatik tip pil en yüksek sıcaklık değeri T1: 681,0 °C / T2: 981,3 °C
		
(m) 18650 Tipi pil en yüksek sıcaklık değeri/prizmatik pil emniyet valfi açılması T1: 765,4 °C / T2: 208,9 °C	(n) Prizmatik tip pil termal kaçak ve jet alev sıcaklık değeri T1: 481,5 °C / T2: 197,4 °C	(o) Prizmatik tip pil yanma yok gaz çıkışı sıcaklık değeri T1: 425,8 °C / T2: 277,5 °C

Şekil 4.14. Söndürücü madde uygulaması olmadan yapılan deney: benzin, prizmatik tip pil ve 6 hücreli 18650 silindirik pil deney görselleri.

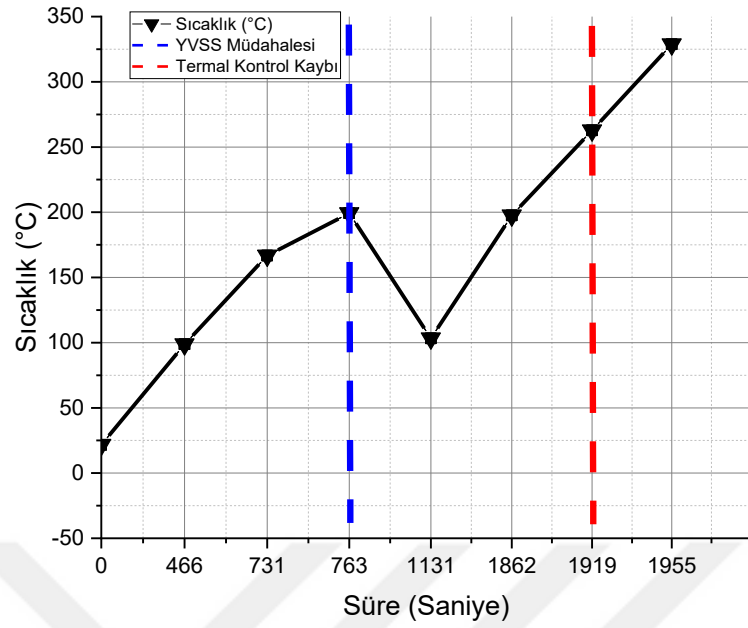
4.2.2. YVSS müdahalesi ile benzin ve 18650 silindirik 6 hücreli li-ion pil deneyi

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler, yakıt yanma haznesine yerleştirilen 2 litre benzinin pürmüz yardımıyla tutuşturulmasıyla başlatılmıştır. Deneylerde, pillerin emniyet valfleri açıldıktan hemen sonra yalnızca pil bloğuna müdahale edilmiş ve bu müdahalede daha önce kapalı ortam koşullarında Li-ion piller üzerinde etkinliği test edilmiş olan, özel karışımı içeren yüksek viskoziteli sıvı bazlı bir yangın söndürücü madde kullanılmıştır. Benzin ve 6 hücreli 18650 silindirik pil bloğu üzerinde müdahale öncesinde, sırasında ve sonrasında elde edilen deneye ait görüntüler Şekil 4.15’de ve verilere ilişkin grafiksel karşılıklar ise Şekil 4.16’da sunulmaktadır. Yakıt tutuşturması yapılmadan önce, T1 noktasına bağlanan K tipi termokupl ile ölçülen pil bloğu sıcaklığı 21,6 °C olarak kaydedilmiştir. Deneyin 466. saniyesinde bu değer 98,7 °C’ye yükselmiştir. Ardından 700. saniyede ilk emniyet valfi açılmış ve sıcaklık 143,5 °C’ye ulaşmıştır. Takip eden aşamalarda 731. saniyede ikinci emniyet valfi 166,8 °C’de, 734. saniyede üçüncü valf 171,9 °C’de, 735. saniyede dördüncü emniyet valfi 173,3 °C’de, 737. saniyede beşinci ve altıncı emniyet valfi 175,6 °C’de, 758. saniyede ise altıncı valf 195,4 °C’de açılmıştır. Bu aşamadan sonra 763. saniyede sıcaklık 199,2 °C’ye ulaştığında, özel yüksek viskoziteli sıvı bazlı söndürücü (YVSS) madde yalnızca pil bloğuna uygulanmıştır.

Müdahale sonrası süreçte 1751. saniyede termal kaçak gözlenmiş, küçük ölçekli alevler ortaya çıkmış ve sıcaklık 150,7 °C’ye düşmüştür. Ancak 1919. saniyede yeniden termal kaçak meydana gelmiş, iki saniye sonra jet alevleri gözlenmiş ve sıcaklık 262,7 °C’ye ulaşmıştır. 1922. saniyede pilin yapısal bütünlüğü bozulmuş, üst kısımdan bakır parçacıkların fırladığı gözlenmiş ve sıcaklık 268,1 °C olarak kaydedilmiştir. Bu aşamadan sonra sıcaklık bir miktar düşmüş ancak 1957. saniyede tekrar termal kaçak yaşanmış ve sıcaklık 260,8 °C olmuştur. 1958. saniyede jet alevleri eşliğinde patlamalar gözlenmiş, 1986. saniyede son kez termal kaçak meydana gelmiş ve 1988. saniyede bir patlama daha kaydedilmiştir. Bu sırada sıcaklık 102,4 °C’ye gerilemiş ve pil bloğundaki tüm 18650 tip Lityum-İyon (NMC) hücrelerin reaksiyon süreci tamamlanmıştır. Deney süresince benzin yanmaya devam etmiş ve harici müdahale ile söndürülmüştür. Bu deneyde ölçülen en yüksek sıcaklık, 1955. saniyede ulaşılan 328,7 °C olarak kayıtlara geçmiştir.

