

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

**LİTYUM İON PİL YANGINLARINA MÜDAHALEDE
ENDOTERMİK SIVI KATKILI SU SİSİ KULLANILAN BİR
OTOMASYON SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fikret KIR

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

AĞUTOS 2025

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

**LİTYUM İON PİL YANGINLARINA MÜDAHALEDE ENDOTERMİK SIVI
KATKILI SU SİSİ KULLANILAN BİR OTOMASYON SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fikret KIR

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Hakan Serhad SOYHAN

Ortak Danışman: Dr. Zafer KAHRAMAN

AĞUSTOS 2025

Fikret Kır tarafından hazırlanan “Lityum ion pil yangınlarına müdahalede endotermik sıvı katkılı su sisi kullanılan bir otomasyon sistemi geliştirilmesi.” adlı tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hakan Serhan SOYHAN**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Mustafa Şahin DÜNDAR**
Sakarya Üniversitesi

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



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “LİTYUM İON PİL YANGINLARINA MÜDAHALEDE ENDOTERMİK SIVI KATKILI SU SİSİ KULLANILAN BİR OTOMASYON SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ” 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 alındığımı, etik kurul onay belgesi aldığımı, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20....)

Fikret KIR



Eşime, çocuklarıma ve yangın güvenlik sektörünün emekçilerine.



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN'a ve Dr. Zafer KAHRAMAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca bana akademik ve teknik anlamda katkı sağlayan saygıdeğer hocalarıma da değerli görüşleri ve destekleri için şükranlarımı sunarım.

Araştırmamın her aşamasında sabır ve anlayış gösteren, bana moral ve motivasyon veren aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim. Destekleri sayesinde bu süreci daha verimli ve anlamlı bir şekilde tamamladım.

Ayrıca, tez çalışmam sırasında bana verileriyle, bilgileriyle veya saha çalışmalarında destek olan Demofire Yangın Söndürme Sistemleri San ve Tic Ltd Şirketi'ne de teşekkür etmek isterim.

Son olarak, akademik yolculuğumda bana ilham veren, bilgi birikimimi geliştirmeme katkı sağlayan tüm akademisyenlere ve meslektaşlarıma teşekkür ediyorum.

Bu tez, katkılarıyla benim gelişimime yardımcı olan herkesin emeğini taşımaktadır. Hepsine minnettarım.

Fikret KIR



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	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Lityum İyon Piller: Tarihçesi	2
1.1.1. Lityum iyon piller: tipleri, yapıları, kullanıldıkları yerler ve karşılaştırmaları	4
1.1.1.1. Tipleri	4
1.1.1.2. Lityum iyon pil yapıları	5
1.1.1.3. Lityum iyon pil kullanıldıkları yerler	16
1.1.1.4. Lityum iyon pil pillerin karşılaştırılması	16
1.1.2. Lityum iyon pillerdeki yangın tehlikeleri: Neden yanar, neden arıza yapar, yangın davranışları ve ürettikleri gazlar	21
1.1.2.1. Lityum iyon piller neden arıza yapar?	21
1.1.2.2. Lityum iyon piller neden yanar?	22
1.1.3. Lityum iyon pillerin yangın davranışları	32
1.1.3.1. Lityum iyon piller yangın sırasında ne tür gazlar çıkarır?	36
1.1.3.2. Hangi pil ne kadar ısı enerjisi meydana çıkarır?	38
1.1.3.3. Güvenlik önlemleri	39
1.1.4. Lityum iyon pillerin yangınlarının algılanması ve söndürülmesi	40
1.1.4.1. Yangın algılama sistemleri	40
1.1.4.2. Yangın söndürme sistemleri ve maddeleri	41
1.1.4.3. Söndürme maddelerinin performans karşılaştırması	46
2. MATERYAL VE YÖNTEM	49
2.1. Materyal	49
2.2. Yöntem	49
2.2.1. Seçilen DOE yöntemi	51
2.2.2. Kullanılan araç gereçler	52
2.2.3. Kullanılan ıslak kimyasal katkı maddesi	52
2.2.4. Su sisi söndürme sistemi temel tasarım özellikleri	54
2.2.5. Su sisi yoğunluğu	55
2.2.5.1. Nozul özellikleri	55
2.2.5.2. Damlacık boyutu dağılımı	55
2.2.5.3. Nozul püskürtme koni açısı	56
2.2.5.4. Nozul püskürtme hızı	57

2.2.5.5. Nozul kütle akış hızı.....	58
2.2.5.6. Nozul püskürtme momentumu	58
2.2.6. Su sisi sisteminin söndürme mekanizmaları	59
2.2.6.1. Gaz fazında soğutma	59
2.2.6.2. Oksijenin tükenmesi ve yanıcı buharın seyrelmesi	60
2.2.6.3. Yakıt yüzeyinin soğutulması	60
2.2.6.4. Radyasyonun zayıflatılması	61
2.2.6.5. Kinetik etkiler, çevreleme etkileri, türbülanslı karıştırma.....	61
2.2.6.6. Su sisi yangın söndürme stratejisi	62
2.2.7. Taşınabilir YSC.....	63
2.2.8. Otomatik algılama söndürme sistemi	65
2.2.8.1. Yangını algılama	65
2.3. Deneyler	69
2.3.1. Taşınabilir YSC lityum pil söndürme deneyleri	69
2.3.1.1. Deney 1	69
2.3.1.2. Deney 2	70
2.3.1.3. Deney 3	70
2.3.2. Otomatik su sisi lityum pil söndürme deneyleri.....	71
3. SONUÇ	79
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

BMS	: Battery Management System / Batarya Yönetim Sistemi
BSS	: Battery Storage System / Batarya Depolama Sistemi
DSD	: Damlacık Boyutu Dağılımı
EV	: Elektrikli Araçlar
F-500	: Encapsulated Agent / Kapsülleyici Söndürme Ajanı
FM200	: Gaz söndürme maddesi HFC-227ea (Heptafloropropan)
HEV	: Hibrit Elektrikli Araçlar
LCO	: Lityum Kobalt Oksit (LiCoO_2)
LFP	: Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4)
LIB	: Lityum İyon Batarya
LMO	: Lityum Manganez Oksit (LiMn_2O_4)
LTO	: Lityum Titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, Li_2TiO_3)
MMD	: Kütle Ortalama Çapı
NCA	: Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (LiNiCoAlO_2)
NFPA	: The National Fire Protection Association
NMC	: Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (LiNiMnCoO_2)
NOVEC 1230	: Gaz Söndürme Maddesi FK-5-1-12
NTA	: Nederlandse Technische Afspraak
SEI	: Katı Elektrolit Ara Fazı Tabakası
SMD	: Sauter Ortalama Çapı
TR	: Termal Bozunum / Termal Kaçak
UL	: Underwriters Laboratories
VMD	: Hacimsel Ortalama Çap
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler
YSC	: Yangın Söndürme Cihazı



SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: Sıcaklık birimi (Celsius)
Cp	: Özgül ısı kapasitesi ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
E	: Enerji (Wh veya kWh)
h	: Isı transfer katsayısı / entalpi (bağlama göre)
I	: Akım (Current)
kWh	: Isı/Enerji miktarı
$\dot{m}$	: Kütle debisi (kg/s veya L/min)
m	: Kütle (g veya kg)
p	: Basınç (bar veya Pa)
P	: Güç (Watt)
$\dot{q}$	: Isı açığa çıkış hızı (kW veya MW)
Q	: Kapasite (Ah veya mAh)
R	: Direnç (Resistance)
t	: Zaman (s, dakika, saat)
v	: Hız / nozul çıkış hızı (m/s)
V	: Voltaj (Gerilim)
Wh/kg	: Enerji yoğunluğu
ΔE	: Enerji değişimi
ΔH	: Reaksiyon entalpisi
$\Delta T (\text{DT})$	: Sıcaklık farkı
θ	: Sprey açısı (nozul koni açısı)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Lityum ion pil tiplerine göre karşılaştırma.....	20
Tablo 1.2. Gaz türleri ve miktarları.	38
Tablo 1.3. Söndürme maddelerinin performans karşılaştırması.....	47
Tablo 2.1. F-500'ün lityum iyon pil yangınlarında diğer yaygın yangın söndürme maddelerine göre performansı.....	53
Tablo 2.2. Deney sonuçları özet tablosu.	77





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Lityum ion pillerin gelişimi.	4
Şekil 1.2. Lityum ion pillerin yapısı ve kullanılan malzemeler.	5
Şekil 1.3. Litum ion pilin çalışma prensibi.	6
Şekil 1.4. Lityum ion pil katot malzeme yoğunluğu.	7
Şekil 1.5. Lityum ion pil separatör durumu.	12
Şekil 1.6. Lityum ion pil tipleri.	16
Şekil 1.7. Lityum ion pil tiplerinin karşılaştırma grafikleri.	21
Şekil 1.8. Lityum ion pillerin temel arızalanma akış diyagramı.	22
Şekil 1.9. Lityum pillerin içinde ana egzotermik reaksiyonlar.	25
Şekil 1.10. Isı sonucunda pil yapısında meydana gelen değişimler.	26
Şekil 1.11. Birinci evre.	28
Şekil 1.12. İkinci evre.	29
Şekil 1.13. Lityum ion pil yanma üçgeni.	32
Şekil 1.14. Lityum ion pillerin oluşturduğu yangın tipleri.	33
Şekil 1.15. Zamana bağlı sıcaklıklar.	34
Şekil 1.16. Batarya paketi yanması ve jet alevi.	35
Şekil 1.17. Yangın başlaması ve yayılımı.	36
Şekil 1.18. Pil tiplerine göre gaz çıkışları.	38
Şekil 1.19. Su sisinin tipik söndürme mekanizması.	46
Şekil 2.1. Nozul tipleri.	55
Şekil 2.2. Damlacık boyutu.	56
Şekil 2.3. Nozul sprej açısı.	57
Şekil 2.4. Nozul kapsama alanı.	57
Şekil 2.5. Nozul kütle akış hızı.	58
Şekil 2.6. Su sisinin yanıcı buhar seyreltmesi.	60
Şekil 2.7. Su sisinin radyasyonu zayıflatması.	61
Şekil 2.8. Genişleyen su momentumu.	62
Şekil 2.9. Yangını söndürme stratejisi.	63
Şekil 2.10. Taşınabilir yangın söndürme cihaz.	65
Şekil 2.11. Söndürme sistemi deney seti görünüş 1.	68
Şekil 2.12. Söndürme sistemi deney seti görünüş 2.	68
Şekil 2.13. Söndürme deney seti elektriksel şema.	69
Şekil 2.14. Deney-1 resimler.	69
Şekil 2.15. Deney-2 resimler.	70
Şekil 2.16. Deney-3 resimler.	71
Şekil 2.17. Otom. Sönd. Deney-1 resimler.	71
Şekil 2.18. Otom. Sönd. Deney-2 resimler.	72
Şekil 2.19. Otom. Sönd. Deney-3 Resimler.	73
Şekil 2.20. Otom. Sönd. Deney-4 Resimler.	74
Şekil 2.21. Otom. Sönd. Deney-5 Resimler.	75
Şekil 2.22. Otom. Sönd. Deney-6 Resimler.	75

Şekil 2.23. Yanma oluşumu grafikleri	76
Şekil 2.24. Söndürme grafikleri.	76



LİTYUM İYON PİL YANGINLARINA MÜDAHALEDE ENDOTERMİK SIVI KATKILI SU SİSİ KULLANILAN BİR OTOMASYON SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışması, günümüzde yaygın olarak kullanılan lityum iyon pillerin yangın risklerini ve bu yangınlara karşı uygulanabilecek etkin söndürme stratejilerini incelemekte olup, özellikle endüstriyel tesisler, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde kritik önem arz eden pil yangınlarına müdahale yöntemlerini araştırmaktadır. Çalışmanın temel amacı, endotermik sıvı katkılı su sisi teknolojisini esas alan bir otomasyon sistemi tasarlamak ve bu sistemin lityum iyon pil yangınlarındaki performansını deneysel olarak ortaya koymaktır.

Lityum iyon pillerin kullanım alanlarının hızla artması, beraberinde ciddi yangın güvenliği problemlerini gündeme getirmiştir. Termal kaçak (thermal runaway) olarak bilinen zincirleme reaksiyon, hücrelerin iç sıcaklığının kontrolsüz artışıyla birlikte gerçekleşmekte; jet alevleri, patlama etkileri ve toksik gaz çıkışları ile sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle çalışmada öncelikle lityum iyon pillerin tarihçesi, farklı tipleri (LFP, NMC, NCA vb.), yapısal özellikleri ve arızalanma mekanizmaları ele alınmıştır. Ardından, pil yangınlarının evreleri, ürettikleri gazların miktar ve türleri, ısı açığa çıkış hızları ve güvenlik zafiyetleri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Araştırmanın ikinci bölümünde, yangın algılama ve söndürme sistemleri literatür bazında incelenmiş, su, köpük, kuru kimyasal, gazlı ve aerosol söndürme maddeleri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde, su sisi sistemlerinin yüksek soğutma kapasitesi, oksijen seyreltme etkisi, düşük su tüketimi ve elektronik donanımlara daha az zarar vermesi gibi avantajları öne çıkmıştır. Bununla birlikte, su sisi sistemlerinin performansını artırmak amacıyla F-500 EA (Encapsulating Agent) katkılı endotermik sıvı kullanımı, tez çalışmasının özgün katkısını oluşturmaktadır.

Tez kapsamında deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir:

Taşınabilir Yangın Söndürme Cihazı Deneyleri: Farklı pil tipleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, mekanik delme ve sıcaklık artışıyla tetiklenen termal runaway sonrası gelişen yangınlara, endotermik katkılı su sisi ile müdahale edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, katkılı su sisinin jet alevlerinde dahi hızlı soğutma sağladığını, yangını kontrol altına aldığını ancak gaz salınımını tamamen durduramadığını göstermiştir.

