

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

**TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA PİL YANGINLARI VE ETKİN
SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Onur MAMMACIOĞLU

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

EKİM 2025

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

**TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA PİL YANGINLARI VE ETKİN
SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Onur MAMMACIOĞLU

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan COŞKUN

EKİM 2025

Onur MAMMACIOĞLU tarafından hazırlanan “TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA PİL YANGINLARI VE ETKİN SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 03.10.2025 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 :	Doç.Dr. Gökhan COŞKUN (Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Ali TÜRKCAN
	Kocaeli Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Hüseyin ALTUNDAĞ
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Üsame DEMİR
	Bilecik Şeyh Edebali 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 “TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA PİL YANGINLARI VE ETKİN 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.

(03/10/2025).

Onur MAMMACIOĞLU





Eşim, Kızım ve Aileme...



TEŞEKKÜR

Bilim üzerine düşünmenin temelinde, bilim tarihini anlamak yer almaktadır. Bu bağlamda bilime adanmış yaşam öykülerinden her zaman ilham aldım. Bu yola çıkmak, insanlık tarihi boyunca hem ürkütücü hem de yorucu olmuştur. Çünkü bilim yapmak, bilinmeze yelken açmak ve tutunacak bir dalın dahi bulunmadığı derin ve sonsuz bir okyanusta yol almaya benzer. Bu yolun sonunda hiçbir şey elde edememek de sürecin acımasız olarak nitelendirilebilecek bir sonucu olabilmektedir. Bilim insanları, sonuçtan ziyade sürece odaklanarak; yol boyunca kazandıkları bilgi ve deneyimleri, kendileri tarafından olmasa dahi öğrencilerinin öğrencileri aracılığıyla insanlığa bir fayda olarak sunabilmektedir. “Beni bu yola çıkaran neydi?” sorusuna bulduğum en güçlü cevap ise her zaman merak olmuştur. Merak, yalnızca bilinmeyenin keşfi olarak değil; bilinen, görülen, hissedilen, kısacası yaşanan bir olgunun rasyonel ya da sebep-sonuç ilişkisi çerçevesinde açıklanması olarak da değerlendirilmelidir.

Doktora çalışmam süresince bilimsel merak ve azimle yürüdüğüm bu yolda, desteklerini esirgemeyen başta tez danışmanım Doç. Dr. Gökhan COŞKUN olmak üzere; Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN, Cemil ÖZKALAY, Gökhan YAŞAR ve adlarını burada tek tek anamadığım çok değerli katkı sunan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2024-25-59-73 numaralı proje kapsamında desteklenmiş olup, sağlanan bu değerli katkı için Sakarya Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Per Aspera Ad Astra.

Onur MAMMACIOĞLU



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. Elektrikli Araçların Tarihçesi	1
1.2. Elektrikli Araç Türleri	4
1.3. Lityum Pillerin Çalışma Prensipleri	5
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ YANGINLARI	9
2.1. Elektrikli Araç Yangınlarının İncelenmesi	9
2.2. Lityum İyon Pil Yangınları ve Söndürme Maddeleri	12
3. LİTYUM İYON PİL YANGINI DENEYLERİ	23
3.1. Deney Düzenekinin Oluşturulması	23
3.2. Deney Prosedürleri	26
4. DENEY SONUÇLARI	29
4.1. Tek Pil Yangın Deneyi	29
4.2. Su ile Müdahale Deneyi	31
4.3. NOVEC 1230 ile Müdahale Deneyi	33
4.4. BIOVERSAL ile Müdahale Deneyi	35
4.5. Yüksek Vizikoziteli Sıvı Söndürme (YVSS) Maddesi ile Müdahale Deneyi	37
4.6. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	39
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	49



KISALTMALAR

BMS	: Batarya Yönetim Sistemi
C₆F₁₂O	: NOVEC 1230
EA	: Elektrikli Araç
HF	: Hidrojen Florür
HRR	: Isı Salınım Hızı
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
Li-MnO₂	: Lityum Manganez Dioksit
LİP	: Lityum İyon Pil
Li-SO₂	: Lityum Sülfür Dioksit
LTO	: Lityum Titanat Oksit
NCA	: Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	: Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
POF₃	: Fosforil Triflorür
SEI	: Katı Elektrolit Ara Yüzeyi Katmanı
SOC	: Pilin Doluluk Oranı
TKK	: Termal Kontrol Kaybı
YVSS	: Yüksek Vizikoziteli 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 2.1. New York itfaiyesi lityum iyon pil yangın istatistikleri [9].	11
Tablo 2.2. LİP yangınlarını önleme tedbirleri.	21
Tablo 3.1. Deney şartlarının oluşturulması öncesinde sorulan sorular.	23
Tablo 3.2. Ölçüm cihazları hata payı verileri.	25
Tablo 3.3. Deneylerin yol haritası.	26
Tablo 4.1. Tek pil yanma deneyi ortam gazları.	30
Tablo 4.2. Ortam gazları (su ile müdahale).	32
Tablo 4.3. Ortam gazları (NOVEC 1230 ile müdahale).	34
Tablo 4.4. Ortam gazları (BIOVERSAL ile müdahale).	36
Tablo 4.5. Ortam gazları (YVSS ile müdahale).	38
Tablo 4.6. Deney sonuçları karşılaştırma tablosu.	40



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Morris ve Salomon'un Electrobats elektrikli aracı (solda) ve Londra elektrikli taksi aracı (sağda).	2
Şekil 1.2. Ford comuta.	2
Şekil 1.3. Lityum iyon pil temel şeması.	5
Şekil 1.4. Lityum iyon pil tasarımları.	6
Şekil 2.1. LİP yangın üçgeni [21].	15
Şekil 2.2. LİP yangın aşamaları.	16
Şekil 2.3. Su sisi deneyi sıcaklık-zaman değişimi [40].	17
Şekil 2.4. Şarj durumu, su sisi ve HF değişimleri [23].	18
Şekil 2.5. Sıvı azotun LİP üzerindeki soğutma etkisi [47].	20
Şekil 3.1. Deney düzeneği.	24
Şekil 4.1. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar.	29
Şekil 4.2. Gaz salınımı ve yangın.	30
Şekil 4.3. Termal kamera görüntüsü.	31
Şekil 4.4. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (su ile müdahale).	32
Şekil 4.5. Su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.	33
Şekil 4.6. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (NOVEC 1230 ile müdahale).	34
Şekil 4.7. NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.	35
Şekil 4.8. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (BIOVERSAL ile müdahale).	36
Şekil 4.9. BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.	37
Şekil 4.10. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (YVSS ile müdahale).	38
Şekil 4.11. Gaz salınımı, YVSS müdahalesi, yangın öncesi ve yangın.	39



TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA PİL YANGINLARI VE ETKİN SÖNDÜRME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

İçten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklanan yüksek miktarda sera gazı salınımı ve bunun sonuçlarından biri olan çevresel kirliliğe karşı güçlü bir alternatif olarak elektrikli araçlar (EA) ortaya çıkmıştır. Sessiz, çevreci ve ekonomik özellikleri sayesinde günümüzde giderek artan bir ilgi görmektedir. Her ne kadar elektrikle tahrik sistemleri araç teknolojisinin ilk çalışılan alanlarından biri olsa da, batarya kapasitelerinin yetersizliği ve içten yanmalı motorların hızlı gelişimi, elektrikli araçların uzun yıllar boyunca geri planda kalmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların azalması ve yanma ürünlerinin atmosferde birikerek ozon tabakasına zarar vermesi ile oluşan sera etkisi, elektrikli araçlara olan ilgiyi yeniden artırmıştır. Günümüzde elektrikli araçlar; tam elektrikli, hibrit ve yakıt pilli olmak üzere üç ana grupta üretilmektedir. Tam elektrikli araçlar yalnızca elektrik motoru ile çalışmakta ve enerjilerini bataryalardan sağlamaktadır. Hibrit araçlar, elektrik motoruna ek olarak içten yanmalı motorları da kullanabilmekte, yakıt pilli araçlar ise hidrojen depolama sistemlerinden elde edilen enerjiyi elektrik motorlarına aktarmaktadır.

Elektrikli araçların gelişiminde en kritik bileşenlerden biri lityum iyon piller (LİP) olmuştur. Lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve hızlı şarj gibi avantajlar sunarak elektrikli araçların menzil, performans ve kullanım kolaylığını artırmıştır. Bu pillerde anot genellikle grafit, katot ise metal oksitlerden oluşmakta, elektrolit olarak ise iyon iletken karbonat bazlı sıvılar kullanılmaktadır. Lityum iyon pillerin birçok kimyasal varyasyonu bulunmaktadır; Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC), Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA), Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Titanat Oksit (LTO), Lityum Sülfür Dioksit (Li-SO₂) ve Lityum Manganez Dioksit (Li-MnO₂) gibi farklı tipler, enerji yoğunluğu, güvenlik, maliyet ve döngü ömrü açısından farklı özellikler sunmaktadır. Örneğin, NMC ve NCA yüksek enerji yoğunluğu ile öne çıkarken, LFP güvenlik ve dayanıklılık açısından daha avantajlıdır. LTO ise düşük sıcaklıklarda bile yüksek güvenilirlik ve uzun döngü ömrü sağlarken, Li-SO₂ yüksek teorik enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen henüz teknik kısıtlamalar nedeniyle yaygınlaşmamıştır. Li-MnO₂ ise güvenlik ile makul ömür arasında denge sağlasa da günümüzde daha gelişmiş kimyaların gerisinde kalmıştır. Tüm bu gelişmeler, elektrikli araçların performansını ve güvenilirliğini artırmakta, gelecekte sürdürülebilir ulaşımın dönüşümünde lityum iyon pil teknolojisinin kilit bir rol üstleneceğini göstermektedir.

Elektrikli araçlar ve LİP ile ilişkili yangınların sıklığı, risk unsurları, yangın davranışları ve çeşitli söndürme yöntemlerinin etkinlikleri, kapsamlı ve disiplinler arası bir çerçevede ele alınmaktadır. Küresel veriler, tam elektrikli ve hibrit araçlarda bildirilen yangın oranlarının, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha düşük seviyelerde olduğunu ortaya koysa da; bu durum, elektrikli araçların küresel araç filosundaki sınırlı pazar payından kaynaklanmakta ve mutlak risk değerlendirmelerinde yanıltıcı sonuçlar doğurabilmektedir. Araç parkının

kompozisyonundaki değişim ve elektrikli araç kullanımının hızla artmasıyla birlikte, mutlak olay sayılarının yükselmesi beklenmekte; bu durum yangın riskinin özellikle kentsel alanlar, uzun mesafe taşımacılığı, lojistik operasyonlar ve toplu taşıma filolarında daha görünür hâle gelmesine neden olmaktadır. İtfaiye raporları, elektrikli araç yangınlarının söndürülmesinden günler veya haftalar sonra bile yeniden alevlenebildiğini göstermekte; ayrıca bu yangınları kontrol altına almak için gereken su miktarının, içten yanmalı araçlara kıyasla yaklaşık 40 kat daha fazla olduğu belirtilmektedir. Birleşik Krallık ve New York İtfaiyesi verileri, 2019-2024 döneminde batarya kaynaklı yangınlarda, yaralanma ve ölüm oranlarında istatistiksel olarak anlamlı artışlar yaşandığını ortaya koymakta; 2023 yılı hem yaralanma hem de ölüm sayıları açısından zirve yılı olarak öne çıkmaktadır. Açık deniz taşımacılığı, batarya üretim hatları ve geri dönüşüm tesislerinde meydana gelen olaylar, zincirleme yangın riski, toksik gaz yayılımı ve yüksek ekonomik kayıplar açısından kritik bir tehdit oluşturmaktadır.

Lityum iyon piller; yüksek enerji içeriği, uzun ömrü, hızlı şarj/deşarj kapasitesi ve kompakt yapıları sayesinde taşınabilir enerji depolama teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır. Ancak kimyasal bileşimleri gereği yüksek derecede reaktif ve yanıcı olmaları, bu pilleri yangın güvenliği açısından riskli kılmaktadır. Mekanik hasar, aşırı şarj, aşırıdeşarj, imalat hataları veya harici ısı maruziyeti gibi faktörler, termal kontrol kaybı (TKK) sürecini tetikleyebilir. Bu süreçte katı elektrolit ara yüzeyi (SEI) tabakasının bozulması, ayırıcı erimesi ve iç kısa devre oluşumu zincirleme ekzotermik reaksiyonlara neden olur; sıcaklık artışı oksijen açığa çıkmasına yol açar ve pilin kendi oksijenini üretme kapasitesi, geleneksel “oksijen kesmeye dayalı” söndürme yöntemlerinin etkinliğini sınırlar. Ek olarak, hidrojen florür (HF) ve fosforil triflorür (POF₃) gibi yüksek toksisiteye sahip gazların açığa çıkması, müdahale eden personel ve çevre için ek riskler oluşturur. Literatürdeki karşılaştırmalı çalışmalar, yangın söndürme ajanlarının etkinliklerinin birbirinden önemli ölçüde farklı olduğunu ortaya koymaktadır. ABC tipi kuru kimyasal tozlar, yeniden alevlenme riski taşımaları ve iletken kalıntı bırakmaları nedeniyle uygun değildir. Su sisi, TKK yayılımını geciktirme ve soğutma açısından avantajlı olsa da yüksek kapasiteli pillerde ve engelli ortamlarda sınırlı etkiye sahiptir; ayrıca bazı durumlarda toksik gaz salınımını artırabilir. Yüzey aktif madde katkıları, suyun yüzey gerilimini düşürerek söndürme performansını artırabilir. CO₂, pilin kendi oksijen üretmesi nedeniyle düşük etkinlik gösterir. HFC-227ea ve C₆F₁₂O (NOVEC 1230), kapalı alanlarda erken uygulandığında etkili olabilir; ancak toksik gaz salınımını artırma riski taşır. Sıvı azot, yüksek soğutma kapasitesi sayesinde TKK’yi geciktirebilir veya önleyebilir; ancak depolama ve lojistik zorluklar uygulamayı sınırlar. Aerosol söndürücüler başlangıçta soğutma sağlasa da yeniden alevlenme problemini ortadan kaldıramaz ve korozi kalıntıları bırakabilir.

Genel olarak, LİP yangınlarının karmaşık yanma mekanizmaları, yüksek yeniden alevlenme riski, toksik gaz salınımı ve operasyonel zorluklar, mevcut yangın söndürme tekniklerinin çoğunun tek başına yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Etkin müdahale için söndürücü seçiminin; araç türü, batarya kimyası, yangın senaryosu, çevresel koşullar ve operasyonel kısıtlar dikkate alınarak yapılması; aktif (soğutma sistemleri, yangın algılama, hızlı izolasyon) ve pasif (batarya muhafaza tasarımı, yangına dayanıklı malzemeler) güvenlik önlemlerinin entegre edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, mevzuatın güncellenmesi, standart test protokollerinin oluşturulması, uluslararası iş birliği mekanizmalarının güçlendirilmesi ve sürekli

eğitim programlarının yaygınlaştırılması, LİP yangın riskinin yönetilmesinde kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) lityum iyon pillerde meydana gelen yangın olaylarını incelemekte ve farklı yangın söndürücü ajanların kontrollü koşullar altında etkinliğini değerlendirmektedir. Lityum bazlı pil bileşenlerinde yer alan malzemelerin yanma özellikleri, bu tür yangınların söndürölmesini güçleştirmektedir. 18650 tip NMC pillerin yanma davranışları, özel olarak tasarlanmış güvenlik düzenekleri içerisinde aşırı ısınma yöntemiyle kontrollü şekilde tutuşturularak analiz edilmiştir. Test edilen yangın söndürücü ajanlar; Su, BIOVERSAL, NOVEC 1230 ve YVSS (yüksek viskoziteli sıvı madde) olarak belirlenmiş, deneyler iki aşamada yürütölmüştür. İlk aşamada tek pil hücresinin serbest yanma testi gerçekleştirilmiş, ikinci aşamada ise ısı kaynağının kesildiği ve sürekli ısı uygulandığı koşullar altında söndürme müdahaleleri yapılmıştır. Performans değerlendirmesinde yanma ve patlama sıcaklıkları, tutuşma gecikmesi ve ortam gaz bileşimindeki değişimler (O_2 , CO , CO_2) dikkate alınmıştır. Isı kesme koşullarında BIOVERSAL yaklaşık 247,6 °C ile en yüksek termal direnci gösterirken, Su yaklaşık 82 saniyelik tutuşma gecikmesi ile öne çıkmıştır. Sürekli ısı uygulama koşullarında ise YVSS yaklaşık 247 °C ile en yüksek patlama sıcaklığına ve yaklaşık 75 saniyelik tutuşma gecikmesine ulaşarak en başarılı ajan olmuştur. Buna karşılık NOVEC 1230 en düşük bastırma verimliliğini sergilemiştir. Elde edilen bulgular, BIOVERSAL'ın ısı kesme koşullarında, YVSS'nin ise sürekli ısı maruziyetinde en verimli yangın söndürücü ajanlar olduğunu ortaya koymakta ve lityum iyon pil yangınlarının kontrol altına alınmasında söndürücü seiminin uygulama senaryosuna bağlı olarak kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.