		
(a) İlk tutuşturma	(b) Pil bloğu sıcaklığı 98,7 °C	(c) Emniyet valfi-1 açılması sıcaklık değeri 166,8 °C
		
(d) Emniyet valfi-2 açılması sıcaklık değeri 171,9 °C	(e) Emniyet valfi açılması-3 sıcaklık değeri 173,3 °C	(f) Emniyet valfi açılması-4 sıcaklık değeri 175,6 °C
		
(g) Emniyet valfi açılması-5, 6 sıcaklık değeri 175,6 °C	(h) Söndürme maddesi uygulama sıcaklık değeri 199,2 °C	(i) Yeniden gaz çıkışı ve pil bloğu üzerinde küçük alevlenme sıcaklık değeri 150,7 °C
		
(j) Termal kaçak sıcaklık değeri 256,6 °C	(k) Jet Alevler sıcaklık değeri 262,7 °C	(l) Patlama ve pil içinin dağılması sıcaklık değeri 268,1 °C
		
(m) Termal Kaçak Sıcaklık Değeri 260,8 °C	(n) Patlama ve pil içinin dağılması sıcaklık değeri 239,6 °C	(o) Patlama ve pil içinin dağılması sıcaklık değeri 102,4 °C

Şekil 4.15. Benzin ve 6 hücreli 18650 silindirik pil bloğu üzerinde yangın söndürücü müdahalesi deneyine ait görseller.



Şekil 4.16. Söndürücü madde uygulamalı yapılan deney: benzin ve 6 hücreli 18650 silindirik pil gözlemlerinin grafiksel gösterimi.

4.2.3. YVSS müdahalesi ile benzin ve 18650 prizmatik tip pil deneyi

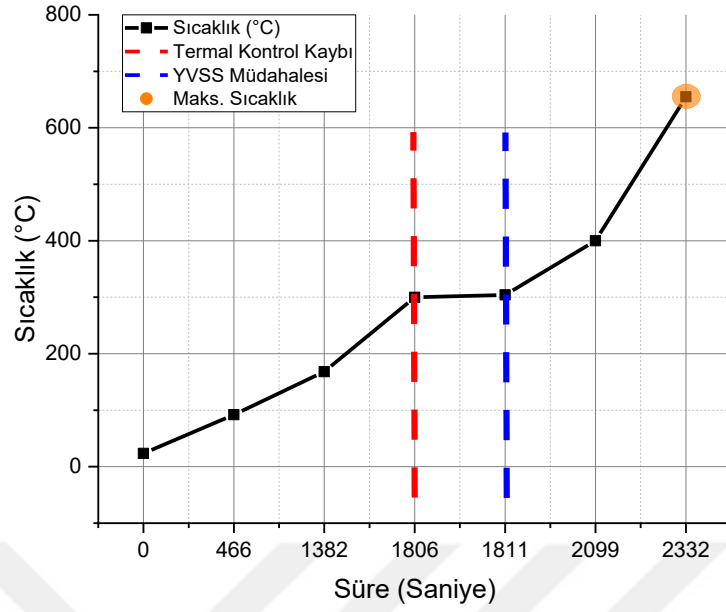
Bu çalışmada, deneyler yakıt yanma haznesine yerleştirilen 2 litre benzinin pürmüz ile tutuşturulması ile başlatılmıştır. Pil üzerindeki emniyet tapası açıldıktan hemen sonra, daha önce kapalı ortam deneylerinde lityum-iyon piller üzerinde etkinliği test edilmiş olan yangın söndürücü madde, yalnızca pil bloğuna uygulanmıştır. Benzin ve prizmatik tip pil deneyinde yangın söndürücü müdahalesine ait görseller Şekil 4.17’de ve müdahale öncesinde, müdahale sırasında ve sonrasında elde edilen sıcaklık, olay ve zaman verilerinin grafiksel gösterimi ise Şekil 4.18’de sunulmaktadır.

Yakıt tutuşturulmadan önce K tipi termokupl ile ölçülen pil bloğu sıcaklığı 23,5 °C olarak kaydedilmiştir. Deneyin 466. saniyesinde bu değer 91,9 °C’ye yükselmiş, 1382. saniyede ise sıcaklık 168,2 °C olarak ölçülmüştür. 1806. saniyede, pil üzerinde termal kaçak ve jet alevleri gözlenmiş, sıcaklık 299,8 °C’ye ulaşmıştır (Şekil 4.17 (d)). Sadece bir saniye sonra sıcaklık 319,6 °C seviyesine yükselmiştir. Bu aşamanın ardından, pil üzerine yangın söndürücü madde ile üç ayrı zaman aralığında müdahale gerçekleştirilmiştir. 1811. saniyede yapılan ilk müdahale sırasında sıcaklık 304,1 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.17 (f)).

Deneyin 2099. saniyesinde termokupl tarafından kaydedilen sıcaklık 399,8 °C olmuştur. 2155. saniyede benzin yanması harici müdahale ile söndürülmüş ve bu noktadan itibaren pil üzerindeki sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, pil üzerindeki yanma sona ermiş; ancak 210 saniye boyunca yoğun duman salınımı gözlemlenmiştir (Şekil 4.17 (k)). 2155. Saniyeden 2332. saniyeye kadar olan süreçte, yakıt yangınından kaynaklı ısı yayılımı engellenmiş olmasına rağmen, bu deneyde pil üzerinde ölçülen en yüksek sıcaklık 654,8 °C olarak kaydedilmiştir.

		
(a) İlk tutuşturma	(b) Pil sıcaklık değeri 91,9 °C	(c) Pil sıcaklık değeri 168,2 °C
		
(d) Termal kaçak ve jet alevi 299,8 °C	(e) Pil Sıcaklık Değeri 319,6 °C	(f) Pil üzerine söndürme maddesi ile ilk müdahale sıcaklık değeri 304,1 °C
		
(g) Pil üzerine söndürme maddesi ile 2'nci müdahale sıcaklık değeri 336,8 °C	(h) Pil üzerine söndürme maddesi ile 3'üncü müdahale sıcaklık değeri 298,5 °C	(i) Pil sıcaklık değeri 399,8 °C
		
(j) Yakıt yangınına müdahale sıcaklık değeri 188,6 °C	(k) Pilden yoğun gaz çıkışı (3 dk. 30 sn süresince) sıcaklık değeri 188,6 °C	(l) En yüksek pil sıcaklık değeri 654,8 °C

Şekil 4.17. Benzin ve prizmatik tip pil deneyinde yangın söndürücü müdahalesine ait bütünsel görseller.



Şekil 4.18. Benzin ve prizmatik tip pil deneyinde yangın söndürücü müdahalesine ait gözlemlerin grafiksel gösterimi.