Otomatik Söndürme Sistemleri Deneyleri: Algılama ile entegre çalışan otomasyon tabanlı sistem tasarlanmış, nozul tipleri, damlacık boyut dağılımı, püskürtme açısı, debi ve yoğunluk parametreleri analiz edilmiştir. Sistem, termal kameralar ve sensörler aracılığıyla yangını algılamış ve otomatik tetikleme sonrasında yangını kısa sürede kontrol altına almıştır.

Deneysel bulgular, NMC pillerin diğer pillere kıyasla daha yüksek termal runaway şiddetine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca endotermik katkılı su sisi, klasik

su sisi sistemlerine göre daha yüksek soğutma kapasitesi ve daha düşük alev yayılımı sağlamıştır. Ancak gaz emisyonlarının tamamen engellenememesi, pil yangınlarında çoklu söndürme stratejilerinin önemini vurgulamaktadır.

Çalışmanın sonuçları, BESS (Battery Energy Storage Systems), elektrikli araç batarya paketleri ve endüstriyel uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Bu tez, literatürde mevcut söndürme maddeleri ve yöntemlerine katkı sağlamanın ötesinde, yeni nesil otomatik yangın söndürme sistemleri için uygulanabilir bir model önermektedir. Ayrıca, ulusal ve uluslararası standartların (NFPA 855, UL 9540/9540A, IEC 62933, TS EN 14972 vb.) gerekliliklerine uygun çözümler geliştirilmesine de bilimsel altyapı sunmaktadır.

Sonuç olarak, endotermik katkılı su sisi tabanlı otomasyon sistemi, lityum iyon pil yangınlarında etkin, hızlı ve güvenli bir müdahale yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, hem akademik hem de endüstriyel açıdan önemli bir boşluğu doldurmakta; gelecekte daha güvenli batarya depolama çözümlerinin geliştirilmesi için yol göstermektedir.



DEVELOPMENT OF AN AUTOMATION SYSTEM USING ENDOTHERMIC LIQUID ADDITIVE WATER MIST IN INTERVENTION OF LITHIUM-ION BATTERY FIRES

SUMMARY

This thesis investigates the fire safety challenges associated with lithium-ion batteries (LIBs) and evaluates suppression strategies, with a particular emphasis on the use of endothermic liquid additive water mist systems integrated into automated extinguishing frameworks. The research is motivated by the increasing reliance on LIBs in electric vehicles, stationary battery energy storage systems, portable electronics, aviation, and other critical infrastructures. While LIBs provide outstanding energy density, long cycle life, and operational efficiency, they also pose severe hazards under fault conditions. Among the most critical of these is thermal runaway, a self-propagating failure process characterized by uncontrollable heat generation, jet flames, explosions, and the release of toxic gases such as carbon monoxide, hydrogen, hydrogen fluoride, and volatile organic compounds. Documented incidents across different sectors highlight the urgent need for fire protection methods that specifically address the unique risks posed by LIBs.

Lithium-ion batteries are widely recognized for their high energy density, long cycle life, and relatively low maintenance requirements. However, their chemical and thermal instability under fault conditions presents severe safety hazards. Failures such as thermal runaway can result in self-accelerating exothermic reactions, jet flames, explosions, and the release of flammable and toxic gases (e.g., CO, H₂, HF, VOCs). Such incidents have been documented in electric vehicles, grid-scale battery energy storage systems (BESS), consumer electronics, and aviation applications.

Lithium-ion battery fires differ fundamentally from conventional hydrocarbon or solid-fuel fires. They are marked by rapid flame spread, high heat release rates often reaching several megawatts, violent gas venting, and the production of highly toxic emissions. The propagation of failure within modules or packs is strongly influenced by battery chemistry and design as well as the state of charge. Traditional suppression approaches, while effective in certain contexts, reveal critical shortcomings when applied to LIB hazards. Water can provide strong cooling but fails to eliminate gas emissions. Foams cover surface flames but lack deep cooling penetration. Dry chemical powders achieve rapid flame knockdown yet do not prevent re-ignition. Gaseous agents such as CO₂, FM-200, or Novec 1230 are useful in sealed enclosures but cannot counter thermal runaway jets. Aerosol systems, although compact, still lack extensive validation in large-scale LIB fire scenarios.

Given these risks, the research investigates the fundamental fire behavior of lithium-ion cells and evaluates alternative suppression methods. Existing suppression techniques—such as water, foam, dry chemicals, gaseous agents, and aerosols—are analyzed in terms of effectiveness, cooling capacity, re-ignition prevention, and compatibility with sensitive electronics. Among these, water mist emerges as a promising option due to its fine droplet distribution, high heat absorption, and minimal

collateral damage. To further improve suppression efficiency, the study introduces F-500 EA (Encapsulating Agent) as an endothermic liquid additive, aiming to enhance cooling, gas suppression, and flame knockdown.

The thesis sets out the following main objectives:

To systematically analyze the fire risks, failure mechanisms, and gas emissions of different lithium-ion battery types (LFP, NMC, NCA).

To experimentally investigate the performance of water mist suppression systems under both portable and automated configurations.

To evaluate the influence of endothermic liquid additives (F-500 EA) on suppression efficiency, cooling rate, and gas reduction.

To design and prototype an automation-based detection and suppression system that integrates sensors, nozzles, and real-time actuation.

To contribute to future fire protection standards and guidelines (e.g., NFPA 855, UL 9540A, IEC 62933, EN 14972) by providing empirical evidence.

The research adopts a combined literature review, theoretical modeling, and experimental testing approach. First, the study reviews lithium-ion battery structures (anode, cathode, separator, electrolyte) and identifies their thermal vulnerabilities. The concept of thermal runaway and its stages are explained, along with the quantitative estimation of heat release rates and gas generation volumes.

For the experimental part, two types of suppression systems were evaluated:

Portable Fire Extinguishing Experiments: Prismatic cells were triggered into thermal runaway using controlled heating and mechanical puncture. The extinguishing performance of plain water mist was compared against F-500 EA-enhanced mist. Parameters such as flame duration, peak temperature, and post-extinguishment gas emissions were recorded.

Automated Suppression System Experiments: A novel automation system was designed with integrated fire detection (multi-sensor including CO, H₂, smoke, heat, and infrared sensors) and suppression modules. Different nozzle types, droplet size distributions, spray cone angles, and mass flow rates were analyzed to optimize performance.

The DOE (Design of Experiments) methodology was applied to ensure statistical validity, and high-resolution thermal imaging and gas analyzers were used for data collection.

The experimental results provide several critical insights:

Battery Type Influence:

NMC cells exhibited the most violent thermal runaway, with rapid temperature escalation and intense jet flames.

LFP cells showed better thermal stability, while NCA cells demonstrated intermediate behavior.

Suppression Efficiency:

Water mist proved highly effective in cooling and suppressing visible flames, even in jet flame scenarios.

However, unmodified water mist could not fully eliminate post-fire gas emissions.

Role of Endothermic Additives (F-500 EA):

The additive significantly improved cooling efficiency, shortened suppression time, and reduced re-ignition risks.

It encapsulated volatile hydrocarbons and diluted combustible gases, though complete gas neutralization was not achieved.

Automated System Performance:

The prototype automation system detected fire events rapidly and discharged mist effectively, ensuring early-stage fire suppression.

The integration of real-time sensors and automatic actuation increased reliability compared to manually operated systems.

The thesis contributes to both academic knowledge and practical fire safety engineering. Key contributions include:

Providing one of the first experimental validations of endothermic additive water mist systems against lithium-ion battery fires.

Demonstrating the importance of battery chemistry-specific suppression strategies (e.g., NMC vs. LFP).

Proposing a scalable automation architecture for battery fire detection and suppression, which can be applied in electric vehicles, grid storage containers, and industrial applications.

Offering guidance for future revisions of international standards by providing performance data that supports the adoption of alternative extinguishing technologies.

The results indicate that while water mist with F-500 EA is highly promising, further research is needed on: (i) toxic gas capture, (ii) large-scale containerized BESS applications, and (iii) long-term material compatibility.

Although results are promising, further research is required in several areas. Post-fire toxic gas management, particularly the capture and neutralization of HF and VOCs, remains an open challenge. Large-scale tests in multi-module containerized BESS environments are needed to validate performance at realistic industrial scales. Material compatibility must be evaluated to ensure long-term stability of additives with metals, seals, and electronic components. Finally, cost-benefit analysis is essential to compare the economic feasibility of such systems against more conventional gaseous or foam suppression solutions.

In conclusion, this research demonstrates that endothermic additive water mist systems provide a highly effective, sustainable, and technically feasible strategy for mitigating lithium-ion battery fires. Their combined effects of rapid cooling, localized oxygen displacement, and hydrocarbon encapsulation present a clear improvement over traditional suppression methods. Integration into automated fire safety frameworks ensures rapid and reliable response, significantly enhancing resilience of critical infrastructures. The findings contribute not only to the academic literature but also to industrial fire safety practices and international standards development, paving the way toward safer, more sustainable energy storage technologies.

This research confirms that endothermic additive water mist systems represent an effective, sustainable, and technically feasible solution for mitigating lithium-ion

battery fires. The combination of rapid cooling, oxygen displacement, and hydrocarbon encapsulation provides a significant improvement over conventional suppression method. The integration of such systems into automated architectures enhances fire resilience in critical infrastructures, contributing to safer, more reliable, and more sustainable energy storage technologies.



1. GİRİŞ

Günümüzde enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, elektrikli araçların yaygınlaşması ve taşınabilir elektronik cihazların artan kullanımı ile birlikte stratejik bir öneme kavuşmuştur. Bu gelişmelerin merkezinde yer alan lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve düşük bakım maliyetleri sayesinde modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Ancak bu pillerin kimyasal ve termal yapısı, güvenlik açısından önemli riskler barındırmaktadır. Özellikle termal kaçak (thermal runaway) süreci sonucunda ortaya çıkan yangınlar ve patlamalar, yalnızca maddi kayıplara değil aynı zamanda insan sağlığı ve çevre açısından ciddi tehditlere neden olmaktadır.

Lityum iyon pil yangınlarının geleneksel yangın türlerinden farklı özellikler göstermesi, mevcut söndürme yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu tür yangınlarda jet alevleri, ani ısı açığa çıkışları ve toksik gaz salınımları meydana gelmekte, klasik söndürme ajanları (su, köpük, kuru kimyasal toz, gazlı sistemler) çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Özellikle elektrikli araçlarda, enerji depolama sistemlerinde (BESS) ve kritik tesislerde yaşanan yangın olayları, yeni nesil söndürme teknolojilerine duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymuştur.

Bu bağlamda, su sisi teknolojisi, düşük su tüketimi, yüksek soğutma kapasitesi, oksijen seyreltme etkisi ve elektronik donanımlara zarar vermeden kullanılabilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Su sisi sistemlerinin endotermik katkılarla desteklenmesi ise, bu teknolojinin etkinliğini daha da artırabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle F-500 EA gibi encapsulating agent katkıları, hem soğutma kapasitesini yükseltmekte hem de açığa çıkan yanıcı gazların kapsüllenerek seyreltmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, lityum iyon pil yangınlarına müdahalede endotermik sıvı katkılı su sisi kullanılan bir otomasyon sistemi geliştirmek ve bu sistemin etkinliğini deneysel veriler ışığında ortaya koymaktır. Çalışmada farklı pil kimyalarının yangın davranışları incelenmiş, su sisi ve katkılı su sisi söndürme

performansları değerlendirilmiş, ayrıca algılama-söndürme entegrasyonu içeren otomatik bir sistem tasarlanarak uygulanabilirliği test edilmiştir.

Elde edilen bulgular, lityum iyon pil yangınlarına karşı daha güvenli, etkin ve sürdürülebilir söndürme çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışma, ulusal ve uluslararası standartların (NFPA 855, UL 9540A, IEC 62933, EN 14972 vb.) gereksinimlerini destekleyen bilimsel altyapı sunmakta ve gelecekte uygulanacak yangın güvenliği stratejilerine yol göstermektedir.

1.1. Lityum İyon Piller: Tarihçesi

Lityum iyon piller, modern taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar dahil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesi çerçevesinde enerji depolama çözümleri sunar. Bu pillerin gelişimi, bilimsel araştırmaların ve teknolojik ilerlemelerin birleşiminden doğmuştur. Lityum iyon pillerin tarihçesi, 20. yüzyılın ortalarına kadar uzanır ve bu süreçte bir dizi önemli buluş ve gelişme yaşanmıştır. Lityum-iyon piller, modern yaşamda çok geniş bir yelpazede enerji depolama çözümleri sunan önemli bir teknolojidir. Lityum-iyon pillerin tarihçesi, bilimsel keşifler, gelişmeler ve ticari başarılarla dolu uzun bir geçmişe dayanır. İşte bu pillerin tarihçesinin önemli kilometre taşları:

1950'ler ve 1960'lar, lityumun potansiyel bir pil malzemesi olarak incelendiği dönemlerdir. Bu yıllarda, lityumun yüksek enerji yoğunluğu ve hafifliği, bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Ancak, lityumun reaktif doğası ve güvenlik sorunları, bu dönemde pratik kullanımı engellemiştir. Lityum, çok hafif ve yüksek enerji yoğunluğu sağlayan bir metal olarak dikkat çekmiştir. İlk başlarda, lityum metalini doğrudan kullanan piller geliştirilmiştir, ancak bu piller güvenlik sorunları nedeniyle yaygınlaşmamıştır. 1970'lerde, lityum metal pillerin ilk prototipleri geliştirilmiş, fakat bu pillerin kararsızlığı ve patlama riskleri nedeniyle ticari olarak başarılı olamamıştır. Exxon'dan Stanley Whittingham, katot olarak titanyum disülfid (TiS_2) ve anot olarak lityum metal kullanılan ilk lityum şarj edilebilir pili geliştirdi. Ancak, lityum metalin yüksek reaktivitesi nedeniyle bu tasarım da ticari başarıya ulaşmadı.