AN INVESTIGATION OF BATTERY FIRES IN FULLY ELECTRIC VEHICLES AND EFFECTIVE SUPPRESSION SYSTEMS

SUMMARY

Electric vehicles have emerged as a significant alternative to internal combustion engine vehicles in mitigating greenhouse gas emissions and environmental pollution. Their quiet operation, environmentally friendly characteristics, and economic advantages have contributed to a growing global interest. Although electric propulsion systems were among the earliest areas of automotive technology research, limitations in battery capacity and the rapid advancement of internal combustion vehicle technology kept electric vehicles in the background for decades. The decline of fossil fuel reserves and the accumulation of combustion-related pollutants in the atmosphere, which damage the ozone layer and contribute to the greenhouse effect, have reignited interest in electric vehicles. Today, electric vehicles are manufactured in three main categories: battery electric vehicles, hybrid electric vehicles, and fuel cell electric vehicles. Battery electric vehicles operate solely on electric motors powered by battery packs. Hybrid electric vehicles combine electric motors with internal combustion vehicles for dual propulsion, while fuel cell electric vehicles use hydrogen storage systems to generate electricity for electric motors.

One of the most critical components driving the development of electric vehicle is the lithium-ion batteries. Lithium ion batteries offer high energy density, long cycle life, and rapid charging capabilities, significantly improving electric vehicle range, performance, and usability. Typically, the anode consists of graphite, the cathode is composed of various metal oxides, and the electrolyte is a carbonate-based ion-conductive liquid. Several chemical variations of lithium ion batteries exist, including Lithium Cobalt Oxide (LCO), Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC), Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA), Lithium Iron Phosphate (LFP), Lithium Titanate Oxide (LTO), Lithium Sulfur Dioxide (Li-SO₂), and Lithium Manganese Dioxide (Li-MnO₂). Each type exhibits distinct advantages and trade-offs in terms of energy density, safety, cost, and cycle life. For instance, NMC and NCA cells offer high energy density, LFP provides superior safety and durability, LTO delivers exceptional reliability and cycle life even at low temperatures, Li-SO₂ offers high theoretical energy density but faces technical limitations, and Li-MnO₂ provides a balance between safety and service life but lags behind newer chemistries. These advancements underscore lithium ion battery technology's pivotal role in the future transformation of sustainable transportation.

The frequency, risk factors, fire dynamics, and suppression methods associated with electric vehicle and lithium ion battery fires require a multidisciplinary and comprehensive evaluation. Global statistics indicate that reported fire incidence rates in battery electric vehicles and hybrid electric vehicles are generally lower than in internal combustion vehicles; however, this is largely attributable to the relatively low market share of electric vehicles in the global vehicle fleet and may lead to misleading conclusions in absolute risk assessments. As the composition of the vehicle fleet

evolves and electric vehicles adoption accelerates, the absolute number of fire incidents is expected to rise, making the risk more pronounced, particularly in urban areas, long-distance transportation, logistics operations, and public transport fleets. Fire department reports have documented cases where electric vehicle fires reignited days or even weeks after initial suppression, and the water volume required to control these fires can be approximately 40 times greater than that needed for internal combustion vehicle fires. Data from the United Kingdom and the New York Fire Department (2019–2024) indicate statistically significant increases in injury and fatality rates from battery-related fires, with 2023 marking the peak year for both metrics. Moreover, incidents in maritime shipping, battery production lines, and recycling facilities highlight the cascading fire risks, toxic gas emissions, and high economic losses associated with such events.

While lithium ion batteries form the backbone of portable energy storage systems due to their high energy density, long cycle life, rapid charge/discharge capabilities, and compact form factor, their inherently reactive and flammable chemistry makes them susceptible to safety hazards. Mechanical damage, overcharging, over-discharging, manufacturing defects, or external heat exposure can trigger thermal runaway. During thermal runaway, degradation of the solid electrolyte interphase (SEI) layer, separator melting, and the formation of internal short circuits initiate a chain of exothermic reactions. This process releases oxygen, enabling the battery to sustain combustion independently of ambient oxygen supply, thereby limiting the effectiveness of conventional oxygen-deprivation suppression methods. Additionally, the release of highly toxic gases such as hydrogen fluoride (HF) and phosphoryl fluoride (POF_3) poses further hazards to first responders and the environment. Comparative studies in the literature reveal considerable variability in the effectiveness of fire suppression agents. ABC-type dry chemical powders are unsuitable due to their potential for re-ignition and electrically conductive residues. Water mist offers advantages in delaying thermal runaway propagation and cooling, yet it has limited effectiveness in large-capacity battery packs or confined spaces and may in some cases increase toxic gas emissions. The addition of surfactants can enhance water's suppression efficiency by reducing surface tension. CO_2 demonstrates low effectiveness because lithium ion batteries can generate their own oxygen during thermal runaway. Halocarbon agents such as HFC-227ea and $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ (NOVEC 1230) can be effective when applied early in enclosed environments but may increase toxic gas emissions. Liquid nitrogen can notably prevent or delay thermal runaway through rapid cooling, though its storage and handling present logistical challenges. Aerosol suppressants may provide initial cooling but fail to prevent re-ignition and may leave corrosive residues.

Overall, the complex combustion mechanisms, high re-ignition potential, toxic gas emissions, and operational challenges of lithium ion battery fires indicate that most suppression techniques are insufficient in isolation. Effective intervention requires selecting suppression agents based on vehicle type, battery chemistry, fire scenario, environmental conditions, and operational constraints, coupled with integrated active safety systems (e.g., cooling systems, fire detection, rapid isolation) and passive safety measures (e.g., fire-resistant enclosures, robust battery housing designs). Furthermore, regulatory updates, standardized testing protocols, strengthened international cooperation, and widespread training programs are essential to managing lithium ion battery fire risks effectively.

This study investigates fire incidents involving 18650-type Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) lithium batteries used in EVs and evaluates the effectiveness of

different fire suppression agents under controlled conditions. The flammability characteristics of lithium-based battery components present significant challenges for suppression. The combustion behavior of 18650 NMC cells was analyzed by inducing ignition through overheating within specially designed safety enclosures. The suppression agents tested included water, BIOVERSAL, NOVEC 1230, and a high viscosity liquid substance. Experiments were conducted in two phases: free-burning tests of a single cell and suppression tests under conditions where the heat source was either removed or continuously applied. Performance metrics included combustion and explosion temperatures, ignition delay times, and changes in ambient gas composition (O_2 , CO , CO_2). Under heat removal conditions, BIOVERSAL exhibited the highest thermal resistance at approximately 247.6 °C, while water achieved the longest ignition delay of approximately 82 seconds. Under continuous heating, high viscosity liquid substance reached the highest explosion temperature (approximately 247 °C) and the longest ignition delay (~75 seconds), making it the most effective agent in this scenario. In contrast, NOVEC 1230 demonstrated the lowest suppression efficiency. These findings indicate that BIOVERSAL is most effective under heat removal conditions, whereas high viscosity liquid substance is superior under continuous heat exposure. The results highlight the critical importance of selecting suppression agents based on the specific operational scenario when addressing lithium ion battery fires.

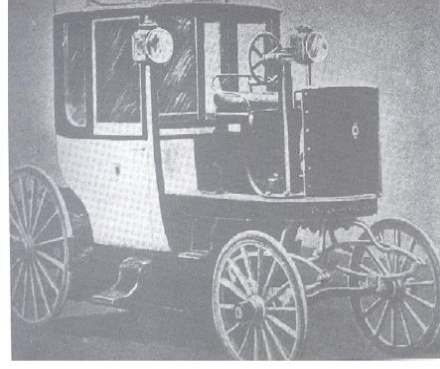


1. GİRİŞ

Taşıtlar geçmişten günümüze insan hayatını kolaylaştıran ürünler olmasının yanı sıra gücün ve varlığın simgesi olmuşlardır. Tren, gemi, uçak, otomobil gibi taşıma araçlarının ortak adı taşıttır[1]. Elektrikli araçlar, günümüzde içten yanmalı motorlu taşıtların neden olduğu sera gazı emisyonlarına karşı önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Elektrik enerjisini yakıt olarak kullanmaları sayesinde daha sessiz, çevre dostu ve ekonomik bir ulaşım olanağı sunmaktadır. Her ne kadar elektrikle tahrik sistemleri araç teknolojisinin ilk araştırma konularından biri olmuşsa da, içten yanmalı motorların geliştirilmesi ve elektrikli araçların sınırlı batarya kapasiteleri nedeniyle uzun yıllar boyunca yaygın bir ilgi görmemiştir. Günümüzde küresel enerji talebi büyük ölçüde fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Bununla birlikte, fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte azalacağı öngörülmekte ve bu yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan zararlı gazların atmosferde birikmesi, ozon tabakasına zarar vererek sera etkisini güçlendirmektedir. Bu durum, artan çevresel kaygılar doğrultusunda fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması yönünde güçlü bir toplumsal ve bilimsel eğilim oluşturmuştur.

1.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araçların tarihi, 19. yüzyılın başlarına kadar uzanır. İlk tam elektrikli araç, Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında üretildi. Amerika Birleşik Devletleri'nde Thomas Davenport 1834-1836 yılları arasında elektrikli bir yol aracı geliştirdi. Bu araç, şarj edilmeyen bataryalarla çalışıyordu. Berlin'de dünyanın ilk elektrikli trolleybüsünü 1882'de Siemens tanıttı. Bu araç, 2.2 kW'lık iki motorla çalışıyordu. 19. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, Amerika, İngiltere ve Fransa'da birçok firma elektrikli araç üretmeye başladı. Bu dönemde Electric Carriage and Wagon Company, 1895 yılında Electrobats isimli iki koltuklu elektrikli aracı geliştirdi. 1900 yılında Amerika'da üretilen araçların 1575'i elektrikliydi. 1897'de Londra'da "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" 15 elektrikli taksi hizmete aldı. Electrobats ve Londra elektrikli taksi aracı Şekil 1.1'de gösterilmiştir [2].



Şekil 1.1. Morris ve Salomon'un Electrobats elektrikli aracı (solda) ve Londra elektrikli taksi aracı (sağda).

1900-1912 yılları arasında elektrikli araçların menzil ve performansını artırmak için çeşitli çalışmalar yapıldı. Ferdinand Porsche, ilk deneysel hibrit aracı tasarladı. 1916'da Woods, hibrit bir elektrikli araç üretti; bu araç, benzinli motoru doğrudan elektrik motoruna bağlıyordu. 1920'lere gelindiğinde ise elektrikli araç üreticileri içten yanmalı motorlara yöneldi ve bu durum 1960'lara kadar sürdü. 1960'larda hava kirliliği sorunları, elektrikli araçlara olan ilgiyi yeniden artırdı. Bu dönemde, bazı otomotiv firmaları mevcut içten yanmalı araçları elektrikli hale dönüştürmeye başladı. Örneğin, Ford 1967'de Comuta adında bir prototip tanıttı. Ford Comuta Şekil 1.2'de gösterilmiştir [2]. 1970'ler, petrol krizinin etkisiyle elektrikli araç araştırmalarının hızlandığı bir dönemdi; birçok ülkede yeni elektrikli prototipler geliştirildi [2].



Şekil 1.2. Ford comuta.

1980'lerde çevresel faydalar nedeniyle hükümetler elektrikli araçları desteklemeye başladı. Ford ve GE, 1980'lerde ETX-1 aracını geliştirdi. Bu araçta AC tahrik sistemleri kullanıldı. 1990'larda, birçok büyük otomotiv firması elektrikli araç geliştirmeye başladı. Öne çıkan modeller arasında GM EV1, Toyota RAV4 ve Honda Insight yer aldı. Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modelleri Japon endüstrisi

tarafından üretilmiştir. Günümüzde elektrikli araç teknolojisi, sürdürülebilir ulaşım için önemli bir alternatif sunmaktadır ve sürekli olarak gelişmektedir. Batarya teknolojisi ve şarj altyapısı gibi alanlardaki yenilikler, elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlamaktadır.

Günümüzde elektrikli araçlar, çevre dostu bir ulaşım seçeneği olarak hızla popülerlik kazanmıştır. Lityum iyon pil teknolojisi elektrikli araçların sahip olduğu başarının temel taşlarından biri olarak anılır. Lityum iyon piller, elektrikli araçlarda kullanılan enerji depolama sistemi olarak tercih edilir çünkü yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi çok sayıda avantaj sağlar. Lityum iyon pillerin hızlı şarj edilebilme özelliği, kullanıcılara daha pratik ve kolay bir şarj deneyimi sunar. Bu sayede elektrikli araçların daha uzun menzile sahip olmasını sağlarlar. Bu teknoloji elektrikli araçların güvenilirlik, performans ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir faktörü oluşturur ve gelecekteki ulaşımın dönüşümünde kilit bir rol oynayacağı kabul edilir.

2024 yılı itibarıyla küresel ölçekte elektrikli araç satışları 17 milyonun üzerine çıkmış ve toplam otomobil satışlarının %20'sinden fazlasını oluşturmuştur. 2025 yılında bu sayının 20 milyonu aşması ve küresel otomobil satışları içerisindeki payının dörtte bire ulaşması öngörülmektedir. 2025 yılının ilk çeyreğinde elektrikli araç satışları, bir önceki yılın aynı dönemine kıyasla yaklaşık %35 oranında artış göstermiştir. Bu bulgu, elektrikli araçlara yönelik küresel talebin artarak devam ettiğini ortaya koymaktadır [3].

Çin, küresel elektrikli araç pazarında lider konumunu sürdürmektedir. 2024 yılında dünya genelinde satılan elektrikli araçların yaklaşık %60'ı Çin'de gerçekleşmiş; bu da yaklaşık 11 milyon araca karşılık gelmektedir. Bu sayı, tek başına 2022 yılındaki küresel satışların toplamına eşittir. Güneydoğu Asya ve Latin Amerika gibi gelişen pazarlarda, 2024 yılı içerisinde elektrikli araç satışları %60'ın üzerinde bir büyüme sergilemiştir. Bu durum, söz konusu bölgelerin elektrikli araç dönüşümünde yeni bir ivme kazandığını göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 2024 yılında elektrikli araç satışları yaklaşık %10 oranında artmıştır. Avrupa'da ise devlet teşviklerinin azaltılması sonucu araç satış artış hızında yavaşlama gözlenmiş; buna rağmen elektrikli araçların toplam satışlardaki payı %20 civarında seyretnmiştir [3].

Uluslararası Enerji Ajansı, 2030 yılına kadar küresel ölçekte elektrikli araçların toplam otomobil satışları içerisindeki payının %40 seviyesine ulaşabileceğini öngörmektedir.

Elektrikli araçların enerji talebi üzerindeki etkisi dikkate alındığında, 2024 yılında günlük yaklaşık 1,3 milyon varil petrol talebi elektrikli araçlar tarafından ikame edilmiştir. Bu miktarın 2030 yılına gelindiğinde günlük 5 milyon varil seviyesine ulaşması beklenmektedir [3].

1.2. Elektrikli Araç Türleri

Elektrikli araçlar türleri ve donanımları bakımından değerlendirildiğinde üç ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar tam elektrikli araçlar, hibrit araçlar ve yakıt pilli araçlardır. Tam elektrikli araçlar, itici gücü tamamen elektrikle sağlayan ve elektrik enerjisini bataryalardan elde eden araçlardır. Ana bataryaya ek olarak, yüksek güç gerektiğinde (örneğin, yokuş çıkma veya hızlanma gibi durumlarda) süper kapasitörler ya da ikinci bir batarya gibi yardımcı güç kaynakları kullanılır. Yüksek enerji yoğunluğu uzun menzil sağlarken, yüksek güç yoğunluğu ivmelenme ve tırmanma performansını artırır. Süper kapasitörler, düşük enerji yoğunluğuna rağmen çok yüksek güç yoğunluğu sunarak ivmelenmeyi destekler. Elektrikli araçlar, hidrokarbon yakıt kullanan araçlara göre daha verimlidir. Elektrikli araçlar, enerji verimliliği açısından yaklaşık %46 oranında iş gücüne dönüştürme sağlarken, hidrokarbon yakıt kullanan araçlarda bu oran %18-25 arasındadır. Bu da elektrikli araçların enerji kullanımında çok daha verimli olduğunu göstermektedir [2].