4.2.4. Açık alan deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Açık alanda gerçekleştirilen deneyler, 3,6 V, 3200 mAh kapasiteli silindirik 18650 lityum-iyon piller ile Lityum Nikel Manganiz Kobalt Oksit (NMC) içeren prizmatik lityum-iyon piller üzerinde yürütülmüş ve yüksek viskoziteye sahip sıvı tabanlı yangın söndürme maddesi (YVSS) uygulamasının termal kaçak olaylarını sınırlamadaki etkinliği konusunda önemli bulgular elde edilmiştir.

Her bir deneyde, hibrit araçlardaki yakıt bölümünü temsil eden yakma haznesi içerisine yerleştirilen 2 litre benzin, pil bölümüne sürekli ısı yük sağlamıştır. Pil bölümü ise 6 hücreli 18650 silindirik pil bloğu ve prizmatik tip pillerden oluşmuştur.

Yapılan karşılaştırmalı gözlemler, YVSS müdahalesi uygulanan ve uygulanmayan deney koşulları arasında termal davranış ve güvenlik çıktıları açısından belirgin farklılıklar ortaya koymuştur. Bulgular, yüksek viskoziteli sıvı söndürücü maddenin uygulanmasının termal kaçak başlangıcını geciktirdiğini, emniyet valfi aktivasyonunu ötelediğini, ardışık termal kaçak olayları arasındaki süreyi uzattığını ve pillerin en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşma süresini artırdığını göstermiştir. Bu sonuçlar, söz konusu söndürücü maddenin ısı yönetim ve yangın kontrolü açısından etkinliğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Söndürücü madde uygulanan ve uygulanmayan deneylerde elde edilen süre ve sıcaklık farklılıkları Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Yüksek vizkoziteli sıvı tabanlı yangın söndürücü (YVSS) uygulamasına ilişkin sonuç farklılıkları tablosu.

Benzin yanması katkılı deneye eşlik eden pil tipi	Termal kaçak başlangıcı gecikme süresi	Emniyet valfi açılması ile termal kaçak arasındaki gecikme süresi	Elde edilen en yüksek sıcaklığa ulaşma gecikme süresi	En yüksek sıcaklıklar arasındaki fark
18650 Silindirik Tip 6 Hücreli Lityum-İyon Pil	1136 sec.	1168 sec.	1103 sec.	374,9 °C
Prizmatik Tip Lityum-İyon Pil	490 sec.	424 sec.	1527 sec.	326,5 °C

Bu çalışmada, hibrit araç yangınlarında yüksek vizkoziteli sıvı tabanlı yangın söndürücü maddenin (YVSS) doğru zamanlama ve uygun miktarda uygulanmasının, yangının ilerleyişini anlamlı ölçüde değiştirdiği tartışmasız biçimde ortaya konulmuştur. Bu yaklaşım, araç içindeki yolculara daha uzun tepki süresi tanımakta, müdahale ekiplerinin olay yerine ulaştığında daha kontrol edilebilir bir yangınla karşılaşmasını mümkün kılmakta ve en önemlisi, can ve mal kayıplarının önlenmesi ve azaltılmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Elde edilen genel bulgular, sürekli ısı etkiye maruz kalınan hibrit veya elektrikli araç yangınları gibi senaryolarda YVSS söndürücü maddenin batarya güvenliğini artırmada kritik bir müdahale aracı olma potansiyelini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, gelecek çalışmalarda söz konusu söndürücü maddenin farklı işletim koşullarındaki uzun vadeli kararlılığı ve çevresel etkilerinin ayrıntılı biçimde araştırılması, gerçek dünya senaryolarında uygulanabilirliğinin optimize edilmesi açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Yüksek Vizkoziteli Sıvı Söndürücü (YVSS) için yapılan SWOT analizi Tablo 4.7’de sunulmaktadır.

Yapılan SWOT analizi, YVSS’nin (Yüksek Vizkoziteli Sıvı Söndürücü) yangın güvenliği alanındaki potansiyelini çok boyutlu bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Analize göre, YVSS’nin güçlü yönleri arasında termal kaçak başlangıcını geciktirme, emniyet valfi açılma süresini uzatma ve batarya yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluşturarak ısı yönetimi iyileştirme gibi deneysel olarak doğrulanmış avantajlar öne çıkmaktadır. Buna karşın, yüksek vizkozite nedeniyle dağılım zorlukları ve maliyet dezavantajı gibi zayıf yönler, teknolojinin yaygın uygulama alanlarını sınırlandırabilmektedir. Fırsatlar incelendiğinde, özellikle elektrikli araç pazarının

hızlı büyümesi, enerji depolama sistemlerinin (ESS) artan kullanımı ve uluslararası standartlarla (UNECE R100, NFPA 855 vb.) uyum potansiyeli, YVSS'nin küresel ölçekte kabulünü destekleyen faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 4.7. Yüksek vizkoziteli sıvı tabanlı yangın söndürücü (YVSS) SWOT Analizi.

<u>GÜÇLÜ YÖNLER (STRENGTHS)</u> - Termal kaçak başlangıcını geciktirme ve emniyet valfi açılma süresini uzatma. - Batarya yüzeyinde koruyucu film tabakası oluşturarak ısı transferini yavaşlatma. - Hibrit araçlar, ESS ve kimyasal depolarda kullanılabilirlik. - Yanıcı ve zehirli gaz oluşumunu azaltma. - Müdahale ekiplerine zaman kazandırma.	<u>ZAYIF YÖNLER (WEAKNESSES)</u> - Yüksek vizkozite nedeniyle yayılım zorluğu. - Geleneksel sistemlere kıyasla yüksek maliyet. - Standartlarda (NFPA, EN, TS) tanımlı olmaması. - Uygulamada doğru miktar ve zamanlama bağımlılığı. - Pazar kabulünün zaman alması.
<u>FIRSATLAR (OPPORTUNITIES)</u> - Elektrikli araç pazarının hızla büyümesi. - ESS kullanımının artması. - UNECE R100, NFPA 855 gibi standartlara uyum fırsatı. - Nano-katkılar ve çevre dostu inovasyon potansiyeli. - Savunma, havacılık ve denizcilikte yüksek potansiyel. - İklim politikalarının yeni çözümleri teşvik etmesi.	<u>TEHDİTLER (THREATS)</u> - NOVEC 1230, FM-200, aerosol gibi alternatif söndürücüler. - Çevresel regülasyon kısıtlamaları (REACH vb.). - Hammadde ve tedarik zinciri riskleri. - Yanlış algı ve 'deneysel ürün' imajı. - Ekonomik dalgalanmaların yatırımları kısıtlaması. - Rakip teknolojilerin hızlı standardizasyonu.