1980'ler, lityum iyon pillerin gelişiminde kritik bir dönem olmuştur. Bu yıllarda, John B. Goodenough ve ekibi, lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$) katot malzemesini geliştirmiştir. Bu malzeme, lityum iyon pillerin daha güvenli ve verimli olmasını sağlamıştır. Anot olarak kullanılan grafit ile birleştğinde, lityum iyonların elektrotlar

arasında güvenli bir şekilde hareket etmesi sağlanmış ve böylece daha güvenli bir pil teknolojisi ortaya çıkmıştır.

1983: Michael Stanley Whittingham'ın çalışmalarına dayanan araştırmalar sonucunda, lityum-iyon teknolojisi üzerine daha fazla odaklandı. Lityum metal yerine, karbon (grafit) anot olarak kullanılmaya başlandı, bu da güvenliği artırdı ve daha fazla şarj-deşarj dngüsü sağladı.

1985: Akira Yoshino, lityum-iyon piller için grafit anotunu kullanan bir tasarım geliştirdi. Bu tasarım, bugünkü lityum-iyon pillerin temel yapısını oluşturdu. Yoshino'nun geliştirdiği bu teknoloji, lityum-iyon pillerin güvenli ve ticari olarak uygun hale gelmesini sağladı.

1990'lar: Lityum-iyon piller bu yıllarda her türlü taşınabilir küçük elektronik cihazlarda (telefonlar, laptop bilgisayarlar, kameralar) ncelikli tercih edilen temel enerji kaynağı haline geldi. Lityum ion pillerin popülerliği; daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hafif yapı ve uzun süreli kullanım ömürleri sebebi ile gittikçe arttı.

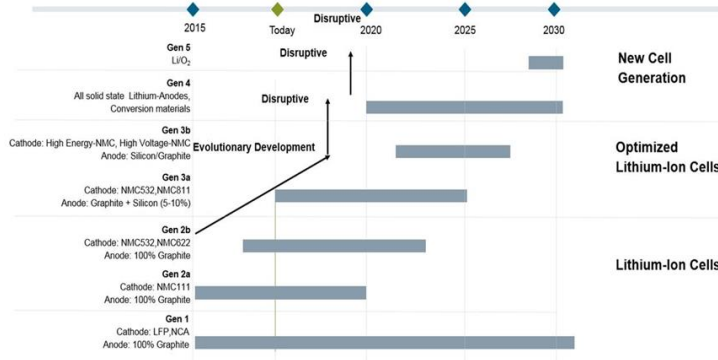
1991 yılında, Sony ve Asahi Kasei'nin lityum iyon pili ticari olarak piyasaya sürmesi, bu pillerin yaygın kullanımının başlangıcını işaret eder. Ticari alanda kullanılan lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunlukları, verimlilikleri ve uzun ömür gibi avantajlarına binaen taşınabilir elektronik cihazlarda ciddi bir devrim meydana getirmiştir. Bu piller, taşınabilir bilgisayarlar, cep telefonları, dijital kameralar ve ölçüm cihazları gibi birçok cihazlarda hızla standart hale gelmiştir.

2000'ler ve sonrası, lityum iyon pillerin enerji depolama mlerindeki rolünün genişlemesiyle karakterize edilir. Lityum iyon pil teknolojisi, gelişen elektrikli araç pazarında kritik bir bileşen haline gelmiştir. Tesla gibi şirketler, lityum iyon pillerin kapasitesini ve güvenliğini artırarak elektrikli araçların kullanım menzilini ve performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda da lityum iyon piller önemli bir rol oynamaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin depolanması için kullanılan büyük lekli enerji depolama sistemleri, bu pillerin verimliliği ve güvenilirliği sayesinde mümkün hale gelmiştir.

2020: John Goodenough, Akira Yoshino ve Stanley Whittingham, lityum-iyon pillerin geliştirilmesine olan katkılarından dolayı Nobel Kimya dl'ne layık görüldü.

Aşağıdaki şekilde (Kaynak: German Academy of Science and Engineering, Christopher Betzin Siemens EM TI, modified), beklenen batarya kimyası gelişimi

gösterilmiştir. Günümüzde kullanılan ve burada ele alınan 3.nesil bataryaların (lityum-nikel-mangan-kobalt-oksit) önümüzdeki on yılın ortalarına kadar geniş kullanım alanı bulmaya devam etmesi beklenmektedir.



Şekil 1.1. Lityum ion pillerin gelişimi.

Sonuç olarak, lityum iyon pillerin tarihçesi, bilimsel yenilikler ve teknolojik ilerlemelerle şekillenen dinamik bir süreçtir. Bu piller, enerji depolama çözümlerinde devrim yaratarak yirminci yüzyılın teknolojilerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Gittikçe ilerleyen ve daha da gelişen günümüz teknolojisi ile birlikte, lityum iyon pillerin de enerji depolama kapasitesi ve güvenilirliği daha da artmakta, bu da gelecekte daha sürdürülebilir ve verimli enerji çözümlerine kapı aralamaktadır.

1.1.1. Lityum iyon piller: tipleri, yapıları, kullanıldıkları yerler ve karşılaştırmaları

1.1.1.1. Tipleri

Lityum iyon piller, farklı kimyasal bileşimlere ve yapılandırmalara sahiptir. Lityum iyon piller yapılarında kullanılan minerallere göre birçok tipte ve isimde üretilirler. Aşağıda bazı temel yaygın pil tipleri vardır:

LCO-Lityum Kobalt Oksit (LiCoO2): Yüksek enerji yoğunluğu sunar ve genellikle akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve dijital kameralar gibi cihazlarda kullanılır. Ancak, yüksek maliyeti ve termal kararsızlığı nedeniyle dikkatli kullanılmalıdır.

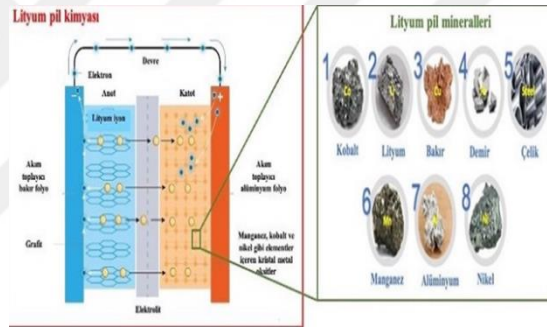
LMO- Lithium Mangan Oksit (LMO, LiMn2O4): Güvenliği ve termal kararlılığı yüksek bir malzemedir. Orta düzeyde enerji yoğunluğuna sahiptir ve genellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama uygulamalarında kullanılır.

LFP- Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4): Daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir, ancak uzun döngü ömrü ve termal kararlılığı ile bilinir. Elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.

NMC- Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (LiNiMnCoO_2 veya NMC): İyi bir enerji ve güç yoğunluğu dengesine sahiptir. Elektrikli araçlar, bisikletler ve elektrikli aletler için uygundur.

NCA-Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (LiNiCoAlO_2 veya NCA): Yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür sunar. Tesla gibi elektrikli araç üreticileri tarafından tercih edilir.

LTO-Lityum Titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, Li_2TiO_3): Düşük bir enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, hızlı şarj ve uzun döngü ömrü sağlar. Özellikle enerji depolama sistemleri ve bazı elektrikli araç uygulamalarında kullanılır.



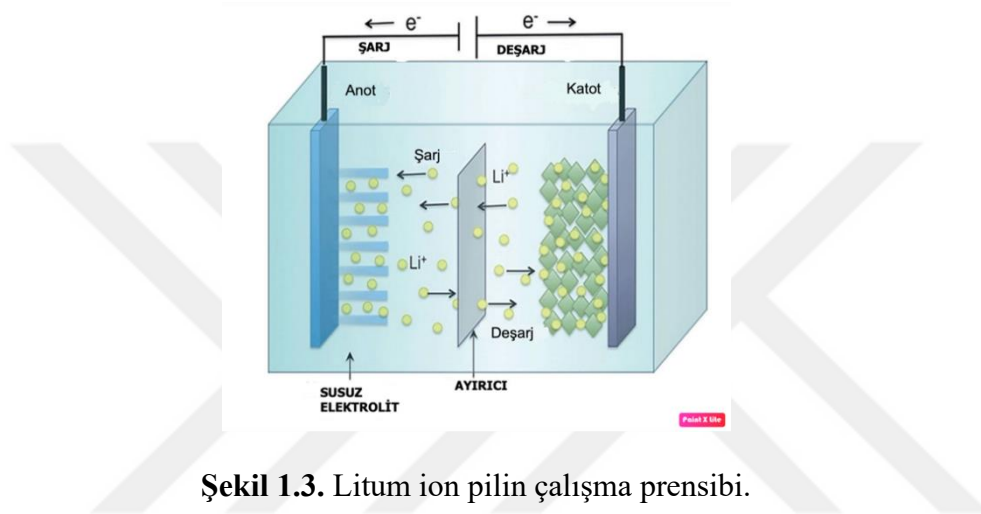
Şekil 1.2. Lityum ion pillerin yapısı ve kullanılan malzemeler.

1.1.1.2. Lityum iyon pil yapıları

Lityum iyon pillerin temel yapısı anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Anot genellikle grafit gibi karbon bazlı malzemelerden yapılır. Katot, lityum metal oksitlerden (örneğin LiCoO_2) oluşur. Elektrolit, lityum iyonlarının anot ve katot arasında geçişine yani hareket etmesine izin veren sıvı veya jel iletken bir yapıdır. Bu bileşenler, bir separatör tarafından ayrılır, bu da kısa devreyi önler ve iyonların sadece elektrolit aracılığıyla hareket etmesini sağlar.

Lityum İyon Pil Temel Yapıları: Bir lityum iyon pil hücresi temel olarak katot, anot, ayırıcı ve elektrolitten oluşur. Anot ve katot yapısındaki malzemeler sırasıyla bakır ve alüminyum folyo akım toplayıcıları üzerine biriktirilir. Elektrolit, lityum iyonlarının elektrotlar arasında hareketini sağlar, ayırıcı ise anot ve katot arasına bulunur iki elektrot arasındaki kısa devreyi önler ama bunu yaparken de iyon transferine izin verir.

Deşarj (Akü kullanımı) reaksiyonu esnasında, lityum iyonları anottan (-) hareket ederek , katot (+) kristallerinin katmanları arasındaki boşluklara girer (interkalasyon olarak da adlandırılır). Şarj sırasında ise lityum iyonları pilin pozitif tarafındaki katottan hareket ederek negatif taraftaki anotun içine gider. İmalat sonrasındaki ilk şarj sırasında, ara katkılı lityum iyonları elektrolitin çözücüsüyle hemen reaksiyona girer ve anot üzerinde lityum geçirgen olan Katı-Elektrolit Arafazı (SEI) üzerinde bir pasifleştirme katmanı oluşturur. SEI'nin oluşumu , istikrarı , LiB'lerin güvenliğinin ve ömürlerinin belirleyici önemli bir faktördür.



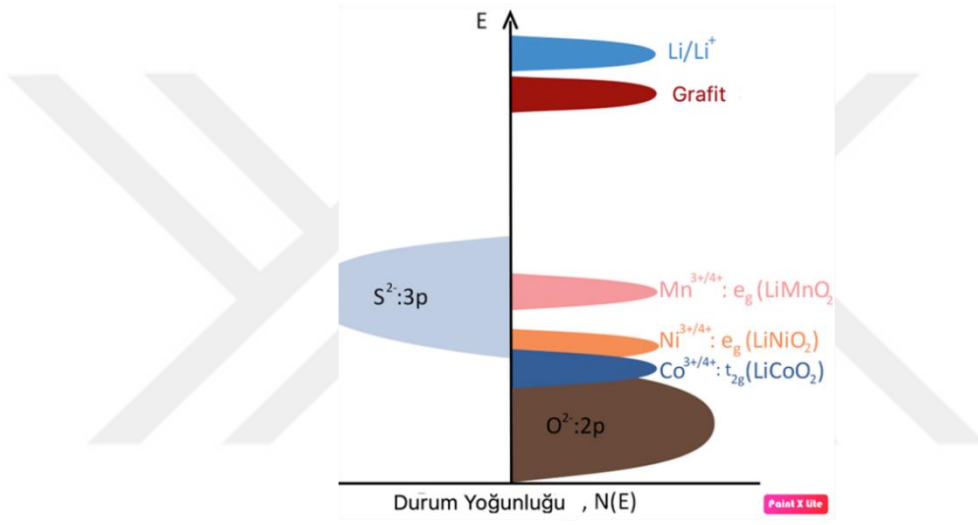
Şekil 1.3. Lityum ion pilin çalışma prensibi.

Lityum iyon pil katot yapısı: LiB tipine adını veren Katot bileşimleridir. LiB katot yapısını oluşturmak için, Lityum Kobalt Oksit (LCO), Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA), Lityum Kobalt Fosfat (LCP), Nikel Kobalt Manganez Oksit (NCM), Lityum Manganez Oksit (LMO), Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum gibi lityum metal oksitler, Demir Florosülfat (LFSF) ve Lityum Titanyum Sülfür (LTS) gibi malzemeler kullanılır. Yine bu malzemeler- bileşenler lityum interkalasyonu (İki molekül arasında, molekülün tersine çevrilebilir olablirliği) için yüksek kapasiteleri olmaları, ayrıca lityum iyon taşınması için gerekli olan uyumlu kimyasal ve fiziksel özellikleri (örneğin, interkalasyon reaksiyonlarını tersine çevrilebilirliği için) nedeniyle katot malzemeleri olarak tercih edilmektedir.