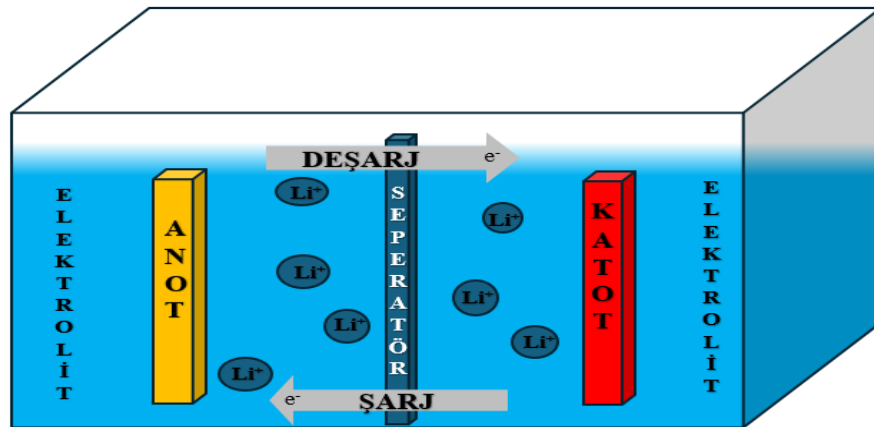
Hibrit elektrikli araçlarda enerji dönüşüm sistemi; enerji depolama birimi, güç ünitesi ve taşıtın itici mekanizmasından meydana gelir. Enerji depolama amacıyla en çok tercih edilen seçenek bataryalar olsa da süper kapasitörler ve volanlar da bu amaçla kullanılabilir. Bataryalar günümüzde en yaygın enerji depolama sistemi olmakla birlikte, alternatif depolama teknolojileri üzerine araştırmalar sürmektedir. Hibrit güç ünitesi olarak Otto motorları, dizel motorlar, gaz türbinleri ve yakıt pilleri değerlendirilebilmektedir. İtici güç, seri hibrit sistemlerde yalnızca elektrik motoru tarafından sağlanırken, paralel hibrit sistemlerde elektrik motorunun yanında içten yanmalı motorlar da araca hareket kazandırabilmektedir [4].

Yakıt pilli bir araç; yakıt depolama sistemi, yakıt pili ve kontrol ünitesi, güç dönüştürücü-kontrol birimi ile tahrik sisteminden bir diğer deyişle elektrik motorundan oluşur. Depolama sisteminde tutulan hidrojen, yakıt işleme sürecinden geçirilerek yakıt piline iletilir. Bu tür elektrikli araçlarda enerji depolama aracı olarak bataryaların yerine süper kapasitörler de kullanılabilir. Yakıt pilinin kontrol

ünitesi, gerilim ve akım değerlerini düzenleyerek ihtiyaç duyulan güce göre sisteme verilecek hidrojen miktarını ayarlamakta ve bu doğrultuda çalışmaktadır. Ancak günümüzde süper kapasitörlerin bataryaların yerini tam olarak alabilmesi için hem maliyet hem de güvenilirlik açısından önemli geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır [2,5].

1.3. Lityum Pillerin Çalışma Prensipleri

Lityum iyon pillerin tanımı genellikle, hem pozitif hem de negatif elektrotlarda lityum iyonları taşıyıcı olarak kullanan bir pilin, Li-ion pili olarak adlandırılabilceği şeklinde kabul edilmektedir [6]. Lityum iyon pillerde, anot olarak grafit, katot olarak çeşitli metal oksitleri, elektrolit olarak ise iyon ileten tuzlar içeren karbonat bazlı bir sıvı kullanılır. Elektrotlar arasında geçirgen bir ayırıcı yerleştirilir. Lityum iyon pillere ait temel şema Şekil 1.3’de gösterilmiştir.

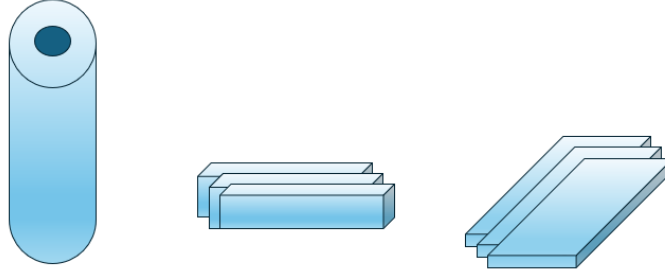


Şekil 1.3. Lityum iyon pil temel şeması.

Bu tanıma göre, lityum-iyon piller için birçok hücre kimyası türü bulunmaktadır, bu nedenle "lityum-iyon pil" terimi, kurşun asit veya nikel kadmiyum gibi tek hücre kimyasını belirtmez, ancak tanım kapsamında bir dizi hücre kimyasını ifade eder. Gelecekte yeni hücre kimyalarının geliştirilme olasılığı bulunmaktadır [6].

Farklı lityum iyon pil tipleri farklı koşullarda çalışabilir. Günümüz dünyasında yedi tip Lityum-iyon pil kullanılmaktadır. Bunlar: Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Nikel Manganez Kolbalt Oksit (NMC), Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA), Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Titanat Oksit (LTO), Lityum Sülfür Dioksit (Li-SO₂) (Şarj Edilemez), Lityum Manganez Dioksit (Li-MnO₂) (Genellikle Şarj Edilemez). Lityum-iyon pil seçimi uygulamanın önceliklerine bağlıdır. Yüksek

enerji yoğunluğu için NMC veya NCA uygun olabilir. Güvenlik ve uzun ömür en önemli ise, LFP veya LTO daha iyi seçenekler olabilir. Li-SO₂ gibi yeni gelişmeler gelecek için umut vad ediyor ancak ana akım haline gelmeden önce teknik engellerin aşılması gerekiyor. Bu piller Şekil 1.4'de gösterildiği gibi farklı tasarımlarda olabilir.



Şekil 1.4. Lityum iyon pil tasarımları.

Lityum Kobalt Oksit (LCO): Bu kimya, Lityum-iyon piller için ilk ticari olarak uygulanabilir yüksek enerji yoğunluğu seçeneğini sunmuştur. Bu, elektrikli araçlar için iyi bir menzil veya elektronik cihazlar için uzun süreli kullanım anlamına gelir. Ancak, LCO'nun bazı dezavantajları vardır. Güvenlik bir endişe kaynağıdır, çünkü LCO hücreleri yüksek sıcaklıklarda ısınma (termal kontrol kaybı) eğilimindedir. Ayrıca, daha düşük bir döngü ömrüne sahiptirler, yani diğer Lityum-iyon türlerine kıyasla daha az şarj döngüsüne dayanabilirler. Bu sınırlamalar nedeniyle, günümüzde LCO daha az yaygındır.

Lityum Nikel Manganez Kolbalt Oksit (NMC): Bu, Lityum-iyon piller için popüler bir tercihtir ve enerji yoğunluğu, güvenlik ve maliyet arasında bir denge sunar. Sihir, katottaki üç metalin oranlarında yatmaktadır: nikel, manganez ve kobalt. Yüksek nikel içeriği, enerji yoğunluğunu artırır, ancak güvenliği ve ömrü azaltır. Tersine, daha fazla Manganez, güvenliği ve döngü ömrünü iyileştirir, ancak enerji yoğunluğunu düşürür. Pil üreticileri, NMC kimyasını belirli uygulamalara göre özelleştirebilir. Örneğin, elektrikli araçlar daha uzun menzil için daha yüksek bir nikel oranını tercih edebilirken, tüketici elektroniği daha iyi güvenlik ve uzun ömür için daha fazla Manganez tercih edebilir.

Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA): NMC'ye benzer şekilde, NCA nikel, kobalt ve üçüncü bir element kullanır, ancak burada Manganez yerine Alüminyum kullanılır. NCA, iyi bir enerji yoğunluğu ve termal stabilite sunar, bu da onu yüksek

performans gerektiren uygulamalar için çekici kılar. Ancak, Alüminyum kullanımı nedeniyle NMC'ye göre daha pahalı olabilir.

Lityum Demir Fosfat (LFP): Bu kimya, yüksek enerji yoğunluğu yerine güvenlik ve döngü ömrünü ön planda tutar. LFP, mükemmel güvenlik özelliklerine sahiptir ve LCO veya NMC'ye kıyasla çok daha fazla şarj döngüsüne dayanabilir. Bu, güvenlik ve dayanıklılığın kritik olduğu uygulamalar için, örneğin güç araçları, tıbbi cihazlar ve sabit enerji depolama gibi alanlar için ideal hale getirir.

Lityum Titanat Oksit (LTO): LTO, olağanüstü güvenlik, son derece uzun döngü ömrü ve düşük sıcaklıklarda iyi performans sergilemesiyle öne çıkar. Bu özellikler, sık şarj döngüleri ve soğuk ortamlarda güvenilir çalışmayı gerektiren uygulamalar için mükemmel bir seçenek olmasını sağlar, örneğin toplu taşıma otobüsleri veya enerji şebekesi dengeleme sistemleri gibi. LTO piller, diğer seçeneklere kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olup genellikle daha pahalıdır.

Lityum Sülfür Dioksit (Li-SO₂): Bu pil türü, elektrikli araçlar veya uzun süreli elektronik cihazlar için devrim niteliğinde olabilecek çok yüksek bir teorik enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak, önemli teknik zorluklar devam etmektedir. Sınırlı döngü ömrü ve güvenlik endişeleri, Li-SO₂'nin yaygın olarak kullanılmadan önce çözülmesi gereken engellerdir. Bu pil teknolojisinin potansiyelini açığa çıkarmak için araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Lityum Manganez Dioksit (Li-MnO₂): Bu kimya, güvenlik ile makul bir döngü ömrü arasında iyi bir denge sunar, ancak enerji yoğunluğu bazı diğer seçeneklere göre daha düşüktür. NMC ve LFP gibi daha iyi performans gösteren kimyaların gelişmesiyle birlikte, Li-MnO₂ günümüzde eskisi kadar yaygın kullanılmamaktadır.



2. ELEKTRİKLİ ARAÇ YANGINLARI

2.1. Elektrikli Araç Yangınlarının İncelenmesi

Tam elektrikli veya hibrit araçlarda meydana gelen yangın vakaları, görülme sıklığı bakımından değerlendirildiğinde, mevcut istatistikler ışığında içten yanmalı motorlu araçlarda rapor edilen yangın oranlarına kıyasla oldukça düşük seviyelerde görünmektedir. Ancak bu durum, yüzeysel bir yorumla yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. Zira uluslararası otomotiv pazarında elektrikli ve hibrit araçların toplam satış hacmi, halen içten yanmalı motorlu araçların satış hacminin önemli ölçüde gerisindedir. Dolayısıyla mevcut istatistiklerde yangın olaylarının sayıca az görünmesi, bu araç türlerinin yaygınlık düzeyinin görece düşük olmasından kaynaklanmakta; bu da mutlak sayıların risk değerlendirmesinde tek başına belirleyici olamayacağını göstermektedir.

Bu oranın düşük olması, kısa vadede istatistiklere yansıyan vakaların “önemsiz” ya da “marjinal” olarak algılanmasına yol açsa da, küresel pazarda elektrikli ve hibrit araçların kullanım oranı önümüzdeki yıllarda hızla artış gösterecektir. Bu artış, yalnızca toplam araç parkındaki elektrikli araç sayısının yükselmesine değil, aynı zamanda kentsel alanlarda, uzun mesafe taşımacılığında ve toplu taşıma filolarında daha geniş bir yelpazede kullanılmalarına da neden olacaktır. Bu gelişmeler, lityum iyon batarya teknolojilerinin yapısal riskleri ve termal kontrol kaybı potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, yangın riskinin mutlak sayılarla birlikte artmasına yol açacak; dolayısıyla mevcut düşük oranlar, gelecekteki tehlikenin boyutlarını öngörmede yetersiz kalacaktır. Bu bağlamda, riskin doğru şekilde değerlendirilmesi için yalnızca mevcut olay sıklıklarının değil, aynı zamanda araç parkının kompozisyonundaki değişimin, batarya kapasitesi trendlerinin, üretim teknolojilerindeki gelişmelerin ve güvenlik standartlarının da dikkate alındığı uzun vadeli projeksiyonların hazırlanması elzemdir.

Elektrikli araç yangınları ile ilgili itfaiye raporları incelendiğinde, elektrikli araçlar söndürülüp, hurda alanına götürüldükten günler sonra bile tekrar yanabildiği görülmektedir. İçten yanmalı araçların söndürülmesinde kullanılan ortalama su

miktarı, 2.000 ila 4.000 litre iken; elektrikli araç yangınlarını söndürmek için gerekli olan su miktarı, 120.000 ila 160.000 litredir. Oran olarak değerlendirildiğinde, yaklaşık 40 kat daha fazla su kullanılması gerekmektedir [7].

Birleşik Krallık'ta 2017 yılında elektrikli bisiklet/skuter kaynaklı yangınların sayısı 2, 2023 yılında 207 ve 2024 yılında 211'e ulaşmıştır. Vakalar 2024 yılında 175 olay ile Londra'da yoğunlaşmış olup, Londra itfaiyesi özellikle elektrikli bisiklet/skuter kaynaklı artan yangın riskine dikkat çekmiştir. Resmî hükümet verileri, söz konusu yangınların 2024 yılında 8 ölümle sonuçlandığını göstermektedir. Olayların yaklaşık yarısı konut içi alanlarda (yatak odaları, mutfaklar, koridorlar), üçte birinden fazlası ise dış mekânlarda (bahçeler, balkonlar, kulübeler) meydana gelmiş; yangın vakalarının neredeyse tamamında batarya kaynaklı olduğu tespit edilmiştir [8].

New York İtfaiyesi tarafından 2019–2024 yılları arasında lityum iyon pil yangınlarına ilişkin yürütülen resmi yangın vaka araştırmalarına göre; rapor edilen olay sayıları 2019 yılında 30, 2020'de 44, 2021'de 104, 2022'de 219, 2023'te 268 ve 2024'te 279 olarak kaydedilmiştir. Aynı dönem için bildirilen yaralanma sayıları sırasıyla 13, 23, 79, 147, 150 ve 99; ölüm sayıları ise 0, 0, 4, 6, 18 ve 6'dır. Bu veriler, 2019–2023 dönemi boyunca hem olay sayılarında hem de yaralanma vakalarında keskin bir artış eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 2021 sonrası dönemde gözlemlenen artış, lityum iyon pillerin kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak yangın riskinin de ciddi şekilde yükseldiğine işaret etmektedir. 2023 yılı, bu dönemde hem yaralanma (150 vaka) hem de ölüm (18 vaka) açısından en yüksek seviyelerin kaydedildiği yıl olmuştur.

2024 yılına gelindiğinde ise olay sayısında 2023'e kıyasla hafif bir artış (268'den 279'a) gözlemlenmesine rağmen, yaralanma sayılarında önemli bir düşüş (150'den 99'a) ve ölüm vakalarında belirgin bir azalma (18'den 6'ya) kaydedilmiştir. Bu durum, yangın önleme ve müdahale stratejilerinde alınan iyileştirici önlemlerin, personel eğitimlerinin ve kamu farkındalık çalışmalarının etkili olmuş olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, toplam vaka sayısının yüksek seyretmesi, riskin devam ettiğini ve önleyici tedbirlerin sürekli olarak güncellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Veriler ayrıca, lityum iyon pil yangınlarının yalnızca olay sıklığı bakımından değil, yarattığı can kayıpları açısından da ciddi bir halk sağlığı ve güvenlik problemi haline geldiğini göstermekte; bu nedenle batarya güvenliği, yangın önleme teknolojileri ve acil durum müdahale prosedürlerinin öncelikli politika alanları

arasında yer alması gerektiğini ortaya koymaktadır. [9]. Bu istatistikler, tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. New York itfaiyesi lityum iyon pil yangın istatistikleri [9].

İlgili yıl	Soruşturma	Yaralanmalar	Ölümler
2019	30	13	0
2020	44	23	0
2021	104	79	4
2022	219	147	6
2023	268	150	18
2024	279	99	6

2022, 2023 ve 2025 yıllarında açık denizlerde meydana gelen yangın olayları, elektrikli araçların toplu deniz taşımacılığı sürecinde lityum iyon pillerin barındırdığı yangın riskini dramatik biçimde ortaya koymaktadır [10–12]. Bu tür vakalar, özellikle ro-ro gemileri, konteyner gemileri ve diğer araç taşıma platformlarında, bir arıza veya termal kontrol kaybı sonucunda ortaya çıkabilecek zincirleme yangınların hem personel güvenliği hem de yüksek maliyetli yükler açısından ne denli yıkıcı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yalnızca taşımacılık aşamasında değil, lityum iyon pil üretim, montaj ve geri dönüşüm tesislerinde de benzer risk unsurlarının devreye girdiği görülmekte; bu tesislerde meydana gelen kazalar, yanlış depolama, mekanik hasar veya üretim hatalarının yangın tehlikesini tetikleyebileceğini kanıtlamaktadır [13–15].

Bu bağlamda, uluslararası denizcilik örgütleri, liman otoriteleri ve taşımacılık şirketleri tarafından yürürlükteki protokollerin, tehlikeli malların deniz yoluyla taşınmasına ilişkin mevcut düzenlemelerin ve denetim mekanizmalarının ivedilikle gözden geçirilmesi ve güçlendirilmesi gerekmektedir. Söz konusu düzenlemeler yalnızca teknik standartları değil, aynı zamanda yangın algılama, söndürme sistemleri, acil tahliye prosedürleri ve personel eğitim protokollerini de kapsamalıdır. Böylelikle hem uluslararası ticaretin güvenliği sağlanabilir hem de lityum iyon pillerin küresel tedarik zincirindeki kritik rolü sürdürülebilir ve güvenli bir biçimde korunabilir.