Bununla birlikte, alternatif söndürme teknolojilerinin rekabeti, mevzuat kısıtlamaları ve tedarik zinciri riskleri tehdit unsurları arasında yer almaktadır. Genel olarak SWOT analizi, YVSS'nin doğru stratejik yönelimler ve standartlaşma süreçleri ile desteklenmesi durumunda, hibrit ve elektrikli araç yangınları başta olmak üzere enerji depolama ve yüksek riskli endüstriyel uygulamalarda uluslararası düzeyde stratejik bir çözüm olarak konumlanabileceğini göstermektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında, hibrit elektrikli araç bataryalarının yangın davranışları, termal kaçak mekanizmaları ve farklı söndürme ajanlarının etkinliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan 18650 silindirik lityum-iyon piller ile prizmatik tip NMC piller, ısıtma yoluyla kontrollü bir şekilde termal strese maruz bırakılmış ve benzin katkılı senaryolarla hibrit elektrikli araç koşulları simüle edilmiştir. Çalışmanın ana amacı, özellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalarda meydana gelen yangınlara yönelik farklı söndürme stratejilerinin etkinliğini belirlemek olmuştur.

Elde edilen bulgular, su, NOVEC 1230, BIOVERSAL ve yüksek vizkoziteli sıvı söndürücü (YVSS) olmak üzere dört farklı söndürme ajanının batarya yangınlarına müdahale performansını kapsamlı bir biçimde ortaya koymuştur. Su uygulamaları, kolay temin edilebilirliği ve soğutma kapasitesi nedeniyle avantaj sağlamakla birlikte, bataryaların yüksek kalorifik değerleri nedeniyle yangının tamamen kontrol altına alınmasında yetersiz kalmıştır. NOVEC 1230, hızlı soğutma ve yanmayı kesme kabiliyetiyle öne çıkmış; ancak patlama ve yeniden alevlenmelerin engellenmesinde sınırlı başarı göstermiştir. BIOVERSAL, çevre dostu yapısı ve hidrokarbon kapsülleme özelliği ile belirli avantajlar sunmasına rağmen, batarya yangınlarında istenen süreklilikte etkinlik sağlayamamıştır. Buna karşılık, YVSS uygulaması deneysel veriler ışığında en yüksek başarı oranına sahip olmuş; termal kaçak başlangıcını geciktirmiş, emniyet valfi açılma süresini uzatmış ve bataryaların en yüksek sıcaklığa ulaşma süresini anlamlı ölçüde artırmıştır. YVSS'nin yüksek vizkoziteye bağlı olarak yüzeyde oluşturduğu film tabakası, ısı yayılımı sınırlandırmış ve yangın büyümesini belirgin ölçüde yavaşlatmıştır.

Deneylerde elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri, gaz salınım verileri (O_2 , CO , CO_2 konsantrasyonları) ve kritik olay süreleri, her bir söndürme ajanının batarya yangınları üzerindeki farklı etkilerini açıkça göstermiştir. Özellikle CO ve CO_2 artışları, yangın şiddeti ve patlama anları ile doğrudan ilişkilendirilmiş; O_2 konsantrasyonundaki düşüşler, ortamın yangın için kritik eşik değerlere yaklaşma süresini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, YVSS uygulamasının hibrit elektrikli araç bataryalarındaki yangınlarda

daha kontrollü bir gaz salınım profili sağladığı ve ani patlama riskini azaltmada diğer ajanlara kıyasla daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmada ayrıca gerçekleştirilen SWOT analizi, YVSS'nin güçlü yönlerini (etkin termal yönetim, geniş uygulama alanı, yangın büyümesini geciktirme), zayıf yönlerini (yüksek vizkoziteye bağlı dağılım zorlukları, maliyet, standart eksikliği), fırsatlarını (elektrikli araç pazarının büyümesi, enerji depolama sistemleri, uluslararası regülasyonlarla uyum) ve tehditlerini (alternatif söndürücü teknolojiler, çevresel mevzuatlar, tedarik zinciri riskleri) ortaya koymuştur. Bu analiz, YVSS'nin doğru stratejik yönelimler ve uluslararası standartlarla desteklenmesi durumunda, batarya yangın güvenliği alanında küresel ölçekte stratejik bir çözüm olarak konumlanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen deneysel bulgular, YVSS'nin batarya yangınlarında önemli bir söndürme potansiyeli sunduğunu ortaya koymakla birlikte, söndürücü maddenin batarya modülü içerisinde hücreler arası boşluklara yeterli düzeyde sirayet etmesinin, söndürme başarısında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bu nedenle, gelecekteki uygulamalarda YVSS'nin yalnızca yüzeyden değil, batarya grubunun iç kısımlarına doğrudan nüfuz edecek şekilde tasarlanmış dağıtım sistemleriyle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir.

Teknik açıdan, batarya paketlerinde şu geliştirmeler önerilmektedir:

Enjeksiyon Kanalları ve Dağıtım Hatları: Batarya modül ve paketlerinde, söndürücü ajanların kontrollü şekilde hücreler arasına iletilebilmesi için özel enjeksiyon portları veya mikro-kanallı dağıtım hatları tasarlanmalıdır.

Basınç Kontrollü Uygulama: YVSS'nin yüksek vizkozitesi göz önüne alınarak, ajanı batarya içine itebilecek basınç destekli sistemler kullanılmalı, böylece sıvının yalnızca yüzeyde değil, batarya çekirdeğinde de etkili olması sağlanmalıdır.

Çok Noktadan Uygulama: Modül bazında tek bir giriş noktasına bağımlı kalmak yerine, hücre bloklarının farklı bölgelerine çoklu giriş noktaları planlanarak eşit dağılım sağlanmalıdır.

Sensör Entegrasyonu: Batarya paketine yerleştirilecek ısı, gaz ve basınç sensörleri ile termal kaçak başlangıcı erken tespit edilmeli ve söndürücü madde otomatik olarak uygun noktaya yönlendirilmelidir.