LCO, NCA ve NCM malzemeler daha düşük termal stabiliteye sahip olmakla beraber yüksek enerji yoğunluğu sağlarlar. LMO spinel benzeri bir yapıya sahiptir, termal stabilitesi oldukça iyidir ve voltaj değerleri de yüksektir, ancak diğerlerine kıyasla daha düşük kapasiteye sahiptir.

LFP stabil bir yapıya sahiptir, kobalt içermez, ortalama bir gerilime sahiptir. NCM ve LCO ile karşılaştırıldığında termal kaçaklara karşı daha güvenlidir. Maliyeti de nispeten daha düşüktür.

Çoğunlukla katot malzemesi olarak yüksek kapasiteli olması sebebi ile nikel-manganez-lityum açısından zengin malzemeler kullanıldı. Karbon kaplı LFP nanosferleri ve vanadyum pentoksit gibi yüksek kapasiteli ve voltajlı olmalarından dolayı katot malzemeleri olarak tercih edilmiştir. Yüksek nikel ve lityum içeren katot malzemeleri spesifik kapasiteyi arttırmakla beraber termal stabiliteyi de azalttığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.4. Lityum ion pil katot malzeme yoğunluğu.

Lityum iyon pil anot yapısı: LiB anotları için genellikle kullanılan en yaygın element grafitir, yüksek negatif potansiyeli nedeniyle tercih edilir. Alternatif olarak kullanılabilen Lityum titanat ve silikon gibi diğer malzemeler daha düşük negatif voltajlarda çalışmaktadır bu durum enerji ve güç yoğunluğunu azaltır. Ancak diğer yandan Lityum titanat ve silikon, lityum iyonlarının daha kolay hareket etmesini sağlamaktadır, bu durumda pilin iç direnci azaltır ve grafit anotla karşılaştırıldığında pilin ısınmasını azalır. Daha yüksek kapasite ve gerilime sahip anotlar için yeni malzemeler üzerine araştırmalar devam etmektedir. Silikon, kalay, antimon, germanyum, silikon oksit, ultra ince grafen nano tabakaları ve bor-nitrojen-karbon-oksijen gibi çeşitli malzemeler üzerinde testler yapılmıştır. Lityum-iyon pillerde anot, lityum iyonlarını depolayan ve şarj-deşarj süreçlerinde lityum iyonlarının hareketini sağlayan kritik bir bileşendir. Anot yapısı, pilin enerji yoğunluğunu, döngü ömrünü,

şarj hızını ve güvenliğini doğrudan etkiler bu sebeple Anot malzemesinin seçimi ciddi önem taşır.

Grafit (Karbon) Anot: Grafit, lityum-iyon pillerde genellikle en yaygın olarak kullanılan anot malzemesidir. Bunun nedeni, grafitin lityum iyonlarını elektrostatik olarak iyi bir şekilde depolayabilmesi ve lityum iyonlarının grafit yapısı içinde nispeten kolay hareket edebilmesidir. Şarj esnasında, lityum iyonları katottan ayrılır ve elektrolit aracılığıyla anota (grafit yapısına) doğru hareket eder. Bu iyonlar grafit tabakaları arasında depolanır. Deşarj sırasında ise lityum iyonları grafitten ayrılarak katoda geri döner. Grafit anot, iyi bir enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve kabul edilebilir bir maliyeti olduğundan dolayı en çok tercih edilen malzemedir. Ancak, grafitin teorik kapasitesi sınırlıdır (yaklaşık 372 mAh/g) ve bu nedenle yüksek enerji yoğunluğu gerektiren durumlarda ve uygulamalarda birtakım sınırlamalar yaratabilmektedir.

Lityum Titanat (LTO) Anot: Yüksek Güvenlik ve Döngü Ömrüne sahip olan Lityum titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) anotlar, özellikle yüksek güvenlik ve uzun döngü ömrü gerektiren uygulamalarda tercih edilir. LTO anotlar, grafitte kıyasla daha düşük bir enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen çok hızlı şarj ve deşarj yeteneği sunar. Lityum titanat anotlar, lityum iyonlarını depolarken çok az yapısal değişikliğe uğrar, bu da uzun döngü ömrü sağlar. Ayrıca, LTO anotlar, lityum metalin dendrit oluşumu gibi sorunlara karşı daha çok dayanıklıdır, bu pil güvenliği daha da artırır.

Silikon Bazlı Anotlar: Silikon, grafit ile kıyaslandığında çok daha yüksek bir teorik kapasiteye sahiptir (yaklaşık 4200 mAh/g). Bu nedenle, silikon bazlı anotlar, lityum iyon pillerde enerji yoğunluğunu artırmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, silikon anotlar şarj sırasında önemli ölçüde genleşir (yaklaşık %300), bu da anotun yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir ve pilin döngü ömrünü kısaltabilir. Döngü ömrü sorunun üstesinden gelmek için silikon grafit kompozitleri ve nano yapılandırılmış silikon anotlar gibi çözümler geliştirilmektedir.

Diğer Anot Malzemeleri: Karbon Nanotüpler (CNTs) ve Grafen: Bu malzemeler, yüksek elektrik iletkenliği ve esnek yapıları nedeniyle umut vadeden anot malzemeleri olarak incelenmektedir. Ancak, ticari kullanımları henüz yaygınlaşmamıştır.

Metal Oksitler: Bazı metal oksitler de yüksek kapasite sunmaları nedeniyle anot malzemesi olarak araştırılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin ticari uygulanabilirliği henüz sınırlıdır.

Anot yapısı, lityum-iyon pillerin aşağıdaki özelliklerini etkiler:

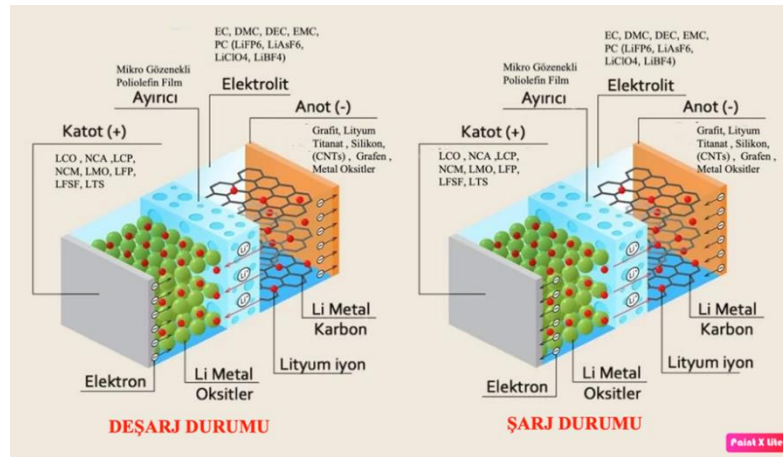
Enerji Yoğunluğu: Anot malzemesinin lityum iyonlarını ne kadar yoğun bir şekilde depolayabildiği, pilin enerji yoğunluğunu belirler.

Döngü Ömrü: Anot malzemesinin şarj döngüleri ve deşarj döngüleri sırasında yapısal bütünlüğünü ne kadar koruyabildiği, pilin döngü ömrünü etkiler.

Şarj Hızı: Lityum iyonlarının anoda ne kadar hızlı girip çıkabileceği, pilin şarj hızını belirler.

Güvenlik: Anot malzemesi, pildeki olası güvenlik sorunlarını (örneğin, dendrit oluşumu veya termal kaçak) etkileyebilir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, anot malzemeleri üzerindeki yeni araştırmalar yapılmaktadır, araştırmalara bağlı olarak sürekli yenilikler ve iyileştirmeler de yapılmaktadır. Bu gelişmeler lityum iyon pillerin performansını, güvenliğini ve kullanım ömrünü artırma potansiyelini taşır.



Şekil 2.5. Lityum iyon pil deşarj ve şarj durumu.

Lityum iyon pil seperatör /ayırıcı yapısı: LIB'lerde katot ve anot, ayırıcı (Seperatör) adı verilen gözenekli bir katmanla ayrılır. Ayırıcı bir lityum iyon hücresinde çok önemli bir bileşendir; iki elektrot arasındaki elektriksel kısa devreleri önlemekle beraber lityum iyonlarının elektrotlar arasında kolayca taşınmasına izin verir. Organik elektrolitli LIB'ler için en çok tercih edilen ayırıcı malzemeler, mikro gözenekli

poliolefin filmlerden yapılmıştır. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polietilen ve polipropilen laminantlar hem kararlılıkları, mekanik özellikleri ve maliyetleri sebebiyle tercih edilirler. Separatörlerin erime noktaları da önemlidir , çünkü termal bozunumun yayılması ve oluşumunu direkt olarak etkiler. Polietilen (PE) 135 °C de ve polipropilen (PP) ise 165 °C gibi sıcaklıklarda erirler.

Separatörün Temel Görevleri: Elektriksel İzolasyonu sağlamak separatörün önemli işlevlerinden biridir. Separatör, anot ve katot arasındaki doğrudan elektriksel teması engeller. Bu ise kısa devreleri önlemek için çok önemlidir. Kısa devre, pilin aşırı ısınmasına veya patlamasına neden olabilir.

Separatör, elektrolit içerisinde lityum iyonlarının anot ve katot arasında serbestçe hareket edebilmesine olanak tanır. İyonların serbest hareketi pilin şarj ve deşarj işlemleri sırasında enerji depolama ve enerji boşaltma süreçleri için gereklidir.

Ayrıca separatör önemli bir güvenlik işlevini sağlar. Separatör, pilin güvenliğini artıran bir bariyer görevi görür. Örneğin, bazı separatörler belirli bir sıcaklık seviyesine ulaşıldığında kapanarak (Thermal Shutdown) pilin daha fazla ısınmasını engeller.

Separatörler genellikle polimer malzemelerden yapılır ve mikro gözenekli bir yapıları vardır. Pil üretimlerinde yaygın olarak kullanılan separatör malzemeleri şunlardır:

Poliolefinler (Polietilen, Polipropilen): Poliolefinler, polietilen ve polipropilen gibi malzemeleri içeren bir termoplastik polimer sınıfıdır. Bu polimerler solventlere karşı mükemmel dirençleri, düşük yüzey enerjileri ve genel dayanıklılıklara sahiptir

Polietilen (PE): Polietilen, düşük erime noktasına sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda eriyerek kapanabilir. Bu özellik, pildeki termal kaçak durumlarını önlemeye yardımcı olur.

Polipropilen (PP): Polipropilen, polietilene göre daha yüksek bir erime noktasına sahiptir ve bu durum PP'nin termal dayanıklılığı artırır.

Kompozit separatörler: PE ve PP malzemelerinden oluşan çok katmanlı kompozit separatörler, yüksek güvenlik ve termal kararlılık sunar.

Seramik Kaplamalı separatörler: Bu separatörler, genellikle PE veya PP tabanlı olup, yüzeylerine seramik bir kaplama uygulanır. Seramik kaplama, separatörün termal

dayanıklılığını artırır ve mekanik stabilitesini iyileştirir. Ayrıca, seramik kaplama, pilin daha yüksek sıcaklıklarda güvenli bir şekilde çalışmasına olanak tanır.

Nonwoven separatörler : Polyester, aramid veya naylon gibi elyafların rastgele serilmiş liflerinden yapılan bu separatörler, yüksek gözenek oranına ve iyi mekanik dayanıklılığa sahiptir. Nonwoven separatörler, özellikle yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda kullanılır.

Separatörün yapısal özellikleri, lityum-iyon pil performansını doğrudan etkiler:

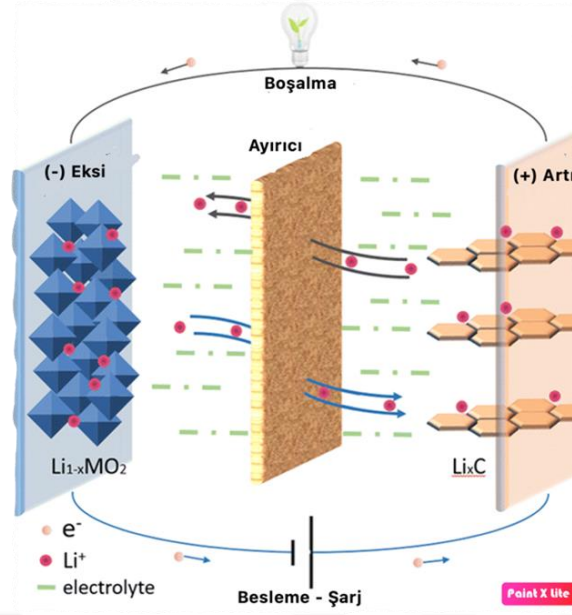
Separatörün gözenekleri, lityum iyonlarının geçişine izin verecek kadar büyük, ancak anot ve katot malzemelerinin temasını önleyecek kadar küçük olmalıdır. Homojen gözenek dağılımı, pilin performansını ve güvenliğini artırır.

Separatörün kalınlığı, iyonik iletkenlik ve elektriksel direnç açısından dengelenmelidir. Daha ince separatörler, daha düşük iç direnç sunarak pilin performansını artırabilir, ancak güvenlik risklerini artırabilir.

Separatör, pilin üretimi ve çalışması sırasında maruz kalacağı mekanik zorlanmalara dayanıklı olmalıdır. Zayıf mekanik dayanıklılık, separatörün yırtılmasına ve kısa devrelere yol açabilir.