Türkiye Cumhuriyeti’nde elektrikli araç yangınlarına ilişkin özel, sistematik ve kapsamlı istatistiksel veriler henüz bulunmamakla birlikte, ulusal ve yerel medyada yer alan haberler ile kamuoyuna yansıyan olaylar, söz konusu riskin boyutunu somut

biçimde ortaya koymaktadır [16–20]. Bu vakalar, elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak yangın riskinin de artış eğiliminde olabileceğine işaret etmekte; bu durum, gerek kullanıcı güvenliğinin sağlanması gerekse olası can ve mal kayıplarının önlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Dolayısıyla, artan bu potansiyel tehlikeye karşı hem tasarım ve üretim aşamalarında uygulanacak mühendislik çözümlerini kapsayan aktif güvenlik önlemleri hem de kullanım sırasında ve sonrasında devreye girecek pasif koruma tedbirlerinin geliştirilmesi, hayata geçirilmesi ve mevzuat çerçevesinde zorunlu hale getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, risk yönetimi yaklaşımlarının güncellenmesi, eğitim faaliyetlerinin yaygınlaştırılması ve ilgili paydaşlar arasında veri paylaşımının artırılması, bütüncül bir güvenlik stratejisinin temel unsurları olarak değerlendirilmelidir.

Elektrikli araç yangınlarının kendine has zorlukları mevcuttur ve lityum piller oksijene ihtiyaç duymadan yanabilirler. Bu yüzden oksijen ile teması kesmek elektrikli araç yangınlarının söndürülmesinde etkili bir yöntem değildir. Lityum pillerin doğaya verdikleri fayda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve karbon ayak izinin azaltılmasında önemli gelişmelere açıktır. Fakat yönetilemeyen risk içeren tüm teknolojik çalışmalar gibi, lityum iyon pil ailesinin geri dönüşüm hizmetlerini de içeren, neden olacağı risklerin elimine edilememesi bu alandaki gelişmelerin sağlıklı kılınması ile doğrudan ilişkilidir.

2.2. Lityum İyon Pil Yangınları ve Söndürme Maddeleri

Lityum iyon piller (LİP), giderek daha taşınabilir hale gelen dünyamızı besleyen öncü teknoloji haline gelmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu sayesinde, kompakt bir yapı içinde önemli miktarda enerji depolama kapasitesine sahip olmaları ve yüzlerce kez şarj edilebilmeleri, bu teknolojiyi geniş bir uygulama yelpazesi için ideal hale getirmektedir. Bu nedenle, lityum iyon pillerle yapılan enerji depolama, çeşitli endüstrilerde önemli bir trend haline gelmiştir. LİP, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve yüksek çalışma potansiyeli gibi özellikleri sayesinde, tüketici elektroniği, elektrokimyasal enerji depolama istasyonları ve elektrikli araçlar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan umut verici enerji depolama cihazları olarak ortaya çıkmıştır [21].

Lityum iyon piller, elektrokimyasal enerji depolamada yaygın olarak kullanılmaktadır ancak reaktif ve yanıcı malzemeler içermektedir [22]. Lityum iyon piller, genellikle

bir kimyasal süreç sonucu yangına yol açan termal kontrol kaybı (TKK) -thermal runaway- olayına duyarlıdır. LİP yangınlarındaki kimyasal reaksiyonlar zinciri, standart bir yangın dörtyüzlüsüne benzerken, LİP yangınlarını konvansiyonel söndürücülerle söndürmek oldukça zordur. LİP'lerin arızaları, bataryanın mekanik hasar, kısa devre, aşırı şarj ve aşırı deşarj gibi anormal çalışma koşullarına veya dışarıdan ısınmaya maruz kalmasıyla tetiklenebilir [22]. Bu maruziyetler, diğer yangınlarda olduğu gibi duman ve alev salınımına yol açar. Ancak, tipik yangınlardan farklı olarak, lityum iyon pil yangınları neredeyse tüm yangın sınıflarının özelliklerini gösterebilir, bu da onları daha karmaşık ve yönetilmesi daha tehlikeli hale getirir.

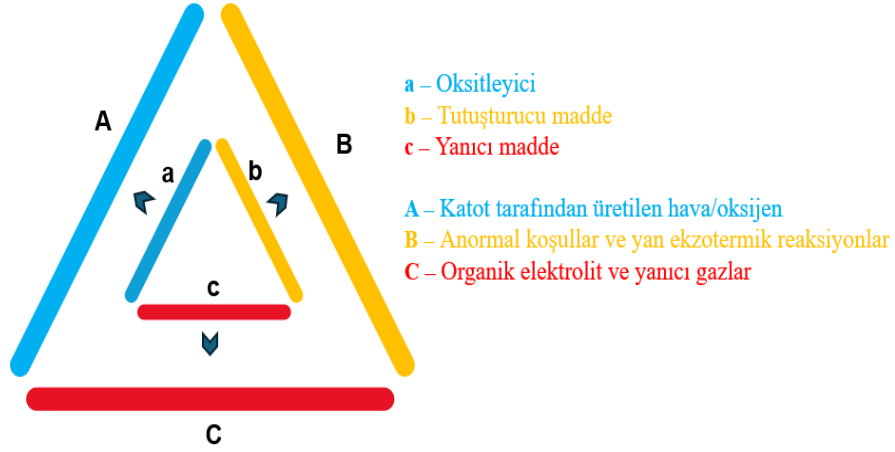
Lityum iyon pilin termal kontrol kaybı sürecindeki tutuşabilir malzemeler, grafit anot (alevlenen katı madde), organik elektrolit (alevlenen sıvı), alevlenen gaz ve lityum metalinden (alevlenen metal) oluşur. Ayrıca tutuşabilen malzemelerin bileşimi, termal kontrol kaybı süreci sırasında sürekli değişmektedir [21]. LİP'lerin yangını, yüksek ısı salınım hızına, hızlı sıcaklık artış hızına ve uzun süreli yüksek sıcaklık süresine sahiptir [21]. Pilin aşırı ısınması, ekzotermal reaksiyonlara yol açabilir ve aşırı miktarda ısı, gaz salınımı, yangın ve potansiyel olarak patlama/hızlı parçalanma ile sonuçlanabilir. Termal kontrol kaybı olmasa bile, ısınmış bir pil yine de tutuşabilir ve zehirli gazlar salabilir. Bu tür olaylardan kaynaklanabilecek zehirli gaz örnekleri arasında hidrojen florür (HF) ve Fosforil triflorür (POF₃) bulunmaktadır [23]. LİP'lerin anormal koşullar altında (aşırı ısınma, aşırı şarj, ezilme, delinme, suya batma, kısa devre vb.) yangına ve patlamaya karşı duyarlılığı, benzersiz kimyasal bileşimi, depolanan elektriksel enerjisi ve yapısına bağlanabilecek bir durumdur ve bu önemli bir zorluk haline gelmiştir [21]. Delinme, aşırı ısınma ve aşırı şarj gibi kullanım koşulları, bir dizi ekzotermik reaksiyon nedeniyle lityum iyon pilin içinde ısı birikmesine yol açabilir. Isı birikimi, hücre sıcaklığını yükseltebilir ve bunun sonucunda ekzotermik reaksiyonları hızlandırarak termal kontrol kaybı davranışına yol açabilir [24]. Ayrıca, katot malzemesinin etkinliği, deşarj hızları ve hatta pilin şekli, pilin termal kontrol kaybı kritikliğini etkileyen faktörler arasında bulunmuştur [24]. Lityum-iyon pilin termal kontrol kaybı etkileri, pilin doluluk oranına (SOC) güçlü bir şekilde bağlıdır. Tam şarjlı pillerin normalize edilmiş ısı salınım hızı (HRR) değeri, benzininkinden biraz daha düşüktür [24].

Lityum iyon pillerin yangına karşı duyarlılığı, üreticilerin güvenlik standartlarını artırma zorunluluğunu daha da belirgin hale getirmiştir. Bu bağlamda, pillerin termal

güvenliğini artırmak amacıyla hava soğutma, sıvı soğutma, faz değişim malzemeleri, ısı borusu soğutma ve hibrit termal yönetim stratejileri gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Ayrıca, daha güvenilir ayırıcıların kullanımı, tutuşmaz sıvı elektrolitler, lityum dendriti içermeyen anotlar ve termal stabiliteye sahip katotlar gibi güvenli tasarım uygulamaları da yaygınlaştırılmaktadır. Bu ilerlemeler, termal kontrol kaybı risklerini azaltmayı ve genel pil güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Ancak, lityum iyon pil yangınları hala sıklıkla meydana gelmekte olup, her olay genellikle patlama ve toksik gaz salınımı ile birlikte gerçekleşir ve bu durum, insan güvenliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır [21].

Farklı şarj durumlarındaki lityum iyon pil dizilerinin yayılma özellikleri farklılık göstermektedir [25] ve kütle kaybı süreci ile ısı salınım hızı esasen pilin doluluk oranına bağlıdır [26]. Pilin doluluk oranı seviyesi arttıkça, yangın olasılığı da artmaktadır. Kontrollü bir propan yangını altında hücre sıcaklığı, HRR, toksik gaz konsantrasyonu ve voltajdaki değişikliklere bakıldığında; %100 doluluk oranına sahip lityum iyon pil hücrelerinin yangına maruz kaldığında reaksiyonları, daha düşük doluluk oranına sahip hücrelere göre daha yoğun olmuştur [26].

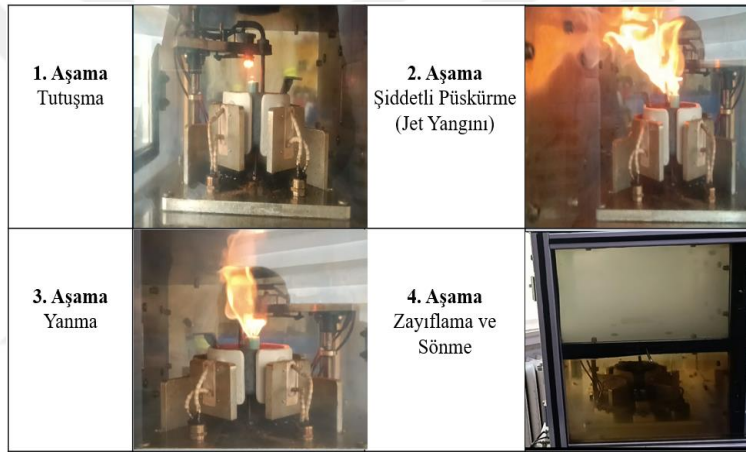
Lityum iyon pil yangınlarının başlaması, yanma tepkimesinin temel tanımına benzer şekilde oluşturulan LİP yangın üçgeni modeli ile etkili bir biçimde açıklanabilir. Bu model, yangın söndürme süreçlerinde temel bileşenler olan yanıcı madde, ısı ve oksijenin geleneksel kombinasyonuna ek olarak, LİP yangınlarında kimyasal reaksiyonların zincirleme etkisinin de kendiliğinden gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 2.1’de [21] gösterildiği üzere, katot tarafından açığa çıkan hava veya oksijen oksitleyici ajan işlevi görürken, organik elektrolit veya yanıcı gazlar yanıcı madde olarak görev yapmaktadır. Mekanik, elektriksel veya termal hasar yanma sürecini tetikleyen birincil ısı kaynakları olarak işlev görmektedir.



Şekil 2.1. LİP yangın üçgeni [21].

Ekzotermik reaksiyonun ilk aşamasında, katı elektrolit ara yüzeyi (SEI) katmanı ilk olarak 90°C–120°C arasında çözünür, bu da anodu elektrolite maruz bırakır [27]. SEI katmanının koruması olmadan, anot olan grafit, elektrolit ile reaksiyona girer [28]. Ayrıca, pilin içindeki ayırıcı, sıcaklık yaklaşık 130°C'yi aştığında erir ve bu da hücre içinde mikro iç kısa devreye yol açar [29]. Mikro iç kısa devre, pilde depolanan elektrik enerjisini joule ısısına dönüştürebilir ve pilin sıcaklık artışını daha da hızlandırabilir [30,31]. Sıcaklık arttıkça, ayırıcı erimeye devam eder ve hatta bozunur, bu da pilin içinde büyük ölçekli kısa devreye ve joule ısı birikimine yol açar [32]. Bundan sonra, sıcaklık yaklaşık 200°C'yi aştığında ise; pilin içindeki katot, anot ve elektrolit büyük oranda bileşenlerine ayrılır [33]. Daha sonra, sıcaklık katlanarak artar ve pil bir ateşleme kaynağı haline gelir. Pilin içindeki anot, katot, ayırıcı ve elektrolit tümü tutuşabilir malzemelerdir. Ayrıca, yukarıda belirtilen reaksiyon bazı tutuşabilir gazlar da üretecektir, bunlar arasında H_2 , CH_4 , C_2H_4 ve C_2H_6 bulunur [34]. Oksitleyici sadece hava tarafından sağlanmaz, aynı zamanda katot bileşenlerine ayrıldığında üretilen oksijen de oksitleyici olarak görev yapar [35,36]. Batarya güvenliğini gaz alevlenme sınırları kullanarak değerlendirirken, iki önemli gösterge dikkate alınır. Bunlar alt alevlenme sınırı ve alevlenebilir konsantrasyonlar aralığıdır. Alt alevlenme sınırının düşük olması ve alevlenebilir konsantrasyonlar aralığının geniş olması, karışık gazların yanma koşullarını sağlama olasılığını artırır ve böylece daha büyük bir patlama tehlikesi oluşturur [37]. Genel olarak, lityum iyon pillerin yanma özellikleri dört aşamada özetlenebilir. Bunlar; tutuşma, şiddetli püskürme (jet yangını), yanma, zayıflama ve sönmedir [38].

LiP’lerde yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine ayrılma gerçekleşirken, 176 °C ile 230 °C arasında jet yangını olarak bilinen bir fenomen meydana gelir. Jet yangını, emniyet tapasının açılmasıyla pilin içinde çözünen maddelerin yanması anlamına gelir. Emniyet tapası, pilin iç basıncını düzenlemek için tasarlanmış olup, pilin tamamının aynı anda yanmasını engeller; ancak, aynı zamanda jet motorlarında görülen jet alevine benzer bir yanma etkisini tetikler. Jet yangınına takiben, ısı transferi hızlanır ve henüz jet yangını aşamasına gelmemiş komşu piller bu aşamaya doğru ilerler. Jet yangını aşamasına ulaşan piller hemen tam yanma aşamasına girer, ancak alevler, başlangıçtaki jet yangınına kıyasla daha sakin görünür. Bu yanma aşaması tamamlandığında, mevcut tutuşabilir malzemeler ve oksijen tükenmeye başladığı için alevler sönmeye başlar. Burada ifade edilen süreç Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

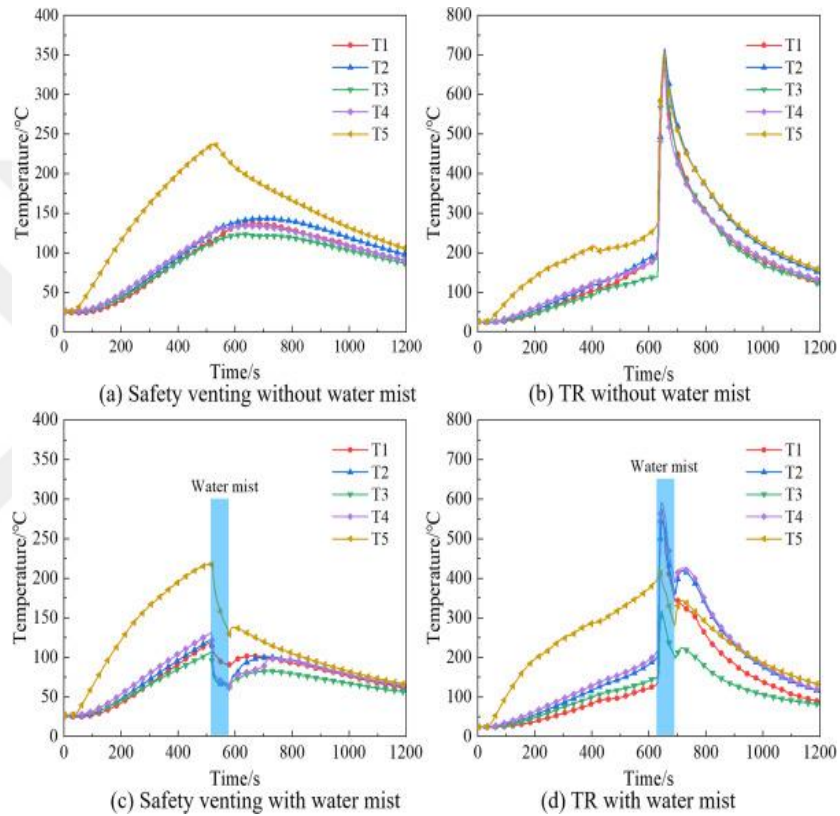


Şekil 2.2. LiP yangın aşamaları.