Standardizasyon Çalışmaları: Bu yaklaşımın yaygın kullanılabilmesi için NFPA 855, UNECE R100, IEC 62619 gibi standartlarla uyumlu test protokolleri geliştirilmelidir.

Bu teknik iyileştirmeler sayesinde, YVSS'nin sadece yüzeysel bir soğutucu değil, batarya içi yangınlara doğrudan müdahale eden stratejik bir söndürücü olarak etkinliği artırılabilir. Böylece, hibrit ve elektrikli araç yangınlarında yangının kontrol altına alınma süresi kısılacak, patlama riskleri azaltılacak ve can/mal güvenliği daha üst düzeye çıkarılacaktır.

Sonuç olarak, bu doktora çalışması, hibrit elektrikli araç yangınlarının karmaşık doğasına ışık tutmuş; batarya yangınlarında kullanılan farklı söndürme ajanlarının etkinliğini karşılaştırmalı bir bakış açısıyla ortaya koymuştur. Araştırma, özellikle YVSS'nin yüksek başarı potansiyelini deneysel verilerle destekleyerek, gelecekteki yangın güvenliği uygulamaları için güçlü bir alternatif olduğunu kanıtlamıştır. Ancak, YVSS'nin geniş ölçekli uygulamalarda yaygınlaştırılabilmesi için standartlaşma süreçlerinin hızlandırılması, maliyetlerin optimize edilmesi ve çevresel etkilerinin uzun vadeli araştırmalarla değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu çalışma, yalnızca akademik katkı sağlamakla kalmamış; aynı zamanda hibrit elektrikli araç güvenliği, enerji depolama sistemleri ve endüstriyel yangın güvenliği alanlarında uygulanabilir pratik çözümler de ortaya koymuştur.



KAYNAKLAR

- [1] Elektrikli Araçlar Girişimi – Küresel Elektrikli Araç Görünümü 2023 – Analiz - IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/electric-vehicles-initiative> (accessed September 14, 2025).
- [2] J.L. Hodges, U. Salvi, A. Kapahi, Design fire scenarios for hazard assessment of modern battery electric and internal combustion engine passenger vehicles, *Fire Saf J* 146 (2024) 104145. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104145>.
- [3] S. Kang, M. Kwon, J.Y. Choi, S. Choi, Full-Scale Fire Testing to Assess the Risk of Battery Electric Vehicle Fires in Underground Car Parks, *Fire Technol* (2025) 1–31. <https://doi.org/10.1007/S10694-024-01694-7/FIGURES/15>.
- [4] N.G. Sauer, B. Gaudet, A. Barowy, Experimental investigation of explosion hazard from lithium-ion battery thermal runaway effluent gas, *Fuel* 378 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.132818>.
- [5] A. Olona, L. Castejon, Full-Scale Experimental Analysis of the Behavior of Electric Vehicle Fires and the Effectiveness of Extinguishing Methods, *Fire* 2025, Vol. 8, Page 301 8 (2025) 301. <https://doi.org/10.3390/FIRE8080301>.
- [6] L. Zhang, K. Jin, J. Sun, Q. Wang, A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire, *Fire Technol* 60 (2024) 817–858. <https://doi.org/10.1007/S10694-022-01278-3>.
- [7] Y. Yao, X. Peng, L. Gao, H. Xing, X. Xu, J. Gu, L. Liu, S. Yue, Y. Qiu, Y. Wang, Z. Zhang, Experimental and Simulation-Based Study on Thermal Runaway Characteristics of 18650 Lithium-Ion Batteries and Thermal Propagation Patterns in Battery Packs, *Batteries* 11 (2025) 202. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES11050202/S1>.
- [8] Wikipedia, Hybrid electric vehicle - Wikipedia, (2025). https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicle (accessed September 15, 2025).
- [9] Armstrong Phaeton: The world's First Hybrid Car - Dyer, (n.d.). <https://dyer.com/blog/470/armstrong-phaeton-the-world-s-first-hybrid-car> (accessed September 15, 2025).
- [10] Amj,Porsche Shows First Hybrid Car at Paris World's Fair Classic Cars in the year1900 : https://www.reddit.com/r/AajMaineJana/comments/1ger6tw/amjporsche_shows_first_hybrid_car_at_paris_worlds/ (accessed September 15, 2025).
- [11] Toyota Expands Prius Family With Debut of Prius v - Toyota Media Site, (n.d.). <https://media.toyota.co.uk/toyota-expands-prius-family-with-debut-of-prius-v/> (accessed September 15, 2025).
- [12] Başıyğit, M. (2019). *Hibrit araçlarda uygun güç yönetimi stratejilerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi.

- [13] Boyalı, A. (2008). *Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [14] S. Lee, J. Cherry, M. Safoutin, A. Neam, J. McDonald, K. Newman, Modeling and Controls Development of 48 v Mild Hybrid Electric Vehicles, SAE Technical Papers 2018-April (2018). <https://doi.org/10.4271/2018-01-0413>.
- [15] Y. Zhang, Z. Cao, C. Zhang, Y. Chen, Life Cycle Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Considering Different Vehicle Working Conditions and Battery Degradation Scenarios, *Energies* 2024, Vol. 17, Page 4283 17 (2024) 4283. <https://doi.org/10.3390/EN17174283>.
- [16] S. Meehan, Fire Risk and Hazard Analysis of Lithium-Ion Battery Technologies in Underground Facilities: A Literature Review, n.d. <http://www.brand.lth.se>.
- [17] A. Urooj, A. Nasir, Review of Hybrid Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles, (2024). <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202405.1483.V1>.
- [18] Hibrit araçların bileşenlerinin tasarımı, modellenmesi ve güç yönetim stratejisinin belirlenmesi | Tezler | Tezara, (n.d.). <https://tezara.org/theses/911149> (accessed September 14, 2025).
- [19] Chapter nine Electric and Hybrid Vehicles from The Global Technology Revolution China, In-Depth Analyses: Emerging Technology Opportunities for the Tianjin Binhai New Area (TBNA) and the Tianjin Economic-Technological Development Area (TEDA) on JSTOR, (n.d.). <https://www.jstor.org/stable/10.7249/tr649tbna-teda.17?seq=1> (accessed September 15, 2025).
- [20] A. Kurkin, A. Chivenkov, D. Aleshin, I. Trofimov, A. Shalukho, D. Vilkov, Battery Management System for Electric Vehicles: Comprehensive Review of Circuitry Configuration and Algorithms, *World Electric Vehicle Journal* 2025, Vol. 16, Page 451 16 (2025) 451. <https://doi.org/10.3390/WEVJ16080451>.
- [21] Özdemir, T. (2022). *Lityum iyon pillerin olağan ve olağan dışı çalışma şartlarındaki ısı davranışı* (Doktora tezi). Hacettepe Üniversitesi.
- [22] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management, *IScience* 25 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.103744>.
- [23] Z. Zhang, Q. Luo, W. Su, K. Zhong, T. Wu, C. Wang, Design and analysis of a module-level prismatic battery thermal management system based on immersion cooling, *J Energy Storage* 130 (2025). <https://doi.org/10.1016/J.EST.2025.117459>.
- [24] T. Shan, Z. Wang, X. Zhu, H. Wang, Y. Zhou, Y. Wang, J. Zhang, Z. Sun, Explosion behavior investigation and safety assessment of large-format lithium-ion pouch cells, *Journal of Energy Chemistry* 72 (2022) 241–257. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2022.04.018>.
- [25] X. Gu, Y. Shang, J. Li, Y. Zhu, X. Tao, H. Geng, Z. Zhang, C. Zhang, Early warning of thermal runaway based on state of safety for lithium-ion batteries, *Communications Engineering* 4 (2025) 106. <https://doi.org/10.1038/S44172-025-00442-1>.