Separatör, lityum iyon pilin güvenli ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için çok kritik bir öneme sahiptir. Separatörün doğru malzeme ve yapısal özelliklere sahip olması, pilin genel performansını, ömrünü ve güvenliğini doğrudan etkiler. Separatör teknolojisi, lityum-iyon pillerin geliştirilmesi ve yeni nesil enerji depolama çözümleri için aktif bir araştırma alanıdır.

Separatörlerin üretimi, büyük ölçüde yüksek hassasiyet gerektiren bir süreçtir ve pilin başarısında kilit bir rol oynar. Yüksek kaliteli separatörler, yüksek enerji yoğunluklu ve uzun ömürlü piller üretmek için vazgeçilmezdir.



Şekil 1.5. Lityum iyon pil separatör durumu.

Lityum İyon PİL Elektrolit Yapısı: PİL yapısında elektrolit pİL bileşeni ayırıcı ile elektrotlar arasındaki boşluğu doldurur. LIB'lerdeki elektrolit formülasyonu elektrot malzemelerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişkenlik arz edebilir. LIB'ler için tipik elektrolit yapısı, etilen karbonat (EC), dimetil karbonat (DMC), dietil karbonat (DEC) ve etil metil karbonat (EMC) ve/veya propilen karbonat (PC) gibi yanıcı karbonat bazlı bir organik solventten oluşur. Bu karışıma döngüyü iyileştirmek için lityum hekzaflorofosfat (LiPF₆), lityum hekzafloroarsenat monohidrat (LiAsF₆), lityum perklorat (LiClO₄) ve lityum tetrafloroborat (LiBF₄) içeren katkı maddeleri de eklenebilir.

Geleneksel elektrolit yapılarına nispeten yeni kullanılan elektrolitler, daha stabil olan lityum tuzları, iyonik sıvılar, yanıcı olmayan / az yanıcı solventler kullanarak geleneksel elektrolitlerle ilişkili yangın riskini azaltmayı amaçlamaktadır.

Lityum iyon pillerin çalışmasında elektrolitin birçok görevi vardır, elektrolitin temel görevleri şu şekilde sıralanabilir.

İyon İletkenliği: Elektrolit, lityum iyonlarının anot ile katot arasında serbestçe hareket etmesini sağlar. Bu iyonik iletkenlik, pilin şarj işlemleri ve deşarj işlemleri sırasında enerji depolama ve serbest bırakma süreçleri için gereklidir.

Elektriksel Yalıtım: Elektrolit, aynı zamanda elektriksel yalıtım sağlayarak anot ve katot arasında doğrudan elektriksel teması önler. Bu, kısa devreleri önlemeye yardımcı olur.

Stabilite: Elektrolit, çalıştığı voltaj aralığında kararlı olmalı ve elektrotlarla reaksiyona girmemelidir. Elektrokimyasal stabilite, pilin ömrünü ve ayrıca güvenliğini de etkileyen önemli bir faktördür.

Elektrolit Yapısı ve Bileşenleri şu şunları içerir ve Lityum-iyon pillerde kullanılan elektrolitler genellikle bir lityum tuzu ile çözücülerin karışımından oluşur. Elektrolitin bileşimi ve yapısı, pilin özelliklerine göre optimize edilir.

Lityum Hekzaflorofosfat (LiPF₆): En yaygın kullanılan lityum tuzudur. LiPF₆, iyi bir iyonik iletkenlik sağlar ve birçok organik çözücünde çözünür. Ancak, LiPF₆ neme karşı hassastır ve yüksek sıcaklıklarda stabilite sorunları olabilir.

Diğer Tuzlar: LiBF₄ (Lityum Tetrafloroborat), LiClO₄ (Lityum Perklorat), ve LiTFSI (Lityum Bis(triflorometansulfonil)imid) gibi tuzlar da kullanılır, ancak bu tuzların kullanımın avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır.

Karbondanlar (Karbonatlar): En yaygın kullanılan çözücü sınıfıdır. Bu çözücüler, yüksek polariteye sahip olup lityum tuzlarını çözerek iyonik iletkenliği artırır.

Etilen Karbonat (EC): Yüksek dielektrik sabiti ve düşük buhar basıncı nedeniyle sıklıkla kullanılır. Etilen Karbonat (EC), anot yüzeyinde (SEI – Solid electrolyte interphase) katı bir elektrolit ara fazı oluşturur.

Diyetil Karbonat (DEC), Dimetil Karbonat (DMC), Propilen Karbonat (PC): EC ile karıştırılarak daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilen elektrolit çözümleri elde edilir.

Eterler ve Esters: Karbonat çözücülerine alternatif olarak kullanılırlar, ancak genellikle daha düşük dielektrik sabitlerine sahiptirler. Lityum metal pillerde daha yaygın olarak kullanılır.

Katı Elektrolit Ara Fazı (SEI - Solid electrolyte interphase) Tabakası: Elektrolit, anot yüzeyi ile temas ettiğinde bir katı elektrolit arafazı (SEI - Solid electrolyte interphase) tabakası oluşturur. Bu tabaka, lityum iyonlarının geçişine izin verirken çözücünün anotla doğrudan reaksiyona girmesini engeller. SEI tabakasının stabilitesi, pilin döngü ömrü ve güvenliği için kritiktir.

Katı Hal Elektrolitler: Katı hal elektrolitler, geleneksel sıvı elektrolitlere bir alternatiftir ve daha yüksek güvenlik, daha uzun ömürlü bununla beraber de geniş bir

sıcaklık aralığında çalışma potansiyeli sunar. Bu elektrolitler genellikle polimer, seramik veya cam malzemelerden yapılır ve iyon iletkenliği sağlar.

Elektrolit, lityum-iyon pillerin çalışmasında merkezi bir rol oynar. Elektrolitin uygun bileşimi ve yapısı, pilin verimli çalışmasını, uzun ömürlü olmasını ve pil güvenliğini sağlar. Elektrolitlerin stabilitesi, özellikle yüksek voltaj ve sıcaklık koşullarında pilin performansı için kritik öneme sahiptir. Lityum iyon pil teknolojisi geliştikçe, elektrolitlerin bileşimi ve yapısında da yenilikler yapılmakta, daha güvenli ve verimli elektrolitler geliştirilmektedir. Örneğin, katı hal elektrolitler gibi yeni nesil elektrolitler, gelecekteki LIB'lerin performansını ve güvenliğini artırma potansiyeline de sahiptir.

Lityum İyon Pil Üretim Tasarımları: Lityum-iyon pil üretimi, yüksek verimlilik, güvenlik, performans ve maliyet optimizasyonunu hedefleyen karmaşık ve dikkatle tasarlanmış bir süreçtir. Bu süreç, çeşitli elektrot malzemelerinin, elektrolitlerin, separatörlerin ve diğer bileşenlerin bir araya getirilmesini içerir. Üretim tasarımları, pilin uygulama alanına (örneğin, küçük taşınan cihazlar, elektrikli arabalar, çeşitli enerji depolama sistemleri) bağlı olarak değişir.

Düğme Tipi Lityum İyon Piller: Düğme tipi hücreler, genellikle küçük çaplı ve ince yapılıdır. Bu yapıları sayesinde küçük cihazlar için idealdirler. Bu hücreler, metal bir dış kasa içinde anot, katot, separatör ve elektrolit içerir. Düğme hücreler, çoğu kol saatinde yaygın olarak , İşitme cihazları ve tıbbi cihaz sensörleri gibi düşük güç gereksinimi olan cihazlarla beraber lazer işaretçiler, uzaktan kumandalar ve bazı taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılırlar

Küçük boyutları, taşınabilir cihazlar için idealdir. Düşük ağırlığı nedeniyle taşınabilirliğin önemli olduğu yerlerde tercih edilir. Basit yapısı ve küçük boyutu, düğme hücreleri uygun maliyetli yapar. Kullanım amacına bağlı olarak tek kullanımlık yada şarj edilebilir düğme hücreler bulunur, ancak şarj edilebilir olanların enerji yoğunluğu ve döngü ömrü genellikle sınırlıdır. Küçük boyutlarına rağmen, lityum-iyon teknolojisinin potansiyel güvenlik riskleri düğme hücrelerde de geçerlidir; bu nedenle dikkatli kullanım ve doğru atık yönetimi önemlidir.

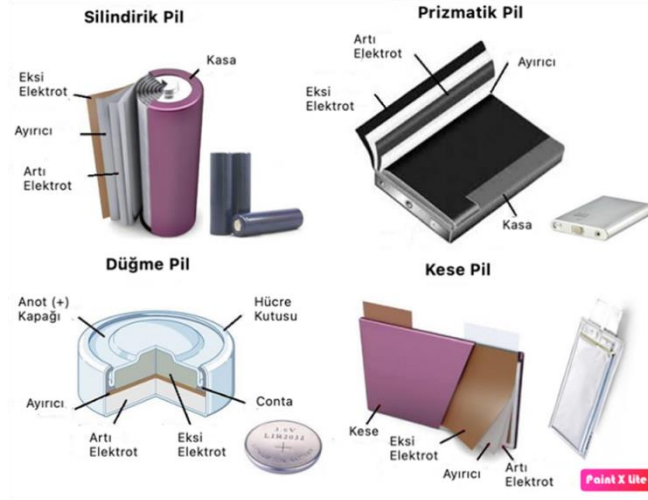
Düğme Tipi Lityum-İyon Hücrelerin Yapısı: Anot, Genellikle karbon (grafit) veya lityum alaşımlarından yapılır. Katot, Lityum kobalt oksit (LiCoO₂) gibi yüksek enerji yoğunluğu sağlayan malzemeler kullanılır. Dış Kasa, metal kaplamadır hücrenin

yapısal bütünlüğünü sağlayarak çevresel etkilere karşı da koruma sağlar. Düğme tipi lityum-iyon hücreler, kompakt, hafif ve taşınabilir yapılarıyla, enerji gereksinimi düşük olan cihazlarda ideal bir çözüm sunar. Enerji depolama kapasiteleri sınırlı olsa da taşınabilirliğin ve küçük boyutların önemli olduğu uygulamalarda tercih edilirler.

Silindirik Hücreler: Bu hücreler, bir bobin veya sarmal yapıda dizilmiş anot, katot ve separatör katmanlarından oluşur. Sarmal yapı, hücrenin yuvarlak bir metal kasa içinde yerleştirilmesini sağlar. Yüksek mekanik dayanıklılık, kolay üretim, iyi termal yönetim ve geniş çapta standartlaştırılmış boyutlar. Bu format, enerji yoğunluğu ve üretim maliyeti açısından avantaj sağlar. Taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar (örneğin, Tesla'nın bazı modelleri).

Prizmatik Hücreler: Düz bir yapıdaki anot, katot ve separatör katmanları üst üste yerleştirilir ve bu yapı metal veya sert plastik bir kutu içinde kapatılır. Diğer tiplere göre daha yüksek enerji yoğunluğu ile birlikte esnek tasarım seçenekleri de sunar. Düz yüzeyler, hücrelerin daha kolay yerleştirilmesini sağlar. Daha karmaşık üretim süreçleri ve termal yönetim gereksinimleri. Ayrıca, mekanik dayanıklılığı silindirik hücrelere göre daha düşüktür.

Poşet (Pouch) Hücreler: Esnek bir poşet veya laminant malzeme ile kaplanmış ince, düz hücrelerdir. Elektrotlar katmanlar halinde istiflenir ve daha sonra esnek bir paket içine mühürlenir. Poşet hücreler hafiflik, esneklik, daha düşük maliyetleri ve yüksek enerji yoğunluğu sunar. Ayrıca, üretim sırasında çeşitli boyutlarda hücreler üretilebilir. Mekanik dayanıklılığı daha düşük olup, dışarıdan baskı ve delici kuvvetlere karşı daha hassastır. Termal yönetim de zorluk yaratabilir. Taşınabilir elektronik cihazlar, drone'lar, elektrikli araçlar.



Şekil 1.6. Lityum ion pil tipleri.

1.1.1.3. Lityum iyon pil kullanıldıkları yerler

Lityum iyon piller temel özellikleri olan; yüksek enerji yoğunluğu, hafiflikleri ve uzun ömürleri nedeniyle günümüzde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır:

Taşınabilir Elektronik Cihazlar: Akıllı telefonlar, dijital kameralar, dizüstü bilgisayarlar ve tabletler gibi cihazlarda yaygın olarak kullanılır.

Elektrikli Araçlar (EV): Elektrikli otomobiller, bisikletler, scooterler ve hatta bazı ticari araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılır.

Enerji Depolama Sistemleri: Yenilenebilir enerji sistemlerinde (örneğin güneş ve rüzgâr enerjisi) depolama çözümleri olarak kullanılır.

Tıbbi Cihazlar: Kalp pilleri, implantlar ve taşınabilir tıbbi ekipmanlar gibi tıbbi uygulamalarda kullanılır.

Havacılık ve Uzay Sanayii: Dronlar, uydu sistemleri ve diğer havacılık uygulamalarında enerji kaynağı olarak kullanılır.

1.1.1.4. Lityum iyon pil pillerin karşılaştırılması

Lityum iyon piller, diğer pil türleriyle karşılaştırıldığında diğer pillere göre bazı avantajlara ve bazı dezavantajlara sahiptir. İşte başlıca karşılaştırmalar:

Kapasite- Enerji Yoğunluğu: Lityum iyon piller, nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) gibi pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, bu kapasite yoğunluğu aynı boyutta diğer tiplere göre daha fazla enerji depolayabileceği anlamına gelir.

Ağırlık: Lityum iyon piller, yapısal olarak diğer pillere göre daha hafiftir, bu da taşınabilir cihazlar için büyük bir avantaj sağlar.