Yangın söndürücü maddeler, ısıyı emerek, oksijeni uzaklaştırarak ve kimyasal reaksiyon zincirini keserek yanıcı maddeleri baskılamak için kullanılır. Ancak LiP yangınları, bu söndürme mekanizmalarına doğrudan karşıt olan yanma fenomenleri sergileyerek LiP yangınlarının söndürülmesini özellikle zorlaştırır. Günümüzde LiP yangınları için kullanılan söndürücü maddeler katı, sıvı ve gazlı söndürücü maddeler olarak sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırılan söndürme maddeleri belirli avantajlara, dezavantajlara, söndürme mekanizmalarına ve uygun uygulama senaryolarına sahiptir.

Li ve ark. [39], ABC kuru kimyasal tozunun LCO pil yangınına uygulandığında, görünür alevin söndürülmesinden 8 saniye sonra yeniden alevlenme meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kuru kimyasal tozun uygulama sonrası önemli miktarda kalıntı bıraktığını ve bu durumun temizlik işlemini zorlaştırdığını gözlemlemişlerdir. Eğer bu kalıntılar zamanında temizlenmezse, nemi emip elektrik

iletkenliği kazanabilir ve pil hücrelerinde kısa devrelere neden olabilir. Bu nedenle, kuru toz LİP yangınlarını söndürmek için uygun bir yöntem olarak kabul edilmemektedir. Xu ve ark. [40], su sisi (water mist) kullanımının termal kontrol kaybını önlemede ve pili soğutmada etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, su sisi uygulama süresinin uzatılmasının, termal kontrol kaybı yayılmasının başlangıcını daha da geciktirebileceği ve nihayetinde yayılmasını kısıtlayabileceği belirlenmiştir. Su sisi kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlara ait zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

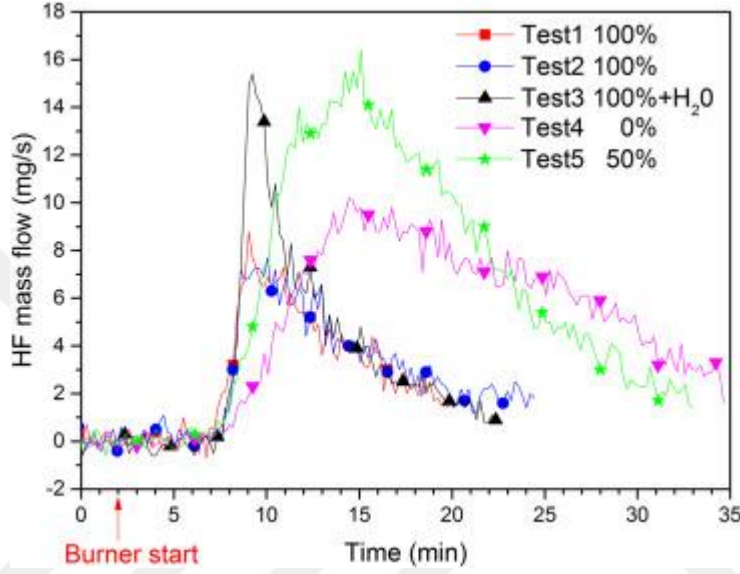


Şekil 2.3. Su sisi deneyi sıcaklık-zaman değişimi [40].

Ancak, Zhang ve ark. [41], 243 Ah kapasiteli bir pil yangınına söndürmekte su sisinin zorluk yaşadığını ve su sisi uygulaması sırasında hücrenin ısı salınım hızının arttığını, toplam ısı salınımının ise herhangi bir söndürücü madde kullanılmadığı duruma benzer olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, havalandırma ve engellerin etkisi nedeniyle, su sisi parçacıklarının pil yüzeyine ulaşmada zorluk yaşadığı belirtilmiştir.

Larsson ve ark. [23], su sisi kullanımının hidrojen florür (HF) üretimini anlık olarak artırdığını bulmuşlardır. 10 kWh kapasiteli bir hibrit elektrikli araç bataryasından potansiyel hidrojen florür salınımının 400-1200 g aralığında olduğunu göstermiştir ve bu hidrojen florür değeri özellikle kapalı alanlar için büyük risk yaratabileceğini ifade

etmişlerdir. Bunun yanı sıra potansiyel olarak hidrojen florür'den daha toksik olabilecek başka bileşiklerin de önemli miktarlarda salınma ihtimali bulunduğunu ve bataryanın şarj durumu ne kadar düşükse, hidrojen florür salınımının o kadar yüksek gerçekleştiğini görmüşlerdir. Bu nedenle, yangın söndürme çalışmaları sırasında artan toksisite riski dikkatle değerlendirilmelidir. Farklı şarj durumlarında ve su sisi kullanıldığı durumda, hidrojen florüre ait birim zamanda akan kütle değişim miktarı deneylerine ait veriler Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



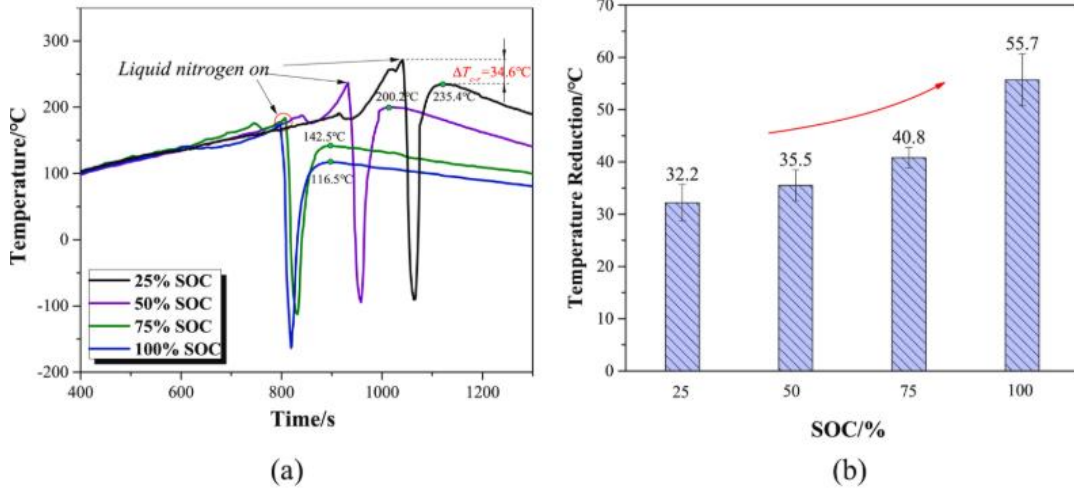
Şekil 2.4. Şarj durumu, su sisi ve HF değişimleri [23].

Peng ve ark. [42], tarafından yapılan bir çalışmaya göre, lityum iyon pil yangınları için su sisi söndürücü performansını artırmak amacıyla üç farklı iyonik olmayan yüzey aktif madde (FS3100, Tween 80 ve APG0810) karşılaştırılmıştır. APG0810, suyun yüzey gerilmesini etkili bir şekilde azaltarak su sisi'nin soğutma ve söndürme yeteneklerini artırırken, Tween 80, yüksek köpük oluşturma yeteneği sayesinde yangın söndürmeyi geliştirerek termal kontrol kaybı sırasında hücre yüzeyinin maksimum sıcaklığını doğrudan azaltır. APG0810, genel soğutma performansı açısından üstün olmasına rağmen, pil hücrelerinin tepe sıcaklığını kontrol etme konusunda Tween 80'den daha az etkili olmuştur. APG0810 çözeltisine defoaming ajanları eklemek, kabarcık kırılmasını artırarak hücre yüzeyindeki soğutma etkisini iyileştirmiştir. APG0810-1, köpük oluşumunu aynı anda azaltarak ve kabarcık kırılmasını teşvik ederek en etkili performansı göstermiştir. Bulgular, uygun köpük içeriği ve kırılabilirliğe sahip formülasyonların, LİP yangınlarında termal kontrol kaybı riskini etkili bir şekilde azaltmak için kritik olduğunu göstermektedir. F-500 ajanının

eklenmesi, ateşleme induksiyon süresini etkili bir şekilde uzatma ve LİP alevinin tepe sıcaklığını düşürme yeteneğini göstermiştir. Bununla birlikte, suyun yüksek elektriksel iletkenliği, daha geniş gelişim ve uygulama alanlarını sınırlamaya devam etmektedir [43].

CO₂, genellikle çevredeki oksijeni azaltarak veya yerinden ederek bir yangın söndürücü madde olarak kullanılır. LİP'lerin yanma sürecinde oksijen üretmesi, CO₂'nin bir söndürücü madde olarak etkinliğini önemli ölçüde sınırlamaktadır. Xu ve ark. [44], yaptıkları çalışmada görünür alev, söndürücü madde uygulanmadan önce söndürüldüğünde bile, ateşleme kaynağı ve oksitleyicinin tamamen ortadan kaldırılmadığını ve bu durumun CO₂ kullanıldığında LİP yangınlarında yeniden alevlenmenin sıkça meydana gelmesine yol açtığını sonucuna varmışlardır. Zang ve ark. [41], HFC-227ea kullanımının açık bir ortamda 243 Ah kapasiteli büyük ölçekli LiFePO₄ (LFP) pil yangınına söndürmede sınırlı etkinlik gösterdiğini bulmuşlardır. Bu nedenle, HFC-227ea'nın kapalı alanlarda, mümkün olan en erken zamanda uygulanması ve söndürme performansını artırmak için soğutma süresinin uzatılması önerilmektedir.

Zhang ve ark. [45], C₆F₁₂O (NOVEC 1230) kullanımının, 12 LFP LİP içeren bir pil modülünde (nominal voltaj: 3.7 V, nominal kapasite: 243 Ah) etkili yangın söndürme ve soğutma performansı sergilediğini, termal kontrol kaybının yayılmasını başarıyla baskıladığını bulmuşlardır. Ancak, Liu ve ark. [46], C₆F₁₂O kullanımının zararlı gazların salınımını artırdığını ve bu tehlikeli gazların konsantrasyonunun C₆F₁₂O miktarı arttıkça yükseldiğini bildirmişlerdir. Huang ve ark. [47], sıvı azotun LİP üzerindeki soğutma etkisinin, diğer gazlı yangın söndürücü maddelere kıyasla önemli ölçüde üstün olduğunu ve hücre yüzeyi sıcaklığını 0 °C'nin altına düşürebildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, sıvı azot, hücre yüzeyi kritik termal kontrol kaybı baskılama sıcaklığına ulaşmadan önce termal kontrol kaybını geciktirebilir veya hatta engelleyebilir. Bu nedenle, sıvı azot, LİP yangınları sırasında yangın söndürme ve kurtarma operasyonları için büyük bir potansiyele sahip olarak kabul edilmektedir. Ancak, sıvı azotun depolanması ve taşınmasıyla ilgili zorluklar, pratik uygulamaları için önemli engeller oluşturmaktadır. Şekil 2.5'de sıvı azotun 20 saniye, farklı şarj durumlarındaki lityum pillere uygulanması sonucu termal kontrol kaybını engellemesini gösteren sıcaklık eğrisi (a) grafiğinde, termal kontrol kaybını bastırması esnasındaki sıcaklık düşüşü (b) grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sıvı azotun LİP üzerindeki soğutma etkisi [47].

Rao ve ark. [48], aerosol yangın söndürücü maddelerinin bir miktar başlangıç soğutma sağladığını ancak hücredeki ekzotermik reaksiyonlar başlamadan önce pil sıcaklığını önemli ölçüde düşüremediğini bulmuşlardır. Bu yüzden yeniden alevlenme problemi büyük bir zorluk olarak kalmaktadır. Çünkü termal kontrol kaybı yaşayan bir hücre, kalan yakıtı ateşleyebilecek kadar sıcak kalabilir ve hatta komşu hücrelerde termal kontrol kaybı başlatabilir. Ayrıca, su emiliminin ardından kalan aerosol ürünlerinin korozyon ve elektrik iletkenliği olabileceği için pil hasarına yol açabilir ve hatta kısa devrelere neden olabilir. Bu nedenle, aerosol yangın söndürücü maddeler uygulandıktan sonra korunan bölgenin hızla temizlenmesi gereklidir. Sonuç olarak, aerosol yangın söndürücü maddeler, LİP yangınlarını etkili bir şekilde söndürme gereksinimlerini karşılamamaktadır.

LİP'lerin yüksek enerji içeriği onları yangına karşı daha savunmasız hale getirir. Bu nedenle, pil üreticileri veya geliştiricileri LİP'leri yangına dayanıklı hale getirmek için Tablo 2.2'deki önlemler serisini uygularlar. Birkaç hücreden oluşan bir lityum iyon pil yığını, tek bir güç kaynağıymış gibi çalıştırılmaz ve lityum iyon hücreler izin verilen voltaj aralığının dışında hasara karşı çok hassastır. Çoğu LİP hücresi için bu genellikle (2,5 ila 3,65) V aralığındadır. İzin verilen voltaj aralığının aşılması, hücrelerin erken yaşlanmasına ve hücrelerdeki reaktif bileşenler nedeniyle güvenlik risklerine yol açar. Bu nedenle, bireysel hücre voltajlarını ve sıcaklıklarını izleyen uygun bir pil yönetim sistemi gereklidir [49].

Tablo 2.2. LİP yangınlarını önleme tedbirleri.

1	Katot malzemesini yangına dayanıklı bir bileşiğe dönüştürmek.
2	Pil yönetim sistemi (BMS) ile pil hücrelerinin kontrolünü artırarak pil yangınlarına neden olabilecek değişiklikleri (aşırı ısınma, aşırı şarj veya deşarj vb.) izlemek ve bunlara müdahale etmek.
3	Pil hücrelerinde termal kontrol kaybı nedenlerini ortadan kaldırmak için pil takımında termal dengeyi korumak için inert veya soğutucu gazlı sistemler uygulamak.
4	LİP dış katmanlarını yangına dayanıklı hale getirmek.

Pil yönetim sistemlerinin temel işlevleri şunlardır; deşarj akımını azaltarak/düşürülmesini isteyerek herhangi bir hücrenin voltajının bir sınırın altına düşmesini önlemek, şarj akımını azaltarak, şarjı durdurarak veya durdurulmasını isteyerek herhangi bir hücrenin voltajının bir sınırı aşmasını önlemek, pil akımını azaltarak veya soğutma isteyerek pil sisteminin sıcaklığının bir sınırı aşmasını önlemek, şarj/deşarj akımının pil sıcaklığına, doluluk oranına ve diğer çeşitli parametrelere bağlı bir sınırı aşmasını önlemek, pil paketiyle ilgili durum bilgilerini veri bağlantısı aracılığıyla ana sisteme ve kullanıcıya sağlamaktır [50].



3. LİTYUM İYON PİL YANGINI DENEYLERİ

3.1. Deney Düzenekinin Oluşturulması

Tam elektrikli araçlarda pil yangınları üzerine yapılan literatür araştırmasında, etkili söndürme sistemi mekanizması üzerine hipotez geliştirebilmek amacıyla Tablo 3.1’de yer alan sorulara yanıt aranmıştır. Bulunan yanıtlar ile ihtiyaçlar belirlenmiş ve deney düzenekinin tasarlanması sürecine geçilmiştir. Deney düzenekinin oluşturulması öncesinde literatürde yer alan örnekler detaylı incelenmiş ve veri toplamada kullanılabilecek yöntemler belirlenmiştir. Örnek deney düzenekleri incelendiğinde genel olarak açık ve kapalı alan olmak üzere iki ayrı deney düzenekği ile karşılaşmıştır. Açık alan deneyleri ısı yayılım hızı, ortaya çıkan ısının çevreye olan etkisi ve söndürme maddesi etkinliği sorularına cevap ararken; kapalı alan deneylerinde bunlara ek olarak gaz analizi yapmak üzere kurulan deney düzenekleri olduğu görülmüştür.

Tablo 3.1. Deney şartlarının oluşturulması öncesinde sorulan sorular.