- [26] Y. Yao, L. Liu, J. Gu, H. Xing, H. Liu, Y. Cheng, Y. Wang, S. Yue, Y. Qiu, Z. Zhang, Characteristic Differences of Thermal Runaway Triggered by Overheating and Overcharging in Lithium-Ion Batteries and Multi-Dimensional Safety Protection Strategies, *Batteries* 11 (2025) 242. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES11070242/S1>.
- [27] H. Li, C. Xu, Y. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, M. Zhang, P. Wang, H. Shi, L. Lu, X. Feng, Experimental and Reduced-Order Modeling Research of Thermal Runaway Propagation in 100 Ah Lithium Iron Phosphate Battery Module, *Batteries* 2025, Vol. 11, Page 109 11 (2025) 109. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES11030109>.
- [28] X. Zhang, S. Chen, J. Zhu, Y. Gao, A Critical Review of Thermal Runaway Prediction and Early-Warning Methods for Lithium-Ion Batteries, *Energy Material Advances* 4 (2023). <https://doi.org/10.34133/ENERGYMATADV.0008>.
- [29] Y. Peng, H. Wang, C. Jin, W. Huang, F. Zhang, B. Li, W. Ju, C. Xu, X. Feng, M. Ouyang, Thermal runaway induced gas hazard for cell-to-pack (CTP) lithium-ion battery pack, *J Energy Storage* 72 (2023) 108324. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108324>.
- [30] H. Wang, X. Feng, Q. Wang, Z. Zhao, C. Jin, C. Xu, W. Huang, Z. Yuan, S. Wang, H. Wu, Y. Li, Y. Zhao, J. Sun, Z. Liu, Thermal Runaway Propagation Behavior of the Cell-to-Pack Battery System, (2023). <https://doi.org/10.2139/SSRN.4336582>.
- [31] J.L. Hodges, U. Salvi, A. Kapahi, Design fire scenarios for hazard assessment of modern battery electric and internal combustion engine passenger vehicles, *Fire Saf J* 146 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2024.104145>.
- [32] L. Zhang, K. Jin, J. Sun, Q. Wang, A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire, *Fire Technol* 60 (2024) 817–858. <https://doi.org/10.1007/S10694-022-01278-3>.
- [33] M.Z. Mohd Tohir, C. Martín-Gómez, Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis, *Open Research Europe* 3 (2023). <https://doi.org/10.12688/OPENRESEUROPE.16538.1>.
- [34] P.P. Gargh, A. Sarkar, I.C. Nlebedim, P. Shrotriya, Lithium plating induced degradation during fast charging of batteries subjected to compressive loading, *J Energy Storage* 84 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110701>.
- [35] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, B.E. Mellander, Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires, *Sci Rep* 7 (2017) 1–13. <https://doi.org/10.1038/S41598-017-09784-Z;SUBJMETA>.
- [36] R. Spotnitz, J. Franklin, Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, *J Power Sources* 113 (2003) 81–100. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00488-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00488-3).
- [37] H. Togun, A. Basem, M.J. Jweeg, H.I. Mohammed, A.M. Abed, A.E. Anqi, D.K. Madheswaran, H.A. Hasan, A. Chattopadhyay, P. Talebizadehsardari, Smart hybrid thermal management: Bridging innovation for sustainable electric and hybrid vehicles, *International Journal of Thermal Sciences* 215 (2025). <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2025.110013>.