Döngü Ömrü: LiFePO_4 gibi bazı lityum iyon piller, binlerce şarj-döngü yaşam süresine sahiptir, bu da uzun vadeli kullanım sağlar.

Maliyet: Lityum iyon piller genellikle daha pahalıdır, ancak düşen üretim maliyetleri ve artan talep bu farkı azaltmaktadır.

Güvenlik: Lityum iyon pillerin termal kararlılığı, özellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahip olanlar için bir endişe kaynağıdır. Ancak, pil güvenlik teknolojileri ve pil yönetim sistemleri bu riskleri azaltmak için sürekli olarak geliştirilmektedir.

Lityum Kobalt Oksit (LCO)

Kimyasal Formül: LiCoO_2

Enerji Yoğunluğu: Yüksek (150-200 Wh/kg)

Güvenlik: Orta düzeyde; termal kararlılığı daha düşüktür.

Döngü Ömrü: Orta (500-1000 döngü)

Maliyet: Yüksek; kobalt maliyetli bir malzemedir.

Kullanım Alanları: Dizüstü bilgisayarlar , cep telefonları, tabletler.

Avantajlar: Yüksek enerji yoğunluğu, kompakt tasarımlar için uygundur.

Dezavantajlar: Düşük termal stabilite ve nispeten kısa döngü ömrü.

Lityum Demir Fosfat (LFP)

Kimyasal Formül: LiFePO_4

Enerji Yoğunluğu: Orta (90-120 Wh/kg)

Güvenlik: Yüksek; termal ve kimyasal stabilite sağlar.

Döngü Ömrü: Uzun (2000+ döngü)

Maliyet: Orta; kobalt içermez, bu da maliyeti düşürür.

Kullanım Alanları: Elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri, elektrikli aletler.

Avantajlar: Yüksek güvenlik, uzun döngü ömrü, çevre dostu.

Dezavantajlar: Diğer lityum iyon pillerden daha düşük enerji yoğunluğu.

Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC)

Kimyasal Formül: $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$

Enerji Yoğunluğu: Yüksek (150-220 Wh/kg)

Güvenlik: Orta; güvenlik termal yönetimle sağlanabilir.

Döngü Ömrü: Orta ila uzun (1000-2000 döngü)

Maliyet: Orta ila yüksek; nikel, manganez ve kobalt içeriği maliyeti etkiler.

Kullanım Alanları: Elektrikli araçlar, güç araçları, enerji depolama sistemleri.

Avantajlar: İyi enerji yoğunluğu ve güç dengesi, geniş kullanım alanı.

Dezavantajlar: Kobalt ve nikelin maliyeti ve temini.

Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA)

Kimyasal Formül: LiNiCoAlO_2

Enerji Yoğunluğu: Çok yüksek (200-250 Wh/kg)

Güvenlik: Orta; termal yönetimle güvenlik sağlanabilir.

Döngü Ömrü: Orta ila uzun (1000-1500 döngü)

Maliyet: Yüksek; nikel ve kobalt maliyetlidir.

Kullanım Alanları: Elektrikli araçlar (Tesla modelleri), enerji depolama.

Avantajlar: Çok yüksek enerji yoğunluğu, uzun menzil sunan elektrikli araçlar için uygundur.

Dezavantajlar: Maliyetli ve termal yönetim gerektirir.

Lityum Manganez Oksit (LMO)

Kimyasal Formül: LiMn_2O_4

Enerji Yoğunluğu: Orta (100-150 Wh/kg)

Güvenlik: Yüksek; termal stabilite sağlar.

Döngü Ömrü: Orta (500-1000 döngü)

Maliyet: Düşük ila orta; kobalt içermediği için daha ucuzdur.

Kullanım Alanları: Elektrikli araçlar, elektrikli aletler, tıbbi cihazlar.

Avantajlar: İyi güvenlik ve düşük maliyet.

Dezavantajlar: Diğer lityum iyon pil türlerine göre daha düşük enerji yoğunluğu.

Lityum Titanat (LTO)

Kimyasal Formül: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$

Enerji Yoğunluğu: Düşük (70-90 Wh/kg)

Güvenlik: Çok yüksek; termal ve kimyasal olarak çok stabil.

Döngü Ömrü: Çok uzun (3000+ döngü)

Maliyet: Yüksek; lityum titanat kullanımı nedeniyle maliyetlidir.

Kullanım Alanları: Hızlı şarj gerektiren uygulamalar, elektrikli araçlar, enerji depolama.

Avantajlar: Hızlı şarj yeteneği, çok uzun döngü ömrü, yüksek güvenlik.

Dezavantajlar: Düşük enerji yoğunluğu ve yüksek maliyet.

Özet Karşılaştırma

Enerji Yoğunluğu: $\text{NCA} > \text{NMC} > \text{LCO} > \text{LMO} > \text{LFP} > \text{LTO}$

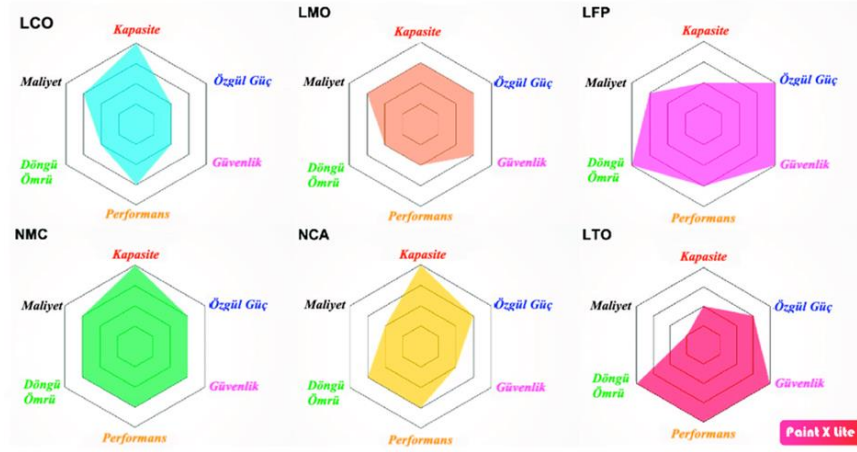
Güvenlik : $\text{LTO} > \text{LFP} > \text{LMO} > \text{NMC} > \text{NCA} > \text{LCO}$

Döngü Ömrü : $\text{LTO} > \text{LFP} > \text{NMC} > \text{NCA} > \text{LMO} > \text{LCO}$

Maliyet : $\text{LMO} < \text{LFP} < \text{NMC} < \text{NCA} < \text{LCO} < \text{LTO}$

Tablo 1.1. Lityum ion pil tiplerine göre karşılaştırma

Özellik / Tip	LCO	LMO	LFP	NMC	NCA	LTA
Katot – Anot	LiCoO ₂ katot (~%60 Co), grafit anot	LiMn ₂ O ₄ katot, anot	grafit LiFePO ₄ katot, anot	grafit LiNiMnCoO ₂ katot, grafit anot	LiNiCoAlO ₂ katot (~%9 Co), grafit anot	LMO/NMC katot; Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (titanyum) anot
Çalışma Voltajı	3,60 V; TÇA 3,0–4,2 V/hücre	3,70 V (3,80 V); TÇA 3,0–4,2 V/hücre	3,20–3,30 V; TÇA 2,5–3,65 V/hücre	3,60–3,70 V; TÇA 4,2 V/hücre	3,60 V; TÇA 3,0–4,2 V/hücre	2,40 V; TÇA 1,8–2,85 V/hücre
Özgül Enerji (Kapasite)	150–200 Wh/kg	100–150 Wh/kg	90–120 Wh/kg	150–220 Wh/kg	200–260 Wh/kg	50–80 Wh/kg
Şarj C-Oranı	0,7–1C, 4,20 V; Tipik 3 saat şarj	0,7–1C tipik, max 3C, 4,20 V	1C, 3,65 V; Tipik 3 saat şarj	0,7–1C, 4,20 V; Tipik 3 saat şarj	0,7C, 4,20 V; Tipik 3 saat şarj	1C; Max 5C, 2,85 V’a şarj
Boşalma Oranı	1C; 2,50 V kesme	1C; 10C, 2,50 V kesme	1C, 25C; 40A; 2,50 V kesme	1C; –2C; 2,50 V kesme	1C; 3,00 V kesme	10C–30C; 1,80 V kesme
Döngü Ömrü	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	500	3000–7000
Termal Kaçak	150 °C (302 °F)	250 °C (482 °F)	270 °C (518 °F)	210 °C (410 °F)	150 °C (302 °F)	660 °C (1220 °F)



Şekil 1.7. Lityum ion pil tiplerinin karşılaştırma grafikleri.

1.1.2. Lityum iyon pillerdeki yangın tehlikeleri: Neden yanar, neden arıza yapar, yangın davranışları ve ürettikleri gazlar

1.1.2.1. Lityum iyon piller neden arıza yapar?

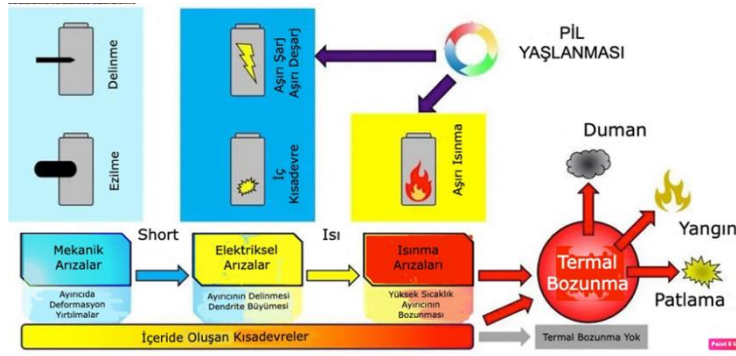
Lityum iyon piller, çeşitli nedenlerle arızalanabilir. Bu nedenler arasında şunlar bulunmaktadır:

Üretim Hataları: Üretim sürecindeki hatalar, pilin iç yapısında zayıflıklara neden olabilir. Üretim sırasında kimyasal bileşim hataları ya da pil kimyasallarının içerisine toz gibi başka yabancı maddelerin karışması, yapıştırma ya da paketleme sırasındaki hatalar.

Aşırı Kullanım: Pilin tasarım limitlerinin ötesinde kullanılması, bileşenlerin aşınmasına ve bozulmasına neden olabilir. Pillerin üreticinin kullanım kılavuzuna aykırı olarak şarj ve deşarj yapılması.

Çevresel Faktörler: Yüksek sıcaklık, yüksek nem ve bazı diğer çevresel faktörler, pilin performansını olumsuz etkileyebilir. Pillerin üreticinin kullanım kılavuzuna uygun olmayan sıcaklıklara mazur kalmaları, hibrid araçlarda yakıt yanması sonucu meydana gelen aşırı ısınmalar.

Yaşlanma: Piller zamanla kapasitelerini kaybeder ve iç dirençleri artar, bu da arızalara yol açabilir. Pillerin kullanım ömürleri vardır ve kullanım ömürlerinin üzerinde kullanılmaya devam eden piller arıza meydana getirir.



Şekil 1.8. Lityum ion pillerin temel arızalanma akış diyagramı.

1.1.2.2. Lityum iyon piller neden yanar?

Lityum iyon pillerin yangın tehlikeleri, genellikle termal kaçak adı verilen bir süreçten kaynaklanır. Termal kaçak, pilin iç sıcaklığının kontrolsüz bir şekilde artarak, pilin kimyasal yapısının bozulmasına ve yangına neden olmasına denir. Termal kaçak şu nedenlerle meydana gelebilir:

Dışsal Isı Kaynakları: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan piller, iç sıcaklıklarını artırarak termal kaçak riskini artırabilir. 90–120 °C aralığındaki iç sıcaklık, LIB içindeki SEI katmanının ekzotermik olarak ayrışmasına neden olur. Genellikle 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hidrokarbon elektroliti ayrışabilir ve ısı açığa çıkarabilir.

Aşırı Şarj - Aşırı deşarj: Pilin aşırı şarj edilmesi, iç basıncın ve sıcaklığın artmasına neden olabilir. Pilin ani aşırı deşarj edilmesi de termal bozunuma sebep olabilir. Üreticinin belirlediği şarj aralığının ötesinde aşırı şarj veya voltaj deşarjı, anotta lityum kaplamaya veya dendrit oluşumuna neden olabilir. Zamanla bu durum ayırıcıyı delerek elektrotların arasında kısa devreye neden olabilir ve kısa devre durumu termal kaçağa / termal bozunuma neden olabilir.

İç Kısa Devre: Pilin içindeki veya dışındaki kısa devreler, çok hızlı bir biçimde süreçte büyük miktarda enerji açığa çıkararak ısınmaya ve yangına neden olabilir. Ayırıcının arızalanması nedeniyle, elektrolit yoluyla katot ile anot arasında teması izin veren bir ISC meydana gelir. Bu, yukarıdaki kötüye kullanım koşullarından herhangi biri nedeniyle veya bir üretim hatasının sonucu olarak gerçekleşebilir.

Mekanik Hasar: Düşme veya darbe gibi mekanik hasarlar, pilin iç yapısına zarar vererek termal kaçağı tetikleyebilir. Genellikle araba kazası veya kurulum sırasında LIB'de meydana gelen harici aksiliklerin neden olduğu mekanik kötü kullanım,

elektrolit yoluyla elektrotlar arasında elektriksel kısa devre oluşmasına ve lokal ısınma oluşmasına neden olabilir

Termal bozunum (thermal runaway) nedir?: LIB'lerin enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılır, hibrit elektrikli araçlarda (HEV'ler), elektrikli araçlarda (EV) kullanıldığında birincil güvenlik sorunu olan termal kaçak ve yangına karşı hassastırlar. Bu uygulamalarda kullanılan LIB sistemleri, tek bir hücredeki termal kaçakların bitişik hücrelerde de termal kaçakları başlatabileceği ve sonuç olarak tüm batarya sisteminin bütünlüğünü tehlikeye atabileceği çok hücreli paketler ve modüllerden oluşur. Dolayısı ile Termal Bozunum olayını iyi anlayıp analiz etmek gerekir.