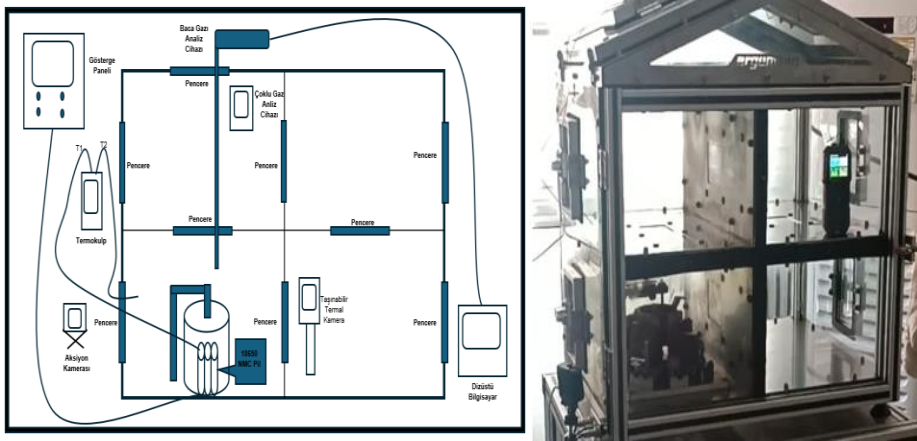
1	Lityum iyon pillerin kimyası nedir?
2	Lityum iyon pillerde termal kontrol kaybına neden olan durumlar nedir?
3	Pil yangınlarında ortaya çıkan yanma ürünlerinin belirlenmesi ve bu yanma ürünlerinin insan ve çevreye olan etkileri nelerdir?
4	Pil yangınlarında ortaya çıkan yanma ürünlerinin pil yangınlarının devamlılığına olan etkisi nedir?
5	Lityum iyon pil yangınlarının söndürülmesinde kullanılabilecek söndürme maddeleri nelerdir?
6	Elektrikli araç yangınları esnasında pil paketlerine ulaşabilecek nasıl bir yangın söndürme sistemi geliştirilmelidir?

Yanıt aradığımız sorular arasında ortaya çıkan yanma ürünü olan gazların yanmaya ve çevreye olan etkisinin incelenmesi hedeflendiği için açık alan deney düzenekğinin bize uygun olmayacağı açıkça görülerek, kapalı deney düzenekği kurulması gerektiği tespit edilmiştir. Kapalı deney düzenekği kurulmasındaki en büyük zorluk, dar alanda

emniyetli bir şekilde yanma ve söndürme maddesi müdahale deneyleri gerçekleştirilirken aynı anda sıcaklık ve gaz analiz verilerinin alınıp, işlenmesi olmuştur. Bu zorlukları önceden öngörebilmek deney sahasının tasarlanmasında ne yazık ki mümkün olamamaktadır. Bu yüzden deney düzeneği oluşturulmasından önce deney ortamının test edilmesi gerekmektedir. Bu sayede deneyler esnasında dar alanda kullanılacak deney materyallerinin konumlandırılması, kayıt altına alınması ve malzemelerin hangi sıra ile kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Deney düzeneği oluşturulurken oluşacak yanma ve patlama etkisinden korunmak birinci öncelik olarak belirlenmiştir. Ayrıca tekrar eden deneyler sonucunda ortaya çıkan yanma ürünü gazların insan sağlığı için büyük risk oluşturacağı bilinmektedir. Bu yüzden deney düzeneği oluşturulurken emniyet büyük önem arz etmektedir. Yanma sonrasında ortaya çıkan gazlar ve anot maddesi olan grafitin kapalı alana saçılması deney ortamında temizlik yapılması ihtiyacı doğurmasının yanı sıra alınacak verilere etki edeceği görüldükçe, deney arası periyotlar uzun tutularak gerekli temizlik ve ortam havalandırma işlemleri yapılmıştır.

Deney düzeneğinin tamamı ısıya ve patlamaya dayanıklı temperli cam ve çelikten yapılmıştır. Yapı, dört kübik odadan oluşmaktadır. Kübik odada, deneysel alanın yüksekliği 20 cm, genişliği 30 cm ve derinliği 50 cm'dir. Pilleri barındıran silindirik konteyner çelikten imal edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü kamera kayıtları, temperli cam muhafazanın dışından güvenli bir şekilde alınabilmektedir. Deney düzeneği, tüm ısı transfer yani iletim, taşınım ve ışıyım yöntemlerinin uygulanmasını sağlar. Yanma, istenilen bir veya daha fazla yöntemle başlatılabilir. Deney düzeneği Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği.

Deney düzeneği, iç sıcaklığın gerçek zamanlı izlenmesini kolaylaştıran ve kayıt özelliğine sahip bir kontrol paneli içermektedir. Şekilde "pencere" olarak adlandırılmış alanlar, lityum pil yangınlarından çıkan gazların üst veya yan bölmelere aktarılmasına olanak tanıyan temperli cam pencerelerden oluşmaktadır. Bu sayede gaz yoğunluklarının güvenli bir şekilde belirlenmesi ve ölçülmesi sağlanır. Ayrıca, temperli cam pencereler, lityum-iyon pil yangınlarında termal kontrol kaybı olaylarından önce, sırasında veya sonrasında tek başına veya birleştirilmiş yangın söndürücü maddelerin güvenli bir şekilde uygulanmasını sağlar. Deney düzeneği, elektrik enerjisiyle çalışan 150 W'lık ısıtıcıları ile donatılmıştır. Deney setine entegre edilmiş sıcaklık ölçüm cihazı, ortam sıcaklığını izlemek ve bu veriyi kontrol paneline iletmek için kullanılmaktadır. Kontrol paneli, gelen sıcaklık ölçümlerini zaman verileriyle birlikte kaydedebilir. Ayrıca, ısıtma elemanlarının belirli bir yüzdeye kadar kademeli olarak ayarlanmasını sağlayarak hassas ısıtma uygulamalarına imkan verir.

Deney düzeneği kullanılarak ortam sıcaklığı ölçülürken, pil hücresinin sıcaklığı Cem DT-3891G 4 Kanal Termokupl sıcaklık veri kayıt cihazı ile kaydedilmiştir. Gaz verileri ise Testo 330 LL cihazı ile toplanmıştır. Fotoğraflar GoPro Hero 7 ile termal görüntüler ise Uni-T UTI730E profesyonel termal kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Gerekliğinde, deney düzeneğinde birikmiş duman ve patlayıcı buharları etkili bir şekilde uzaklaştırmak için harici 220 V kaynakla çalışan taşınabilir bir duman fanı kullanılmıştır. Kullanılan ölçüm cihazlarına ait hata payı verileri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Ölçüm cihazları hata payı verileri.

Ölçüm cihazı	Ölçülen değer	Ölçüm aralığı	Hata payı
Cem DT-3891G 4-Channel Thermocouple Temperature Data Logger	K type thermocouple	-200 – 1372°C	± 1°C
Testo 330 LL	O ₂	0 to 21 Vol. %	±0.2 Vol. % ±20 ppm (0 to 400 ppm)
Testo 330 LL	CO	0 to 4000 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 Professional Thermal Camera	Thermal image	-40°C~400°C	±2°C or ±2%

3.2. Deney Prosedürleri

Lityum-iyon pillerle yapılan deneysel araştırmalar, önemli riskler taşıyan ve tehlikeli koşullarla ilişkilendirilen çalışmalardır. Bu nedenle, güvenliği sağlamak amacıyla kişisel koruyucu ekipmanların düzenli olarak kullanımı zorunludur. Deney düzeneği, tek bir hücrede yanma işlemini sınırlı bir alanda başlatmayı ve bunun farklı bölmelere yayılmasını izlemeyi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu düzenek, lityum-iyon pil yangınlarına yol açan koşulları taklit eder. Isı transferi yöntemleri (iletim, taşınım ve ışıınım) tek başına veya kombinasyon halinde uygulanarak, deneyin gereksinimlerine göre uyarlanabilir. Araştırmalar iki ana bölüme ayrılmıştır: İlk safhada, pilin yanmasından kaynaklanan yanma ürünleri ve sıcaklık dalgalanmaları analiz edilirken, ikinci safhada ise termal kontrol kaybı sonrasında pilin farklı yangın söndürücü maddelere karşı tepkileri incelenmektedir. Deneyler Tablo 3.3'de özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerin yol haritası.

Deney Safhaları ve Numaraları	Deneyin Açıklaması	3.6 V 3200 mAh NMC Tekli Li-on Pil
Safha 1	1 Alevli yanmanın başladığı zaman	X
	Yanma sırasında meydana gelen sıcaklık artış grafiği	X
	2 Yanma sürecinde CO ve CO ₂ emisyonlarının ölçümü	X
	Yanma sırasında ortam O ₂ seviyesinin izlenmesi	X
Safha 2	3 Söndürme maddesi olarak “su” uygulanması	X
	4 Söndürme maddesi olarak “NOVEC 1230” uygulanması	X
	5 Söndürme maddesi olarak “BIOVERSAL” uygulanması	X
	6 Söndürme maddesi olarak “Yüksek Vizikoziteli Sıvı Söndürücü” uygulanması	X

Deneylere ait çeşitli aşamalar aksiyon kamerası ile belgelenirken, deneyler sırasında oluşan ısı, her bir bölme için sıcaklık kaydedici ve termal kamera ile izlenmiştir. Ayrıca, termal kontrol kaybı ve duman içindeki yanma ürünlerini tespit etmek amacıyla baca gazı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deneyler için, nominal 3.6 V gerilim ve 3200 mAh kapasiteye sahip Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) türü silindirik 18650 model lityum-iyon piller kullanılmıştır. Bu piller, yaygın bulunabilirlikleri, maliyet etkinlikleri ve dünya çapında elektrikli ve hibrit araçlarda

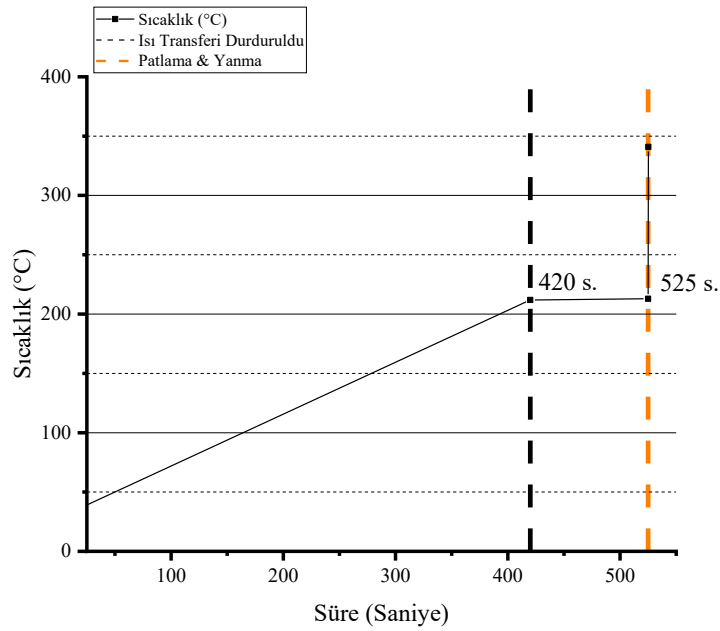
sıkça kullanılıyor olmaları nedeniyle seçilmiştir. Termal kontrol kaybı ve yanma olayları, deney düzeneğinin ısıtma özelliği kullanılarak başlatılmış, aşırı ısınma ile yanma deneylerine başlanmıştır. Deney düzeneği patlama ve duman geçirmez olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneyler sürecinde oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit ve çevre sıcaklığı ölçümleri alınarak kaydedilmiştir. Isı ve duman değerleri, termal kontrol kaybı öncesinde ve sırasında kayıt edilmiş, ayrıca duman içindeki gazlar tespit edilmiştir. Lityum pilin yangın davranışı, herhangi bir müdahale yapılmadan doğal olarak söndüğü ana kadar izlenmiştir. Deneylerin ikinci aşamasında, söndürücü maddelerin uygulanması gerçekleştirilmiş ve ilgili veriler titizlikle kaydedilmiştir. Deneylerin sonunda, veri toplama ve işleme sistematik bir yaklaşımla yapılmıştır. İlk olarak, söndürücü maddelerin etkilerini değerlendirmek için aksiyon kamerası görüntüleri analiz edilmiştir. Baca gazı ölçüm cihazından elde edilen bilgiler işlenmiş ve zaman bazlı grafiklere dönüştürülmüştür. Sıcaklık verileri, sistemin termal davranışını ortaya koyan zaman bazlı bir sıcaklık grafiği oluşturmak için kullanılmıştır. Son olarak, termal kamera verileri, deneysel süreç boyunca ısı dağılımı ve yoğunluğunu değerlendirmek için analiz edilmiştir. Bu adımlar, deneysel sonuçların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini ve yorumlanmasını sağlamıştır. Her bir deney, deneylerin doğruluğunu garanti etmek için üç kez tekrarlanmıştır.



4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Tek Pil Yangın Deneyi

Deneylerin birinci aşamasında, tek hücreli batarya yanması gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 18650 model 3.6 volt, 3200 mAh NMC lityum batarya, iletim yoluyla 150 W elektrik enerjisiyle 7 dakika süreyle ısıtılmıştır. 7 dakikalık süre, bataryanın tipik olarak 8. dakikada patlaması gözlemlendiği için referans olarak seçilmiştir. Batarya, içsel ayrışmayı başlatmak için 7 dakika süreyle ısıtılmış, böylece ekzotermik reaksiyonun bağımsız olarak devam etmesi sağlanmıştır. Bu 7 dakikalık sürenin sonunda, bataryanın sıcaklığı 28.2 °C'den 211.9 °C'ye yükselmiştir. Bu noktada, ısı transferi durdurulmuş ve batarya izlenmeye devam edilmiştir. Isı verişinin sona ermesinin ardından, ekzotermik reaksiyonun devam ettiği ve bataryanın hala ısı ürettiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 1 dakika 45 saniye sonra, bataryanın sıcaklığı 212.9 °C'ye yükselmiştir. Bu aşamada, hızlı bir gaz salınımı gözlemlenmiş ve hemen ardından patlama ve yanma gerçekleşmiştir. Gaz salınımı ile patlama arasında 22 milisaniye geçtiği tespit edilmiştir. Patlamanın ardından, sıcaklık 128 °C artarak 340.9 °C'ye ulaşmıştır. Burada ifade edilen veriler Şekil 4.1'de 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.

Tablo 4.1. Tek pil yanma deneyi ortam gazları.

	Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
Patlama öncesi	%21	0 ile 9 ppm arasında	0 ile 8 ppm arasında
Patlama anında	%20-21	10 ile 41 ppm arasında	9 ile 11 ppm arasında
Patlama sonrası	% 21	41 ile 571 ppm arasında	12 ile 972 ppm arasında

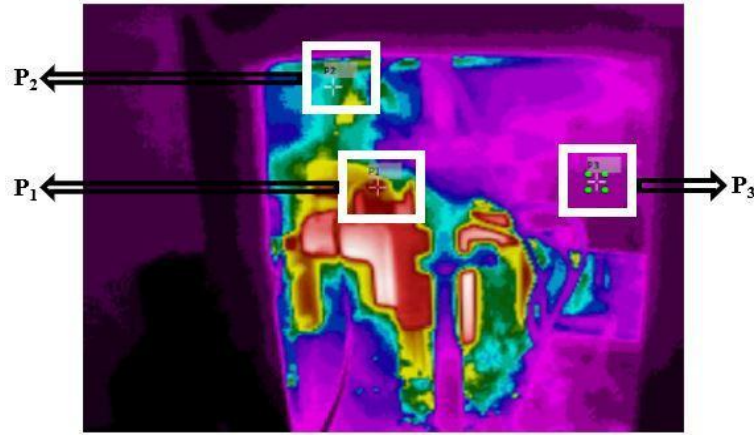
Bu değişimler, patlamanın ortam gaz bileşimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu deneye ait emisyon verileri Tablo 4.1'de, gaz salınımı ve yangın anına ait görseller Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Gaz salınımı ve yangın.

Şekil 4.3'te deneye ait termal kamera görüntüsü ve verileri gösterilmektedir. Bu kapsamda; P1, bataryanın termal kamera görüntüsünü ve verilerini göstermektedir, 213°C, P2, dumanın termal kamera görüntüsünü ve verilerini göstermektedir, 79.1°C, P3, çevrenin termal kamera görüntüsünü ve verilerini göstermektedir, 48.3°C. Termal kamera görüntüsünden elde edilen verilere dayanarak, merkez noktası sıcaklığı 211°C,

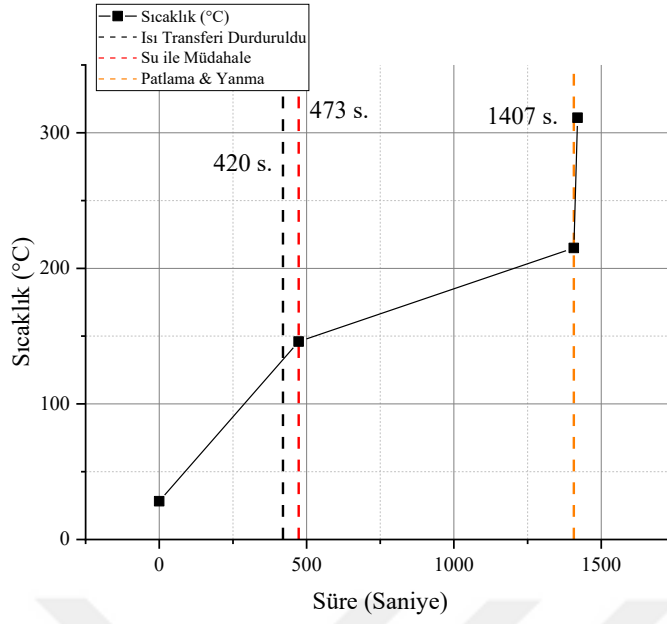
maksimum sıcaklık 361°C, minimum sıcaklık 29.5°C ve emisyon katsayısı 0.95 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Termal kamera görüntüsü.