- [38] M.K. Tran, A. Mevawalla, A. Aziz, S. Panchal, Y. Xie, M. Fowler, A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Modeling and Diagnosis Approaches, *Processes* 10 (2022). <https://doi.org/10.3390/PR10061192>.
- [39] How to Stop a Lithium-Ion Battery Fire - CellBlock FCS, (n.d.). <https://cellblockfcs.com/how-to-stop-a-lithium-ion-battery-fire/> (accessed September 15, 2025).
- [40] A. Makalesi, Z. Yıldız, E. Köse, Motorlu Araç Yangınları Üzerine Bir İnceleme, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (2020) 119–126. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.704517>.
- [41] J. Hynynen, O. Willstrand, P. Blomqvist, P. Andersson, Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests, *Fire Saf J* 139 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2023.103829>.
- [42] M.Z. Mohd Tohir, C. Martín-Gómez, Evaluating Fire Severity in Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles: A Statistical Approach to Heat Release Rates, *Fire Technol* 61 (2025) 2957–2998. <https://doi.org/10.1007/S10694-025-01711-3/FIGURES/8>.
- [43] 2025'te Benzinli ve Elektrikli Araç Yangınları (Şok Edici İstatistikler) | AutoinsuranceEZ.com, (n.d.). <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/> (accessed September 14, 2025).
- [44] Jeep, Wrangler ve Grand Cherokee PHEV modellerini geri çağırıyor, (n.d.). <https://tr.motor1.com/news/735649/jeep-wrangler-grandcherokee-geri-cagirma/> (accessed September 14, 2025).
- [45] Stellantis, ABD'de 154 binden fazla Jeep'i geri çağırdı - Midas, (n.d.). <https://www.getmidas.com/midasin-kulaklari/stellantis-abdde-154-binden-fazla-jeepi-geri-cagirdi-p-51414> (accessed September 14, 2025).
- [46] Toyota'dan 1,9 milyonluk geri çağırma: Araç sahipleri ne yapmalı? - Son Dakika Otomotiv Haberleri | Cumhuriyet, (n.d.). <https://www.cumhuriyet.com.tr/otomotiv/toyotadan-19-milyonluk-geri-cagirma-arac-sahipleri-neler-yapmali-2137159> (accessed September 14, 2025).
- [47] Geri Çağırma: Ford Escape, Maverick ve Lincoln Yangın Riski Nedeniyle | NHTSA, (n.d.). <https://www.nhtsa.gov/press-releases/consumer-alert-important-ford-and-lincoln-fire-risk-recall> (accessed September 14, 2025).
- [48] 2017-2023 Chrysler Pacifica Hybrid geri çağırma : r/ChryslerPacifica, (n.d.). https://www.reddit.com/r/ChryslerPacifica/comments/1129tey/20172023_chrysler_pacifica_hybrid_recall/?tl=tr (accessed September 14, 2025).
- [49] Plug-in electric vehicle fire - Wikipedia, (n.d.). https://en.wikipedia.org/wiki/Plug-in_electric_vehicle_fire (accessed September 15, 2025).
- [50] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technol* 56 (2020) 1361–1410. <https://doi.org/10.1007/S10694-019-00944-3/FIGURES/26>.
- [51] MG HS Yaygın Sorunlar ve Güvenilirlik Sorunları | Tampon, (n.d.). <https://www.bumper.co/blog/mg-hs-reliability> (accessed September 15, 2025).

- [52] Kuzey Denizi'nde 3000 otomobil taşıyan kargo gemisi yandı, 1 kişi öldü - Haberler - Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanları ve Kuruluşları, (n.d.). <https://www.tmdk.org/haberler/2-haberler/340-kuzey-denizinde-3000-otomobil-tasiyan-kargo-gemisi-yandi-1-kisi-oldu> (accessed September 14, 2025).
- [53] NTSB Electric Vehicle Run-off-Road Crash and Postcrash Fire. <https://www.nts.gov/investigations/Pages/HWY21FH007.aspx> (accessed September 15, 2025).
- [54] NTSB solves mystery of deadly Tesla crash with no one behind the wheel - CBS News, (n.d.). <https://www.cbsnews.com/news/tesla-crash-spring-texas-deaths-mystery-solved-ntsb/> (accessed September 14, 2025).
- [55] Hyundai Kona EV, Quebec'teki Yeraltı Otoparkında Alev Aldı, (n.d.). <https://insideevs.com/news/608898/hyundai-kona-ev-fire-quebec-city/> (accessed September 15, 2025).
- [56] 200 Geri Çağırma - Lityum İyon Pil Kısa Devre Yapabilir - 2019-2020 Hyundai Kona Electric ve 2020 Ioniq Electric, (n.d.). <https://hyundai.oemdtc.com/501/recall-200-lithium-ion-battery-may-short-circuit-2019-2020-hyundai-kona-electric-2020-ioniq-electric> (accessed September 14, 2025).
- [57] Stellantis Media - Açıklama: PHEV Yangın Riski Uyarısı, (n.d.). <https://media.stellantisnorthamerica.com/newsrelease.do?id=26247&mid=> (accessed September 15, 2025).
- [58] Jeep Wrangler, Grand Cherokee Recall for Fire Risk | NHTSA, (n.d.). <https://www.nhtsa.gov/press-releases/jeep-wrangler-grand-cherokee-phevs-fire-risk> (accessed September 15, 2025).
- [59] Jeep, Wrangler ve Grand Cherokee PHEV modellerini geri çağırıyor, (n.d.). <https://tr.motor1.com/news/735649/jeep-wrangler-grandcherokee-geri-cagirma/> (accessed September 15, 2025).
- [60] Dutch Safety Board investigation finds SAR response gaps. <https://safety4sea.com/dutch-safety-board-investigation-finds-sar-response-gaps/> (accessed September 15, 2025).
- [61] Dutch safety board calls for urgent improvements after deadly North Sea cargo ship blaze | AP News, (n.d.). <https://apnews.com/article/cargo-ship-fire-netherlands-fremantle-cars-20ea27b2097a96baeda10481dc7a9e7e> (accessed September 15, 2025).
- [62] Y.U. Na, J.W. Jeon, Unraveling the Characteristics of ESS Fires in South Korea: An In-Depth Analysis of ESS Fire Investigation Outcomes, Fire 2023, Vol. 6, Page 389 6 (2023) 389. <https://doi.org/10.3390/FIRE6100389>.
- [63] S.Y. Lee, I.C. Park, J.H. Park, H.S. Jung, Evaluation of Initial Fire Extinguishing System for Marine ESS, Journal of Marine Science and Engineering 2024, Vol. 12, Page 877 12 (2024) 877. <https://doi.org/10.3390/JMSE12060877>.
- [64] Cai, L. (2023). *Suppression of li-ion battery fires* (Yüksek lisans tezi). University of Lund.