Yukarıda bahsedilen arıza ve sebepler neticesinde; ısıl bozunma, elektriksel bozunma veya mekanik bozunma - hasar durumunda LIB içinde anormal bir sıcaklık artışı meydana gelebilir. Batarya sıcaklığındaki artışla birlikte, bataryanın iç malzemeleri bir dizi ekzotermik reaksiyona girecek ve bu da bataryanın sıcaklığını ve reaksiyon oranlarını daha da artıracaktır.

Bir LIB temel olarak katot, anot, ayırıcı ve elektrolitten oluşur. Katot, yüksek pil kapasitesi ve çıkış voltajı sağlamak için lityum bileşikleri içeren ve yüksek bir oksidasyon-redüksiyon potansiyeline sahip malzemelerden oluşur. Anot genellikle düşük bir oksidasyon-redüksiyon potansiyeline ve kararlı elektrokimyasal özelliklere sahiptir, bu özellikler pilin hızlı bir şekilde şarj ve deşarj olabilmesini bununla beraber de düşük bir kendi kendine deşarj oranına sahip olmasını sağlar.

Ayırıcı, anot ve katotun aktif malzemelerinin elektrolitte doğrudan birlikte reaksiyona girmesini önleyen pilin içindeki gözenekli bir filmidir. Kalitesi pil kapasitesini, kullanım ömrünü ve pilin sıcaklık direncini etkileyebilir.

Tuz, organik bir çözücü ve diğer katkı maddelerinden oluşan elektrolit, pil yapısında anot ve katot arasında lityum iyonlarının hareketini sağlayan bir kanaldır. Elektrolit, pil kapasitesini, çalışma sıcaklığını, güç ve enerji yoğunluklarını etkilemektedir.

Piller enerji üretirken bir egzotermik reaksiyon da oluştururlar. Lityum iyon piller enerji üretirken egzotermik reaksiyonlar meydana getirir. Bu reaksiyonlar, pildeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme sürecinin bir sonucudur. Özellikle termal kaçak / bozunum durumlarında, bu egzotermik reaksiyonlar hızlanır ve ısı üretimi artar.

Bu ekzotermik reaksiyon için üç genel senaryo vardır.

Sıcaklık artışının daha düşük bir sıcaklık sınırını aşması ve daha yüksek bir sıcaklık eşiğinin altında kalması bu durum normal çalışma sürecidir.

Sıcaklık artışı belirli bir sıcaklık eşiğini aşar. Reaksiyon herhangi bir nedenle anormaldir ve mümkünse önlemler alınması gerekir. Soğutmayı en üst düzeye çıkararak veya tepkimeye girenlerin eklenmesini azaltarak yapılabilir.

Sıcaklık ikinci bir eşiği aşar, reaksiyon hızı daha yüksek sıcaklık nedeniyle artar ve artık sıcaklık artışını harici önlemlerle sınırlamak mümkün olmaz.

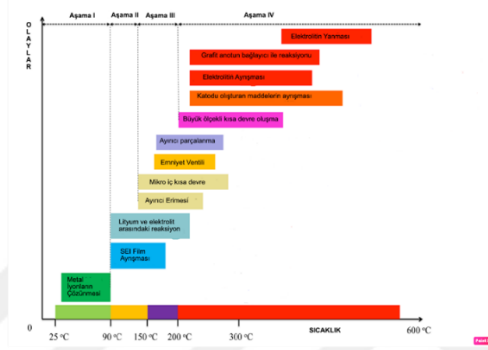
Termal kaçaklara yol açan üç ana sorunsal vardır: mekanik, elektriksel ve termal [1]. Mekanik sorun, ezilme, çivi delme, sıkıştırma vb. kaynaklanır. Elektriksel sorun, aşırı şarj, aşırı deşarj, harici kısa devre vb. kaynaklanır, termal sorun ise , aşırı ısınma, yüksek ortam sıcaklığı, bir yangına maruz kalma vb. kaynaklanır. Bu sorunsal koşullar, ayırıcının bozulmasına yol açabilir ve bu bozulma pilin içinde bir kısa devreye neden olabilir. Kısa devre aşırı ısı üretir ve elektrokimyasal yan reaksiyonların oluşmasını yoğunlaştırır, büyük miktarda yanıcı gaz açığa çıkarır ve pilin dış kasasının iç basıncının artmasına ve kasanın genişlemesine yol açar. Bu etkiler en sonunda yangına veya patlamaya yol açabilir.

Termal kaçak sıcaklık tepkisi genellikle üç sıcaklık eşiği ile karakterize edilir: T1, algılanabilir pil kendi kendine ısınmasının başlangıç sıcaklığı; T2, termal kaçağın tetikleyici sıcaklığı ve T3, termal kaçağın maksimum sıcaklığı [2].

Kendiliğinden ısınmanın başlangıcı katı elektrolit arayüzün (SEI) ayrışmasından kaynaklanır; T1 genellikle pilin sıcaklık artış hızı deneysel olarak belirlenen bir eşiği aştığında meydana gelir. Termal kaçağın tetikleyicisi, bir iç kısa devreye yol açan ayırıcı arızasıdır; T2, sıcaklığın sabitten yarı-üstel bir eğriye yükseldiği noktadır [3]. T3, en yüksek nokta olduğu için bir sıcaklık profilinde kolayca bulunabilir. Yayınlanmış raporlardaki bazı modeller, örneğin T2'den T3'e kadar olan sıcaklık profilinin bir bölümünü simüle ederken, diğer modeller T1'den T3'e kadar olan tüm profili simüle eder.

Bir lityum iyon hücresinin sıcaklığı, hücre tarafından üretilen ve dağıtılan ısı miktarı arasındaki ısı dengesine göre belirlenir [4,5,6]. Isı üretimi üstel işlevi takip eder ve ısı dağılımı doğrusal işlevi korur [7]. Bir hücre belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtıldığında (genellikle 130–150 °C'nin üzerinde) [4,8,9], elektrotlar ve yerleştirilen elektrolit

arasındaki ekzotermik kimyasal reaksiyonlar hücrenin iç sıcaklığını yükseltir. Hücre bu ısıyı dağıtabilirse, sıcaklığı anormal şekilde artmaz. Ancak, üretilen ısı dağıtılabilecek olandan fazlaysa, ekzotermik süreçler adiyabatik benzeri koşullar altında ilerler ve hücrenin sıcaklığı hızla artar. Artan sıcaklık, istenen galvanik reaksiyonlar yerine kimyasal reaksiyonları daha da hızlandırır ve pil içerisinde daha fazla ısı üretilmesine de neden olur en sonunda bu durum termal bozunum ile sonuçlanır [10]. Hücre içindeki ana ekzotermik reaksiyonlar aşağıdaki Şekilde gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Lityum pillerin içinde ana ekzotermik reaksiyonlar.

Termal bozunum ısıya – ısı enerjisine ve ısı derecesine bağlı olarak ilerler ve aşamalar kaydeder ve ekzotermik bir reaksiyona dönüşür.

Ekzotermik reaksiyonun ilk aşamasında, SEI (solid electrolyte interphase) katı elektrolit interfaz tabakası ilk olarak 90C-120C’de ayrışarak anodun elektrolite maruz kalmasına neden olur.

SEI tabakasının koruması olmadan, grafit anot elektrolit ile reaksiyona girecektir. Ayrıca, sıcaklık yaklaşık 130C’yi aştığında batarya içindeki ayırıcı eriyecek ve hücre içinde mikro iç kısa devreye neden olacaktır.

Mikro iç kısa devre, bataryada depolanan elektrik enerjisini joule ısısına dönüştürebilir ve bataryanın sıcaklık artışını daha da hızlandırabilir. Sıcaklık arttıkça, ayırıcı erimeye ve hatta çökmeye devam eder, bu da pil içinde büyük ölçekli kısa devre ve joule ısı birikimine neden olur.

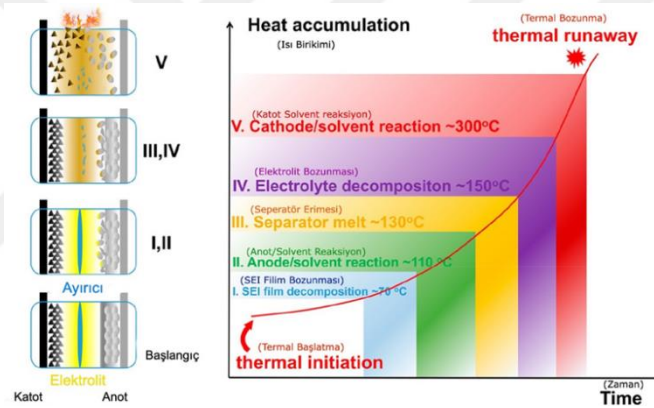
Daha sonra, sıcaklık yaklaşık 200C’yi aştığında batarya içindeki katot, anot ve elektrolit büyük ölçüde ayrışır. Ardından, sıcaklık katlanarak artar ve batarya bir ateşleme kaynağı haline gelir.

Batarya içindeki anot, katot, ayırıcı ve elektrolit yanıcı malzemelerdir. Buna ek olarak, yukarıda bahsedilen reaksiyon H_2 , CH_4 , C_2H_4 ve C_2H_6 gibi bazı yanıcı gazlar da üretecektir. Oksidan sağlanması sadece dışarıdan hava ile değil, aynı zamanda pil tarafından üretilen oksijen ile de sağlanabilir.

Termal kaçaklar her zaman yangına yol açmaz. Şekil de görüleceği üzere , TR sonucunda gaz çıkışı meydana gelir , bazan yanma oluşmadan sadece gaz çıkışı devam eder , ortamın durumuna göre yanma veya patlamada meydana gelebilir.

Termal kaçaklar temel üç şekilde oluşabilir.

Kısa Devre: Bataryanın içinde oluşacak veya kullanım sırasında diğer ekipmanlarda oluşabilecek kısa devreler, batarya içine su girmesi ya da aracın suya maruz kalması sonucunda oluşabilecek kısa devreler ani enerji serbest bırakılmasına termal kaçağa neden olabilir.



Şekil 1.10. Isı sonucunda pil yapısında meydana gelen değişimler.

Termal Bozunum (TR) = Yangın Değildir, Termal bozunum ve yangın birbirine eşdeğer kavramlar değildir. Termal bozunum, pilde başlayan bir zincirleme reaksiyondur ve yangına yol açabilir. Ancak müdahale sırasında genellikle odak noktası, dışarı çıkan gazların yanmasını kontrol altına almak ve yangının büyümesini önlemektir.

Lityum pil yangın evreleri

Başlangıç Evresi: Bir yangın oluşumunun hazırlanması yani yangın öncesi hazırlık evresi bu evre termal bozunumu başlatan ve termal bozunumu oluşturan nedenlerden kaynaklanıyor. Önemli olan nokta bu evrede, Termal bozunumu nasıl engelleriz, nasıl önleriz yada termal bozunum oluşmasını nasıl çok erken haber alırız ile ilgili soruları cevaplamaktır.

Lityum iyon pil yangınlarının oluşum süreci genellikle termal bozunum ile başlar. Bu durum, çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir: [11]

Aşırı Şarj veya Deşarj: Hücre voltajlarının aşırı değerlerde olması.

Fiziksel Hasar: Pil üzerinde oluşan mekanik hasarlar ve delinmeler.

Aşırı Isınma: Ortam sıcaklığının artışı veya pilin aşırı yüklenmesi.

Üretim Hataları: İç kısa devreler ve malzeme kusurları.

Kimyasal Denge Bozulması: Elektrolit parçalanması sonucu gaz çıkışı.

Yanma ve yangın öncesinde lityum pil hücrelerinde aşağıdaki gibi birtakım olaylar meydana gelir. Başlangıç evresi ısınmadır, hücre içi sıcaklık yükselmeye başlar, iç direncin artması veya dış mekanik hasar nedeniyle termal bozunum- termal kaçak (thermal runaway) tetiklenebilir. Elektrolit sıvısı buharlaşmaya başlayarak ve sonucunda yanıcı gazlar açığa çıkar. İç sıcaklık 80–120°C'ye ulaştığında elektrolit ayrışmaya başlar. Gaz üretimi gerçekleşir, Hidrojen (H₂), karbonmonoksit (CO), hidrojen florür (HF) gibi yanıcı ve toksik gazlar oluşur. Bu evrede sıcaklık artışı ve hücre şişmesi gözlemlenebilir.

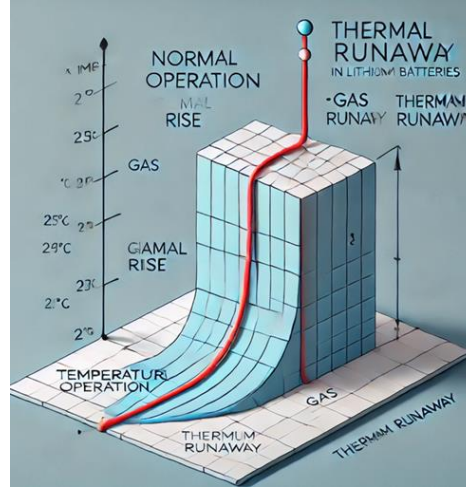
Termal bozunumu önleme yöntemleri ile ilgili araştırmalar devam etmektedir , bu sebeple önlemek için tam olarak kesin bir sonuç söylemek şimdilik doğru değildir, bu konuda pil üreticileri bilimsel çalışmalar yapmaktadırlar. Ancak son kullanıcı olarak bizler aşağıdaki önlemleri alabiliriz.