4.2. Su ile Müdahale Deneyi

Deneyin ikinci aşamasında, su söndürücü madde olarak 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, CO₂, CO ve 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 4.4'te 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.



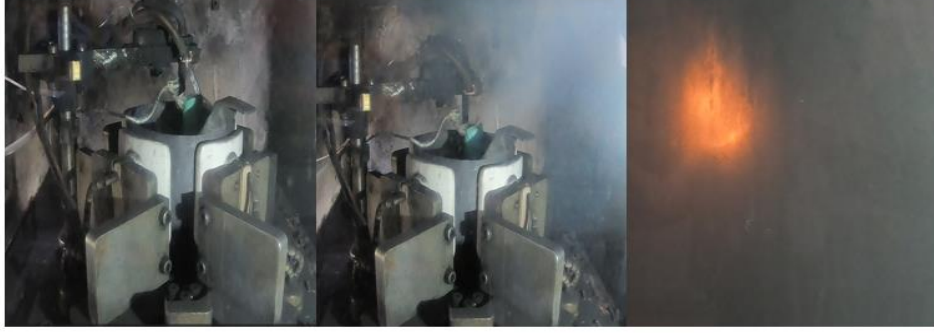
Şekil 4.4. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (su ile müdahale).

Deneyden elde edilen veriler, üç ana bölümde sistematik bir şekilde analiz edilmiş ve emisyon verileri Tablo 4.2'de özetlenip sunulmuştur.

Tablo 4.2. Ortam gazları (su ile müdahale).

Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
Su ile müdahale öncesi	%21	0 ila 10 ppm arasında
Su ile müdahale sonrası	%21	0 ila 12 ppm arasında
Patlama sonrası	%20 – 21 aralığında	37 ila 931 ppm arasında

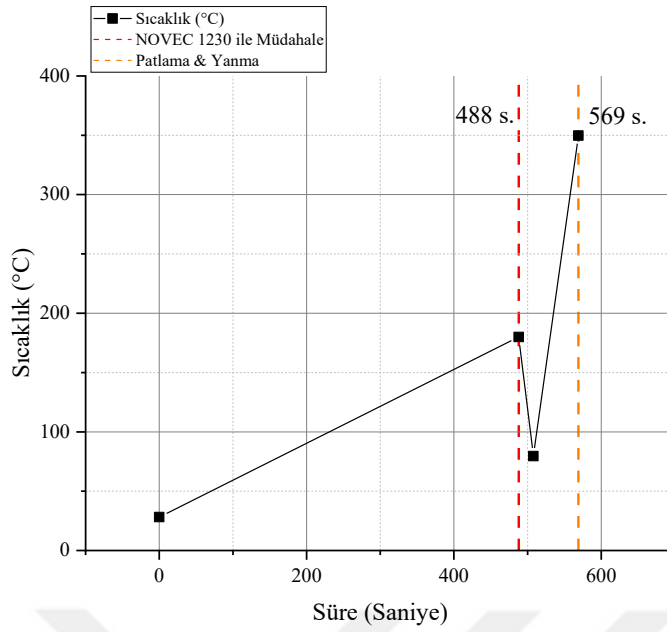
Deney süresince elde edilen; su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Su müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

4.3. NOVEC 1230 ile Müdahale Deneyi

Deneyin bu aşamasında, NOVEC 1230 söndürücü madde olarak test edilmiştir. Novec 1230, sıfır ozon tükenme potansiyeli ve oldukça düşük küresel ısınma potansiyeline sahip, esas olarak dodekafluoro-2-metilpentan-3-on bileşiğinden üretilen çevre dostu bir yangın söndürücü madde olarak tanımlanmaktadır. Yangınları ısıyı emerek ve yanma sürecini keserek söndürmektedir. Bu özellikleri sebebiyle veri merkezleri, müzeler ve tıbbi tesisler gibi hassas ortamlarda kullanılmak için ideal bir yangın söndürücü haline getiriyor. Bu deneyde 18650 model 3.6 volt, 3200 mAh NMC lityum pili, iletim yoluyla 150 W'lık elektrik enerjisi ile sürekli olarak ısıtılmıştır. Isıtma işlemi sırasında pile ait emniyet tapasında köpürme gözlemlendiğinde, 5 ml NOVEC 1230 söndürücü maddesi uygulanmış ve pil daha sonra izlenmiştir. Isıtma işlemine başladıktan 8 dakika 8 saniye sonra emniyet tapasında köpürme gözlemlenmiş ve bu noktada pilin sıcaklığı yaklaşık 164.8–180 °C'ye ulaşmıştır. NOVEC 1230 uygulandıktan sonra, pilin sıcaklığı yaklaşık 20 saniye içinde 61.5–100.4 °C arasında düşmüştür. Ancak, söndürücü madde uygulandıktan yaklaşık 81 saniye sonra pil patlamış ve yanmıştır. Bu patlama ve yanma süreci sırasında, pilin sıcaklığı yaklaşık 178.9 °C ile 349.7 °C arasında değişmiş ve patlamadan sonra yaklaşık 43 saniye boyunca yanmaya devam etmiştir. Bu veriler Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (NOVEC 1230 ile müdahale).

Deneyden elde edilen veriler, üç ana bölümde sistematik bir şekilde analiz edilmiş ve emisyon verileri Tablo 4.3'de özetlenip sunulmuştur.

Tablo 4.3. Ortam gazları (NOVEC 1230 ile müdahale).

Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
NOVEC 1230 ile müdahale öncesi	0 ila 9 ppm arasında	0 ila 11 ppm arasında
NOVEC 1230 ile müdahale sonrası	9 ila 328 ppm arasında	11 ila 15 ppm arasında
Patlama sonrası	328 ila 1610 ppm arasında	15 ila 37 ppm arasında

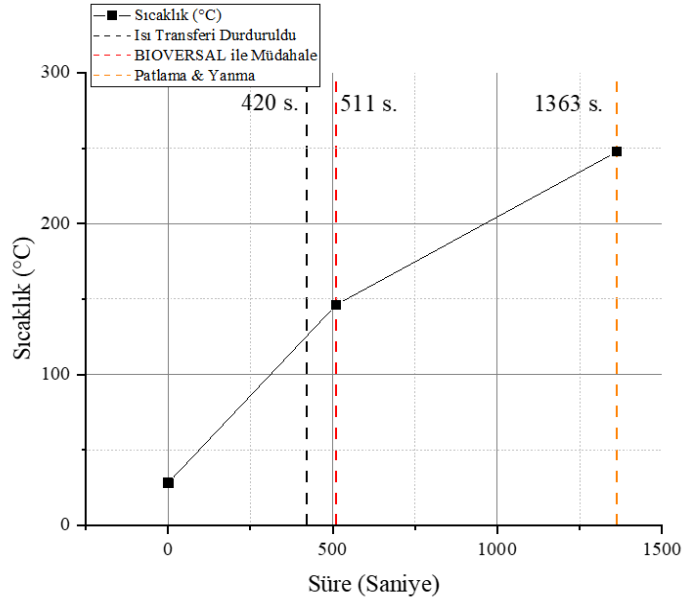
Deney süresince elde edilen; NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. NOVEC 1230 müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

4.4. BIOVERSAL ile Müdahale Deneyi

Bu aşamada, BIOVERSAL kullanarak yapılan söndürücü madde deneyleri gerçekleştirilmiştir. BIOVERSAL, biyolojik olarak çözünebilen bitki bazlı bileşenlerden türetilmiş çevre dostu bir yangın söndürücü madde olup, hidrokarbon bazlı yangınlarla etkili bir şekilde mücadele etmek için tasarlanmıştır. Yangını söndürmek için, tutuşabilen hidrokarbonları kapsülleyip izole ederek alevleri baskılar ve çevresel etkilerini ve toksik kalıntıları minimize eder. Bu deneylerde 18650 model 3.6 volt, 3200 mAh NMC lityum pili, iletim yoluyla 150 W'lık elektrik enerjisi ile 7 dakika süreyle ısıtılmıştır, ardından ısı kaynağı durdurulmuş ve pil gözlemlenmiştir. Bu noktaya kadar elde edilen sıcaklık, CO₂, CO ve O₂ değerleri, tek pil yanma deneyinde elde edilenlerle benzer olduğundan, bu veriler burada tekrar edilmemiştir. Isı kaynağı durdurulduktan sonra, pil ekzotermik reaksiyonuna devam etmiş ve sıcaklık artmaya devam etmiştir. Sıcaklık arttıkça, emniyet tapası açılmış ve bu noktada 5 ml BIOVERSAL, emniyet tapası üzerine yerleştirilen bir müdahale aparatı aracılığıyla enjekte edilmiştir. Emniyet tapasının patlamasıyla birlikte pilin sıcaklığı yaklaşık 146.3 °C'ye ulaşmıştır. BIOVERSAL'ın enjekte edilmesinden 14 dakika 12 saniye sonra bir patlama ve yanma meydana gelmiş ve pilin sıcaklığı, tutuşmadan hemen önce yaklaşık 247.6 °C'ye yükselmiştir. Bu veriler Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (BIOVERSAL ile müdahale).

Deneyden elde edilen veriler, üç ana bölümde sistematik bir şekilde analiz edilmiş ve emisyon verileri Tablo 4.4'de özetlenip sunulmuştur.

Tablo 4.4. Ortam gazları (BIOVERSAL ile müdahale).

Ortam O ₂		Ortam CO	Ortam CO ₂
BIOVERSAL ile müdahale öncesi	%21	0 ila 17 ppm arasında	0 ila 10 ppm arasında
BIOVERSAL ile müdahale sonrası	%20 – 21 aralığında	İlk olarak 17 ppm'den 2 ppm'ye yavaşça düştü, ancak bu durum uzun sürmedi, patlamadan önce tekrar 84 ppm'e ulaştı.	10 ila 11 ppm arasında
Patlama sonrası	%20 – 21 aralığında	200 ila 1025 ppm arasında	14 ila 18 ppm arasında

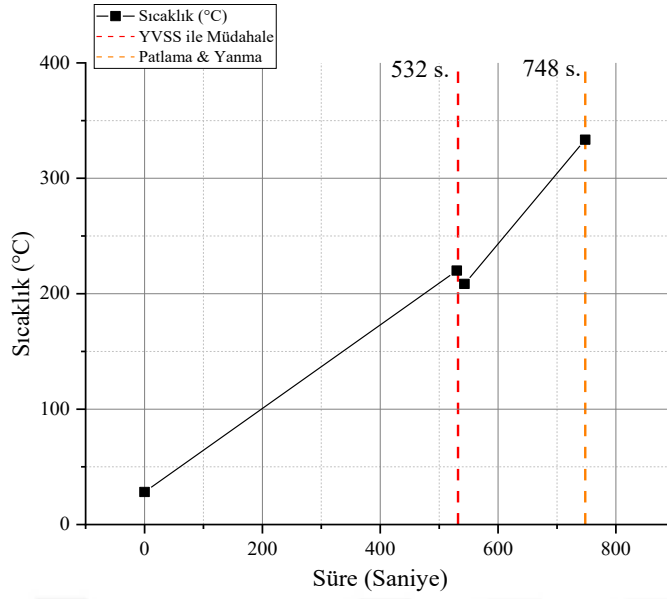
Deney süresince elde edilen; BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımı ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. BIOVERSAL müdahalesi, gaz salınımı ve yangın.

4.5. Yüksek Vizikoziteli Sıvı Söndürme (YVSS) Maddesi ile Müdahale Deneyi

Deneyin bu aşamasında, yüksek vizikoziteli sıvı söndürme maddesi (YVSS) söndürücü madde olarak kullanılmıştır. 18650 model 3.6 volt, 3200 mAh NMC lityum pili, iletim yoluyla 150 W'lık elektrik enerjisi ile sürekli olarak ısıtılmıştır. Isıtma işlemi sırasında, pilin emniyet tapası açıldıktan sonra 10 ml YVSS söndürücü maddesi uygulanmış ve gözlemlenmeye devam edilmiştir. Isıtma işlemine başladıktan yaklaşık 8 dakika 50 saniye sonra pilin sıcaklığı ~ 220 °C'ye ulaşmıştır. YVSS uygulamasının ardından -emniyet tapası açılmasından yaklaşık 2 saniye sonra- sıcaklık 11 saniye içinde yaklaşık 208.5 °C'ye düşmüş, ancak ardından tekrar yavaşça artmaya başlamıştır. Gaz çıkışı ve emniyet tapası açılmasından sonra, pil 10 ml YVSS maddesiyle 3 dakika 36 saniye süre maruz bırakılmıştır. Bu süreçte sıcaklık artışı ve yangın etkili bir şekilde engellenmiştir. Gaz çıkışı ve patlama noktasında pil sıcaklığında ~ 125 °C'lik bir artış gözlemlenmiştir. Patlamanın ardından pil ~ 30 saniye daha yanmaya devam etmiştir. Bu veriler Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Batarya sıcaklık değişimi ve kritik olaylar (YVSS ile müdahale).

Deneyden elde edilen veriler, üç ana bölümde sistematik bir şekilde analiz edilmiş ve emisyon verileri Tablo 4.5'de özetlenip sunulmuştur.

Tablo 4.5. Ortam gazları (YVSS ile müdahale).

Ortam O ₂	Ortam CO	Ortam CO ₂
YVSS ile müdahale öncesi	%21	0 ila 7 ppm arasında
YVSS ile müdahale sonrası	%21	0 ila 11 ppm arasında
Patlama sonrası	%20 – 21 aralığında	10 ila 19 ppm arasında

Deney süresince elde edilen; gaz salınımı, YVSS müdahalesi, yangın öncesi ve yangın anlarına ait görseller Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Gaz salınımı, YVSS müdahalesi, yangın öncesi ve yangın.

4.6. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tek hücreli pil yangın deneyi sonrasında patlama ve yangın meydana geldiğinde, ölçülen ortam gazlarındaki değişim şu şekilde olmuştur: O₂ konsantrasyonu %21, CO seviyeleri 41 ila 571 ppm arasında, CO₂ seviyeleri ise 12 ila 972 ppm arasında değişmiştir. Su müdahalesine müteakip meydana gelen patlama ve yangın sonrasında, O₂ değeri %20 ile %21 arasında değişirken, CO seviyeleri 37 ppm'den 931 ppm'e kadar artmış, CO₂ seviyeleri ise 14 ile 18 ppm arasında sabit kalmıştır. NOVEC 1230 müdahalesi sonrası gerçekleşen patlama ve yangın olayında, O₂ konsantrasyonu % 17 ile %21 arasında değişirken, CO seviyeleri 41 ila 571 ppm arasında kaydedilmiş ve CO₂ seviyeleri 15 ile 37 ppm arasında değişmiştir. BIOVERSAL müdahalesi sonrasındaki patlama ve yangın olayında ise O₂ değeri %20 ile %21 arasında kalmış, CO seviyeleri 200 ila 1025 ppm arasında değişmiş ve CO₂ seviyeleri önceki ölçümlerle tutarlı olarak 14 ile 18 ppm arasında kalmıştır. Son olarak, YVSS müdahalesi sonrasında gerçekleşen patlama ve yangın olayında O₂ seviyeleri %20 ile %21 arasında, CO konsantrasyonları ise 24 ila 659 ppm arasında değişmiş, CO₂ seviyeleri yine 10 ile 19 ppm arasında ölçülmüştür. Bu veriler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Deney sonuçları karşılaştırma tablosu.