- [65] Özkaya, B.A. (2016). *Sol-jel yöntemi ile üretilen $\text{LiMn}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_4$ ($\text{M} = \text{Ni}, \text{Co}$) tozundan laminasyon yöntemi ile lityum iyon piller için katot üretilmesi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [66] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He, Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review, *Energy Storage Mater* 10 (2018) 246–267. <https://doi.org/10.1016/J.ENS.M.2017.05.013>.
- [67] T.M. Bandhauer, S. Garimella, T.F. Fuller, A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries, *J Electrochem Soc* 158 (2011) R1. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
- [68] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, C. Chen, Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery, *J Power Sources* 208 (2012) 210–224. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2012.02.038>.
- [69] R. Spotnitz, J. Franklin, Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, *J Power Sources* 113 (2003) 81–100. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00488-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00488-3).
- [70] P. Ping, Q.S. Wang, P.F. Huang, K. Li, J.H. Sun, D.P. Kong, C.H. Chen, Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test, *J Power Sources* 285 (2015) 80–89. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2015.03.035>.
- [71] X. Feng, X. He, M. Ouyang, L. Lu, P. Wu, C. Kulp, S. Prasser, Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25Ah $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ large format lithium ion battery, *Appl Energy* 154 (2015) 74–91. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.04.118>.
- [72] L. Zhang, K. Jin, J. Sun, Q. Wang, A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire, *Fire Technol* 60 (2024) 817–858. <https://doi.org/10.1007/S10694-022-01278-3/FIGURES/15>.
- [73] M. Ghiji, V. Novozhilov, K. Moinuddin, P. Joseph, I. Burch, B. Suendermann, G. Gamble, A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 5117 13 (2020) 5117. <https://doi.org/10.3390/EN13195117>.
- [74] O. Mammacıoğlu, G. Coskun, A new experimental approach to lithium-ion battery fires in electric vehicles: Investigation of fire behavior and effectiveness of extinguishing agents, *Case Studies in Thermal Engineering* 73 (2025) 106554. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2025.106554>.
- [75] J. Xu, Q. Duan, L. Zhang, Y. Liu, C. Zhao, Q. Wang, Experimental study of the cooling effect of water mist on 18650 lithium-ion battery at different initial temperatures, *Process Safety and Environmental Protection* 157 (2022) 156–166. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2021.10.034>.
- [76] L. Zhang, Y. Li, Q. Duan, M. Chen, J. Xu, C. Zhao, J. Sun, Q. Wang, Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires, *J Energy Storage* 32 (2020) 101801. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101801>.

- [77] W. Peng, Y. Zhang, S. Zhang, X. Liu, Experimental study on the inhibition effect of water mist containing additives on the thermal runaway of lithium battery, *Process Safety and Environmental Protection* 182 (2024) 999–1007. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.12.047>.
- [78] R.J. Si, D.Q. Liu, S.Q. Xue, Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery, *Procedia Eng* 211 (2018) 629–634. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.12.057>.
- [79] J. Xu, P. Guo, Q. Duan, X. Yu, L. Zhang, Y. Liu, Q. Wang, Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires, *Appl Therm Eng* 171 (2020) 115076. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115076>.
- [80] Y. Liu, K. Yang, M. Zhang, S. Li, F. Gao, Q. Duan, J. Sun, Q. Wang, The efficiency and toxicity of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one in suppressing lithium-ion battery fire, *Journal of Energy Chemistry* 65 (2022) 532–540. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2021.05.043>.
- [81] Z. Huang, Y. Zhang, L. Song, Q. Duan, J. Sun, W. Mei, Q. Wang, Preventing effect of liquid nitrogen on the thermal runaway propagation in 18650 lithium ion battery modules, *Process Safety and Environmental Protection* 168 (2022) 42–53. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.09.044>.
- [82] R. Hui, LUOXiao-feng, L. An, W. Zhi-hong, X. Qing-qing, Z. Zheng, Study on comparative fire extinguishing tests between ternary lithium battery cabin and lithium iron phosphate battery cabin of electric ships, *Fire Science and Technology* 40 (2021) 433. <https://www.xfkj.com.cn/EN/> (accessed September 15, 2025).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cemil ÖZKALAY

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Ön lisans** : 1997, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Otomotiv
2016, Atatürk Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği
- **Lisans** : 2006, Anadolu Üniversitesi, İktisat Fakültesi, ÇEKO
- **Yükseklisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Güvenliği ABD

MESLEKİ DENEYİM

- 1997-1998 yılları arası Türk Hava Kuvvetleri Yangın Astsubay İhtisas Temel Eğitimi aldı.
- 1998-2024 yılları arasında Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı farklı ana jet üslerinde ve birliklerinde yangın önleme, söndürme ve kurtarma astsubayı olarak görev yaptı.
- 2013-2023 yılları arasında Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı'nda yangın önleme, söndürme ve kurtarma ders öğretmeni olarak görev yaptı.
- 2020-2021 yılları arasında Libya Grup Görev Komutanlığı OKBA Müşterek Hava Eğitim Merkezi Komutanlığı'nda yangın önleme, söndürme ve kurtarma astsubayı ve eğitimci olarak görev yaptı.
- 2021 NRF-2022 (NATO Response Force) Denetlemesi yangın denetçiliği yaptı.
- 2003 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı Yalova Hava Meydan Komutanlığı Üstün Hizmet Ödülü aldı.
- 2016 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı Hava Teknik Okullar Komutanlığı Üstün Hizmet Ödülü aldı.
- 2022 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı Astsubay Vecihi HÜRKUŞ Onur Ödülü aldı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- C. Özkalay, Soyhan H.S., O. Mammacıoğlu, G. Coskun 2025. Hybrid Vehicle Battery Fires Experimental Insights and Risk Evalution, *Thermal Science*, 48, 3167-3173. <https://doi.org/10.2298/TSCI2504105O>.

DİĞER ESERLER:

- Özkalay, C., Coşkun, G., Soyhan, H.S. (2017). Yangın ekiplerinin bombalı eylemlerde hareket tarzları. Uluslararası Yakıtlar Yanma ve Yangın Dergisi (5), 8-12.
- Soyhan, H.S., Özkalay, C., Can, K., Mammacıoğlu, O. (2018). *Yangın ve Yaşam*. Cenevre Yayınevi.
- Özkalay, C., Soyhan, H.S. (2019). Pilot kurtarmada platformun gerekliliği. Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi (7), 1-8.
- C. Özkalay, O. Mammacıoğlu, H.S. Soyhan, and G. Coşkun, “Elektrik Kaynaklı Yangınlar,” presented at the INCOS 2022, Aydın, 2022.
- O. Mammacıoğlu, C. ÖZKALAY, G. COŞKUN, and H. S. SOYHAN, “Havacılık Sektöründe Yangın Algılama ve Söndürme Sistemlerinin Projelendirme Kurulum ve İşletim Süreçlerinin Yönetilmesi,” presented at the INCOS 2022, Aydın. 2022.
- Coşkun, G., Demir, U., Soyhan, H.S., Özkalay, C., Mammacıoğlu, O. (2023, 30, Mart) Deprem afeti esnasında ve sonrasında meydana gelebilecek yangın risklerinin ve olaylarının tespiti ve irdelenmesi, Tübitak, *Deprem Araştırmaları Sanal Konferansı* içinde. Türkiye.