Yapılan Deney	Yanma ve patlama sıcaklığı	Yanma ve patlamaya sıcaklığına eriştiği süre	Söndürme maddesi ile müdahale sonrasında yanma ve patlama sıcaklığına eriştiği süre	Yanma ve patlama sonrasında ölçülen ortam gazları
Tek pil yanma deneyi (deney başladıktan 7 dakika sonrasında ısı enerjisi kesildi)	~213 °C	8 dk. 51 sn.	(Söndürme maddesi ile müdahale yapılmadı)	O ₂ : %21, CO: 41 - 571 ppm CO ₂ : 12 - 972 ppm
Su ile müdahale deneyi (deney başladıktan 7 dakika sonrasında ısı enerjisi kesildi)	~215°C	-	15 dk. 34 sn.	O ₂ : %20 - 21, CO: 37 - 931 ppm CO ₂ : 14 - 18 ppm
NOVEC 1230 ile müdahale deneyi (deney süresince ısı enerjisi verildi)	~236,2 °C	-	1 dk 21 sn. (toplam deney süresi 9 dk. 29 sn.)	O ₂ : %17 - 21, CO: 328 - 1610 ppm CO ₂ : 15 - 37 ppm
BIOVERSAL ile müdahale deneyi (deney başladıktan 7 dakika sonrasında ısı enerjisi kesildi)	~247,6 °C	-	14 dk. 12 sn.	O ₂ : %20 - 21, CO: 200 - 1025 ppm CO ₂ : 14 - 18 ppm
YVSS ile müdahale deneyi (deney süresince ısı enerjisi verildi)	~247°C	-	3 dk. 36 sn. (toplam deney süresi 12 dk. 25 sn.)	O ₂ : %20 - 21, CO: 24 - 659 ppm CO ₂ : 10 - 19 ppm

Yangın ve patlama sıcaklıklarına ulaşma sürelerinin karşılaştırılması sırasında birkaç bulgu gözlemlenmiştir. Tek hücreli pil yanma deneyinde, ısı enerjisi 7 dakika sonra kesildiğinde, yangın ve patlama 8 dakika 51 saniye sonra meydana gelmiştir. Su ile müdahale yapıldığında, ısı enerjisi yine 7 dakikada kesildiği halde, yangın ve patlama sıcaklıklarına ulaşma süresi 15 dakika 34 saniyeye çıkmıştır. Isı enerjisinin sürekli sağlandığı NOVEC 1230 müdahalesinde, kritik sıcaklığa ulaşma süresi 1 dakika 21 saniye olmuştur. Isı enerjisinin tekrar 7 dakikada kesildiği BIOVERSAL deneyinde, yangın ve patlama 14 dakika 12 saniye sonra meydana gelmiştir. Sürekli ısıtma ile yapılan YVSS müdahalesinde ise yangın ve patlama, 3 dakika 36 saniye sonra gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, farklı söndürücü maddeler ve ısı uygulama yöntemlerinin, yangın ve patlamanın tetiklendiği sıcaklıklara ulaşma süresi üzerindeki etkisini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerin ilk safhasında erken müdahalenin önemini vurgulayarak, hızlı bir müdahalenin yangın risklerini hafifletmedeki kritik rolü ortaya koyulmuştur. İkinci safhada, bataryayı aşırı ısınmaktan korumada pasif sistemlerin (örneğin batarya yönetim sistemleri) başarısız olduğu durumlarda farklı söndürücü maddelerin etkinliğine dair bilgiler sunulmaktadır. Bu deneylerde, silindirik 18650 model 3.6 V 3200 mAh Lityum Nikel Manganiz Kobalt Oksit (NMC) piller kullanılmıştır. Bataryanın emniyet tapasının tek bir bataryadan kaynaklanan yanma ve ısı nedeniyle açılması durumunda, yangının etkilerini hafifletmek amacıyla çeşitli söndürücü maddeler test edilmiştir. Denemeler sırasında batarya tutuştuğunda zamanla ortam sıcaklığı ile birlikte O₂, CO₂ ve CO ortam gazlarının seviyeleri ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre, pile müdahale yapılmadığında ~213 °C'de, su ile söndürüldüğünde ~215 °C'de, NOVEC 1230 ile ~236.2 °C'de, BIOVERSAL ile ~247.6 °C'de ve YVSS söndürücü maddesi ile ~247 °C'de patlamış ve yanmıştır.

Bu deneyler farklı söndürücü maddeler ve ısı uygulama yöntemlerinin, yangın ve patlamaya yol açabilecek kritik sıcaklıklara ulaşma süresi üzerindeki etkisini de vurgulamaktadır. Deney sonuçları, iki ayrı senaryo olarak yorumlanmalıdır. İlk senaryoda, enerji yalnızca bir pilde yangın reaksiyonu başlatmak için gerekli süre boyunca sağlanmıştır. Buna karşın, ikinci senaryoda pil sürekli olarak ısı enerjisine maruz bırakılmıştır. Isı enerjisinin sürekli uygulanması, söndürücü maddelerin etkili bir şekilde çalışması için daha zorlu koşullar yaratmaktadır ve bu faktör karşılaştırmalar yapılırken dikkate alınmalıdır. Tüm söndürücü madde deneylerinde, pilin serbestçe yanmasına izin verilen aşamalarda ölçülen ortam gaz miktarında artış gözlemlenmiştir. İlk senaryonun değerlendirilmesinde, su ve BIOVERSAL neredeyse eşdeğer performans sergilemiştir. Diğer taraftan, ikinci senaryoda, YVSS söndürücü maddesi, yangını geciktirme açısından NOVEC 1230'den daha etkili olmuştur. Deney boyunca ısıtılmasına rağmen, YVSS söndürücü maddesi hem patlama hem de yangına karşı belirgin bir direnç göstermiştir.



KAYNAKLAR

- [1] taşıt ne demek TDK Sözlük Anlamı, (n.d.). <https://sozluk.gov.tr/> (accessed June 29, 2025).
- [2] Elektrikli Araçlar: otomobiller | Piri Keşif Aracı, (n.d.). <https://741763626318e402fd7b7e8e2847d78f6534544e.vetisonline.com/index.jsp?modul=advantage-search&p=1&operator=or&fields=all&searchword=+Elektrikli+Ara%C3%A7lar%3A+otomobiller> (accessed July 3, 2025).
- [3] Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer> (accessed August 16, 2025).
- [4] F. ÜNAL, Elektrikli direksiyon sistemi, Piri Keşif Aracı 0 (2007) 0–0. <https://doi.org/0>.
- [5] G. ÇETİNER, Yakıt pillerinin enerji üretim sistemlerinde kullanılması ve mevcut sistemlerle mukayese edilmesi, Piri Keşif Aracı 0 (2008) 0–0. <https://doi.org/0>.
- [6] T. Horiba, Lithium-ion battery systems, Proceedings of the IEEE 102 (2014) 939–950. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2319832>.
- [7] Tesla in fireball crash needs 40 times the water as regular car to put out flames, says fire crew | The Independent, (n.d.). <https://www.independent.co.uk/climate-change/tesla-crash-driver-arrested-fire-b1901603.html> (accessed August 10, 2025).
- [8] Record number of ebike fires in UK prompts renewed risk warnings | Cycling | The Guardian, (n.d.). https://www.theguardian.com/news/2025/jun/05/record-number-of-ebike-fires-in-uk-prompts-renewed-risk-warnings?utm_source=chatgpt.com (accessed August 10, 2025).
- [9] Lithium-ion Battery Fire Learnings from FDNY, (n.d.). <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/nfpa-journal/2025/08/08/lithium-ion-battery-fires-fdny?> (accessed August 10, 2025).
- [10] 22 crew members safe after fire aboard cargo ship carrying vehicles off Alaska | AP News, (n.d.). <https://apnews.com/article/cargo-ship-electric-car-fire-alaska-22fff66494b023142376bda01a781744?> (accessed August 10, 2025).
- [11] Q&A: Fire on board the Fremantle Highway ship – DW – 07/30/2023, (n.d.). <https://www.dw.com/en/fremantle-highway-ship-fire-qa/a-66385434> (accessed August 10, 2025).
- [12] Electric vehicle batteries complicate effort to put out flaming cargo ship, (n.d.). <https://www.axios.com/2022/02/21/cargo-ship-burning-luxury-cars?> (accessed August 10, 2025).

- [13] Missouri Battery Recycling Plant Fire, (n.d.). <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2024/11/01/missouri-battery-plant-fire> (accessed August 10, 2025).
- [14] Massive fire at US' Northern California lithium battery facility continues to burn, (n.d.). <https://www.aa.com.tr/en/americas/massive-fire-at-us-northern-california-lithium-battery-facility-continues-to-burn/3454913> (accessed August 10, 2025).
- [15] Güney Kore'de fabrikada çıkan yangında 20 kişi öldü - Son Dakika Haberleri, (n.d.). <https://www.trthaber.com/haber/dunya/guney-korede-fabrikada-cikan-yanginda-22-kisi-oldu-864786.html> (accessed August 10, 2025).
- [16] Elektrikli araçlarda yangın riski: Su ya da köpük işe yaramıyor, (n.d.). <https://www.ntv.com.tr/otomobil/elektrikli-araclarda-yangin-riski-su-ya-da-kopuk-ise-yaramiyor,eCM1sAPkPESZCrhvR1FWHA> (accessed August 10, 2025).
- [17] İstanbul'da bir elektrikli araç şarj sırasında alev aldı | DonanımHaber, (n.d.). <https://www.donanimhaber.com/istanbul-da-bir-elektrikli-arac-sarj-sirasinda-alev-aldi--185114> (accessed August 10, 2025).
- [18] Başakşehir'de elektrikli araçta yangın: Bina tahliye edildi, (n.d.). <https://www.ntv.com.tr/turkiye/basaksehirde-elektrikli-aracta-yangin-bina-tahliye-edildi,r-nk9n9BcUSI7L7pv1bXGw> (accessed August 10, 2025).
- [19] Sevkiyat aşamasındaki 6 elektrikli otomobil yandı - Son Dakika Haberleri, (n.d.). <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/sevkiyat-asamasindaki-6-elektrikli-otomobil-yandi-801041.html> (accessed August 10, 2025).
- [20] Gaziantep'te Bir Togg T10X Şarj Olurken Yandı - Webtekno, (n.d.). <https://www.webtekno.com/gaziantep-togg-t10x-yandi-h143736.html> (accessed August 10, 2025).
- [21] 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>.
- [22] Y. Zhang, D. Kong, P. Ping, H. Zhao, X. Dai, X. Chen, Effect of a plate obstacle on fire behavior of 18650 lithium ion battery: An experimental study, *J Energy Storage* 54 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105283>.
- [23] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, B.E. Mellander, Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests, *J Power Sources* 271 (2014) 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>.
- [24] P. Huang, H. Chen, A. Verma, Q. Wang, P. Mukherjee, J. Sun, Non-dimensional analysis of the criticality of Li-ion battery thermal runaway behavior, *J Hazard Mater* 369 (2019) 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.049>.
- [25] J. Zhao, F. Xue, Y. Fu, Y. Cheng, H. Yang, S. Lu, A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents, *IScience* 24 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2021.102854>.

- [26] M. Chen, O. Dongxu, S. Cao, J. Liu, Z. Wang, J. Wang, Effects of heat treatment and SOC on fire behaviors of lithium-ion batteries pack, *J Therm Anal Calorim* 136 (2019) 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/S10973-018-7864-9>.
- [27] M.N. Richard, J.R. Dahn, Accelerating Rate Calorimetry Study on the Thermal Stability of Lithium Intercalated Graphite in Electrolyte. I. Experimental, *J Electrochem Soc* 146 (1999) 2068–2077. <https://doi.org/10.1149/1.1391893>.
- [28] G. Venugopal, Characterization of thermal cut-off mechanisms in prismatic lithium-ion batteries, *J Power Sources* 101 (2001) 231–237. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00782-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00782-0).
- [29] X. Feng, M. Fang, X. He, M. Ouyang, L. Lu, H. Wang, M. Zhang, Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry, *J Power Sources* 255 (2014) 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.005>.
- [30] P. Ping, Q. Wang, P. Huang, J. Sun, C. Chen, Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method, *Appl Energy* 129 (2014) 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.092>.
- [31] B. Mao, H. Chen, Z. Cui, T. Wu, Q. Wang, Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration, *Int J Heat Mass Transf* 122 (2018) 1103–1115. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.036>.
- [32] 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 Li_{NixCoyMnzO2} large format lithium ion battery, *Appl Energy* 154 (2015) 74–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.118>.
- [33] H. Wang, A. Tang, K. Huang, Oxygen evolution in overcharged Li_xNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ electrode and its thermal analysis kinetics, *Chin J Chem* 29 (2011) 1583–1588. <https://doi.org/10.1002/CJOC.201180284>.
- [34] C. Essl, A.W. Golubkov, A. Fuchs, Comparing Different Thermal Runaway Triggers for Two Automotive Lithium-Ion Battery Cell Types, *J Electrochem Soc* 167 (2020) 130542. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ABBE5A>.
- [35] P. Röder, N. Baba, H.D. Wiemhöfer, A detailed thermal study of a Li[Ni_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}]O₂/LiMn₂O₄-based lithium ion cell by accelerating rate and differential scanning calorimetry, *J Power Sources* 248 (2014) 978–987. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.146>.
- [36] D.D. MacNeil, J.R. Dahn, The Reaction of Charged Cathodes with Nonaqueous Solvents and Electrolytes: I. Li_[sub 0.5]CoO_[sub 2], *J Electrochem Soc* 148 (2001) A1205. <https://doi.org/10.1149/1.1407245>.
- [37] C. Lin, H. Yan, C. Qi, J. Mao, L. Lao, Y. Sun, T. Ma, D. Liu, Research on thermal runaway and gas generation characteristics of NCM811 high energy density lithium-ion batteries under different triggering methods, *Case Studies in Thermal Engineering* 64 (2024) 105417. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.105417>.

- [38] M. Chen, D. Ouyang, J. Weng, J. Liu, J. Wang, Environmental pressure effects on thermal runaway and fire behaviors of lithium-ion battery with different cathodes and state of charge, *Process Safety and Environmental Protection* 130 (2019) 250–256. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2019.08.023>.
- [39] L. Yi, Y. Dong-xing, Z. Shao-yu, H. Qun-ming, L. Xin, W. Jian-qiang, T.F.R. Institute, On the fire extinguishing tests of typical Lithium-ion battery, *Journal of Safety and Environment* (2015) 120–125.
- [40] 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>.
- [41] 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). <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101801>.
- [42] 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>.
- [43] Edison C (2017) Considerations for ESS fire safety. DNV GL, Oslo, Norway - Google'da Ara, (n.d.). https://www.google.com/search?q=Edison+C+%282017%29+Considerations+for+ESS+fire+safety.+DNV+GL%2C+Oslo%2C+Norway&sca_esv=83dfe58a007e3a22&rlz=1C1FKPE_trTR978TR978&sxsrf=AHTn8zr_vtQlcYi-7oUB69zJqngOBLKbKA%3A1746279411832&ei=8xsWaKfMMoOVxc8Ps4e9kAY&ved=0ahUKEwjnkZXgtYeNAXWDSvEDHbNDD2IQ4dUDCBA&uact=5&oq=Edison+C+%282017%29+Considerations+for+ESS+fire+safety.+DNV+GL%2C+Oslo%2C+Norway&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcuAiSEVkaXNvbIBDICgyMDE3KSBDdb25zaWRlcmF0aW9ucyBmb3IgRVNTIGZpcmUgc2FmZXR5LiBETlYgR0wsIE9zbG8sIE5vcndheUjeCVAAWABwAHgAkAEAmAGMAaABjAGqAQMWLjG4AQPIAQD4AQL4AQGYAgCgAgCYAwCSBwCgB3yyBwC4BwA&sclient=gws-wiz-serp (accessed May 3, 2025).
- [44] 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). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115076>.
- [45] L. Zhang, F. Ye, Y. Li, M. Chen, X. Meng, J. Xu, J. Sun, Q. Wang, Experimental Study on the Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing Large-Scale Battery Module Fire, *Fire Technol* 59 (2023) 1247–1267. <https://doi.org/10.1007/S10694-022-01322-2>.
- [46] 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>.

- [47] Z. Huang, P. Liu, Q. Duan, C. Zhao, Q. Wang, Experimental investigation on the cooling and suppression effects of liquid nitrogen on the thermal runaway of lithium ion battery, *J Power Sources* 495 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229795>.
- [48] 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 May 3, 2025).
- [49] A. Väyrynen, J. Salminen, Lithium ion battery production, *Journal of Chemical Thermodynamics* 46 (2012) 80–85. <https://doi.org/10.1016/J.JCT.2011.09.005>.
- [50] Davide. Andrea, Battery management systems for large lithium-ion battery packs, (2010) 290. https://books.google.com/books/about/Battery_Management_Systems_for_Large_Lit.html?hl=tr&id=o-QpFOR0PTcC (accessed August 26, 2025).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Onur MAMMACIOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Ön lisans** : 2011, Hava Astsubay Meslek Yüksek Okulu, Yangın
- **Lisans** : 2013, Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme
- **Yükseklisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Güvenliği ABD
- **Uluslararası Sertifikasyon**: 2017, DOD Louis F.Garland Fire Academy, Yangın

MESLEKİ DENEYİM

- 2011-2024 yılları arasında Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı farklı ana jet üslerinde ve birliklerinde yangın astsubayı olarak görev yaptı.
- 2016 yılında Kabil Uluslararası Havalimanı'nda NATO adına yangın irtibat astsubayı olarak görev yaptı.
- 2020-2021 yıllarında Malatya Turgut Özal Üniversitesi'nde misafir öğretim görevlisi olarak görev yaptı.
- 2024 yılından bu yana Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı'nda yangın ders öğretmeni olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- 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 (2025) 106554. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106554>.

DİĞER ESERLER:

- Soyhan, H.S., Özkalay, C., Can, K., Mammacıoğlu, O. (2018). *Yangın ve Yaşam*. Cenevre Yayınevi.

- H.S. Soyhan, G. Coşkun, O. Mammacıoğlu, Su ile karışmayan yağ (b, f, k sınıfı) yangınlarda yangın söndürme cihazlarının doğru kullanımı, Piri Keşif Aracı 0 (2017) 0–0. <https://doi.org/0>.
- H.S. Soyhan, O. Mammacıoğlu, Duman dedektörlerinin çalışma prensipleri ve test işlemlerinin incelenmesi, Piri Keşif Aracı 0 (2019) 0–0. <https://doi.org/0>.
- 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.