Aktif ve Pasif Soğutma Sistemleri kullanarak ısının artışını engellemek, Su veya hava soğutmalı sistemlerle ısının kontrol altına alınması.

Erken Algılama Sensörleri ile pillerde meydana gelen değişimleri izlemek, Isı, duman ve gaz sensörleri ile izleme yaparak bu faaliyetleri erken haber almak.

BMS (Battery Management System): ile Voltaj ve sıcaklık izleme yoluyla termal değişimlerin erken tespitini yapmak.

Elektriksel koruma yapmak yani Sigorta ve devre kesiciler ile anlık -hızlı elektrik kesme işlemi yaparak sistemi korumak.



Şekil 1.11. Birinci evre.

Termal Bozunum Evresi: İkinci evre termal bozunumun ilerlemesi ve yanmayı oluşturacak olan yanıcı Maddeleri yani yanıcı gazlar açığa çıkartması. Buna bağlı ısı artışının da gerçekleşmesi. Yanıcı gazların artmasını ya da oluşumunu nasıl engelleriz veya nasıl baskılarız sorularına cevap aranmalıdır.

Pil ısı artışı 150–200°C olduğunda Anot ve katot parçalanmaları başlar. Lityum bileşikler reaksiyona girer ve yanıcı gazlar (H_2 , CO) açığa çıkar. Termal kaçak hızlanır ve zincirleme reaksiyonlar başlar. Bu sıcaklıkta orta seviyede gaz çıkışı meydana gelir. Tepe Noktası ise 200–400°C sıcaklıklarda oluşur. Elektrolitin tamamen buharlaşması ile yüksek hacimli gaz çıkışı oluşur. Yanıcı gazlar (H_2 , CO , CH_4) maksimum seviyeye ulaşır. [12] [13] [14]

150–200°C: Elektrolit ayrışmasından HF (Hidrojen Florür) gibi toksik gazlar yayılır. [12] [13]

200–400°C: Yanıcı gazlar olan H_2 (Hidrojen), CO (Karbonmonoksit), CH_4 (Metan) ve diğer hidrokarbonlar açığa çıkar. [12] [13] [14]

LFP bataryalar, katot yapısında oksijen barındırmadığı için termal bozunum oluşma riski daha düşüktür ve daha az yanıcı gaz üretir. [17]

Yangın sırasında Hidrojen Florür (HF) gibi aşırı toksik gazlar bile düşük miktarda da olsa ortaya çıkar ve havalandırma veya gaz tahliyesi açısından dikkat edilmesi gerekir.

Kapalı alanlarda basınç artışı patlama riskini artırabilir.

Yanma- Patlama Riski Evresi

Üçüncü evre açığa çıkan gazların tipine durumuna göre ve miktarına göre yanması veya ortama göre patlaması. 400°C ve üzeri sıcaklıklar yoğun karbonmonoksit ve hidrokarbonlar tutuşarak yangını hızlandırır. [18]

Batarya hücreleri alevlenir veya patlar. Gaz çıkışının en yoğun olduğu aşamadır. Patlama ve tutuşma 400°C ve üzeri alevlenme veya patlama gerçekleşme potansiyeli taşır.

Yangının yayılma riski artar ve gaz çıkışı halen yoğun olarak devam eder. Hücreler tamamen tükenene kadar da gaz oluşumu devam edebilir. Yanıcı gazların kontrolsüz bir şekilde birikmesi yangın veya patlama riskini artırır. Bu durumda alınması gereken patlama ve yanma önlemleri ise şöyledir;

Patlama kapakları (Vent Panels) kullanmak, çünkü bu basıncı kontrol altına alarak patlamaları önler.

Basınç tahliye sistemleri kullanarak mekanik olarak basıncı tahliye etmek. Gaz tahliyesi ile basınç yönetimi sağlanır ve patlama önlenir.

Araçlarda ve küçük ekipmanlarda yangın battaniyesi kullanarak yangını baskılamak ve oksijen kaynağını kesmek.

Yanma- Patlama Evresi: Bu evre artık yanma ve patlama şartlarının oluşup reaksiyonun meydana geldiği evredir. Yanma meydana gelmişse , yanmayı durdurma , baskılama ve söndürme müdahalesi yapılır. Burada yanan lityum iyon piller nerede , nasıl bir yangın oluşmuş gibi parametrelere göre değerlendirme yapmak gerekir . Bir araç yangından bahsediyorsak o zaman araç ile ilgili neler yapabileceğimiz konusunu ele almalıdır.

Araç yangınları için yapılacaklar; [19]

- Elektrik Bağlantılarının Kesilmesi: Araç veya şarj istasyonunda elektrik bağlantısının kapatılması.

- Yangın Battaniyesi ile Baskılama: Yanmayı kontrol altına almak.

- Soğutma ve Söndürme: Su sisi veya kapsülleyici ajan katkılı kimyasal söndürücüler

Bir BESS yangından bahsediyorsak o zaman araç ile ilgili neler yapabileceğimiz konusunu ele almalıdır.

Depolama sistem yangınları için yapılacaklar;

Gazlı Baskılama Söndürme Sistemleri: İnert gazlar, Sıvı nitrojen. [20]

Su sisi ile Söndürme: Kapalı alanlarda dumanı ve yangını baskılama için kapsülleyici ajan katkılı su sisi otomatik algılama söndürme sistemleri kullanmak. [20] [21] [22]

Havalandırma ve gaz Tahliyesi: Otomatik sistemler veya kapaklar ile patlayıcı gazların uzaklaştırılması.

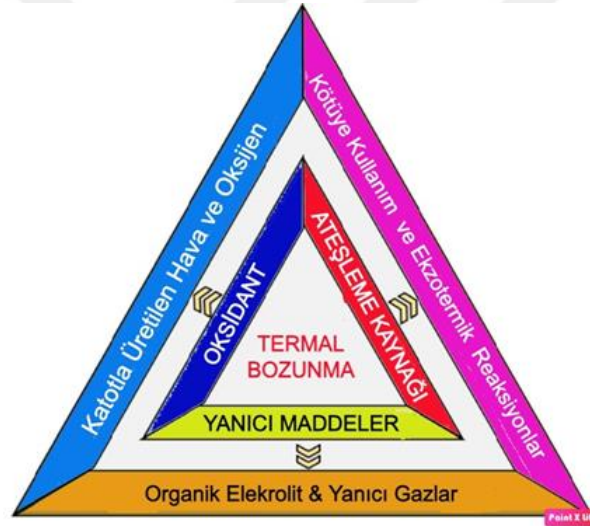
Soğutma prosedürleri uygulamak: Termal kaçak riskini azaltmak için kademeli soğutma yapmak.

Tüm olası senaryolarda yani araçlardan ya da küçük taşınabilir el aletlerinde oluşan yangınlarda ya da büyük depolama sistemlerinde oluşan yangınlarda, lityum iyon pillere müdahale yangınlarına müdahale öncesi bilmemiz gereken birkaç nokta vardır. Öncelikle ne tür pil kullanılıyor ve piller ne tür bir gaz çıkartıyor. Bu gazların etkileri, önemini anlamak ve tespit etmek. Yanan gazlar ve gazın içindeki hidrokarbon parçacıklar olduğunu bilmek. Duman yayılımını engellemek için bir önlem almamız gerektiği bilmek. Yangına yaklaşım ve müdahale için kişisel koruyucu ekipmanlar kullanmamız gerekliliğini bilmek. Yanma esnasında dışarıdan etkenler var mı, yani bir şarj istasyonunda bir elektrik kaynağı halen bağlı mı, ya da batarya depolama sistemi halen şebekeye bağlı mı bilmemiz. Müdahale ve baskılama için neler yapmamız gerektiğini bilmemiz yani duman yayılımını engellemek ve baskılamak için yangın battaniyesi gibi bir şeyler mi kullanıyoruz ne tür bir havalandırma, tahliye, duman boşaltma sistemimiz var. Söndürme için müdahaleyi ne ile yapıyoruz ne tür bir söndürme ajanı, söndürme maddesi kullanıyoruz ve hangi yöntemle söndürüyoruz. Yangın söndürüldükten sonra da yapılması gereken; biz yangını söndürdük ama termal bozunum pillerde batarya içlerinde ya da batarya paketlerinde halen devam ediyor olabilir, kademeli olarak soğutmaya ve termal bozunumu durduracak kadar ısıyı

düşürmek için gerekli soğutma işlemini yapılmasına devam etmek gerekli. Hatta termal dozunu da artık durduğunu varsayabiliriz, ancak tecrübeler göre yanmış piller en az 24 saat gözlem altında tutulmalıdır.

Lityum iyon pillerin yangın üçgeni?: Klasik olarak Yangın üçgeni üç unsurdan oluşur: yanıcı madde, ateşleme kaynağı (ısı) ve oksidan. Lityum iyon pillerin Yangın üçgeninin derinlemesine anlaşılması, LIB yangınlarının etkili bir şekilde söndürülmesinde bize yol gösterebilir, çünkü yanma süreci yangın üçgenindeki herhangi bir unsurun yok edilmesiyle sonlandırılabilir.

Lityum iyon pillerin yangın üçgenindeki önemli nokta şudur ki, LIB yangınlarında yangın üçgeni unsurlarından tamamı LIB tarafından üretilebilir. Çünkü Lityum iyon pillerin yapılarında kullanılan kimyasallarda oksidan maddeler çokça bulunabilir.



Şekil 1.13. Lityum iyon pil yanma üçgeni.

1.1.3. Lityum iyon pillerin yangın davranışları

Lityum iyon piller yangın sırasında aşağıdaki davranışları sergileyebilir. Lityum iyon pillerin yanması öncelikle alevli bir yanma oluşmasa bile ciddi sıcaklık ve yanıcı-parlayıcı gazlar ve oksidanlar üretir.

Hızlı Sıcaklık Artışı: Termal kaçak başladığında, pilin iç sıcaklığı hızla yükselir.

Alevlenme: İç sıcaklık belirli bir eşiği aştığında, pil alev alabilir.

Patlama: Basınç artışı nedeniyle pil patlayabilir, bu da yangının yayılmasına ve daha ciddi sonuçlara neden olabilir.

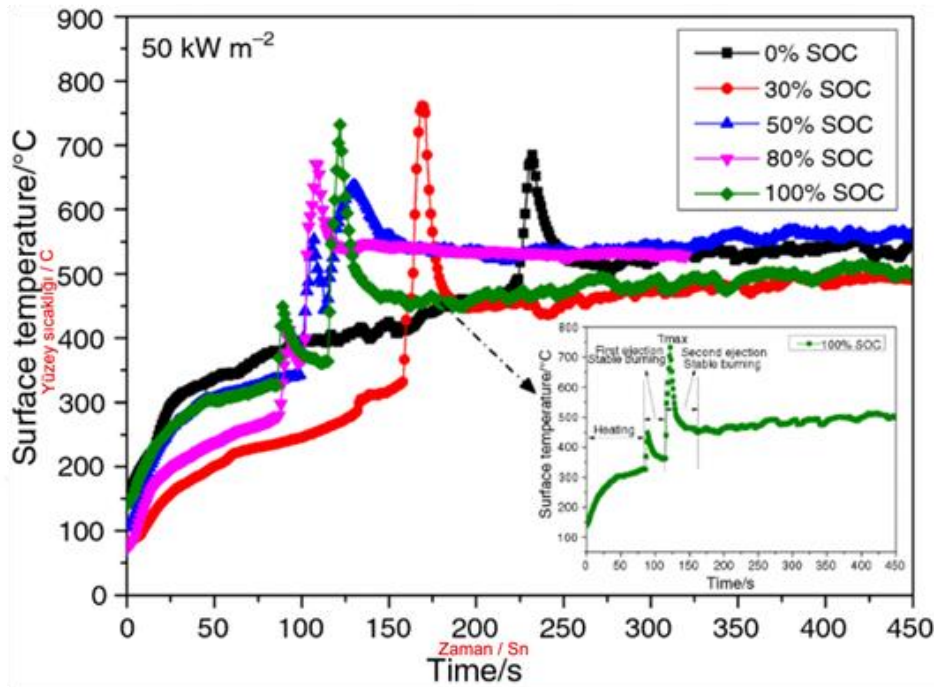
LIB yangınları karmaşık yangınlardır. Genel olarak yangın beş sınıfa ayrılır; A Sınıfı (Katı) , B Sınıfı (Sıvı), C Sınıfı (Gaz) , D Sınıfı (lityum, magnezyum, alüminyum vb. gibi yanıcı metaller) ve F Sınıfı LIB'lerin ana bileşenleri arasında paslanmaz veya alüminyum kabuk, plastik torba, sıvı elektrolit, anot malzemesi, katot malzemesi, ayırıcı, bağlayıcı ve Cu folyo ve bu bileşenlerin çoğu yer alır ve yanıcıdır. Örneğin LIB'lerin anot malzemeleri yanıcı grafit veya karbon fiberdir. Yukarıda belirtildiği gibi LIB'nin organik elektroliti yanıcı sıvıdır. Bu arada pilden çıkan gazlar yanıcı hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO), etilen (C₂H₄), metan (CH₄), etan (C₂H₆) [46]. Son olarak, LIB içindeki alüminyum kabuk ve lityum metal/lityumlu baharatların her ikisi de yanıcı metaldir. Bu nedenle LIB yangınları, LIB'lerin karmaşık bileşenleri nedeniyle Katı-Sıvı-Gaz ve Metal sınıfı yangınları içeren karmaşık yangınlardır.



Şekil 1.14. Lityum ion pillerin oluşturduğu yangın tipleri.

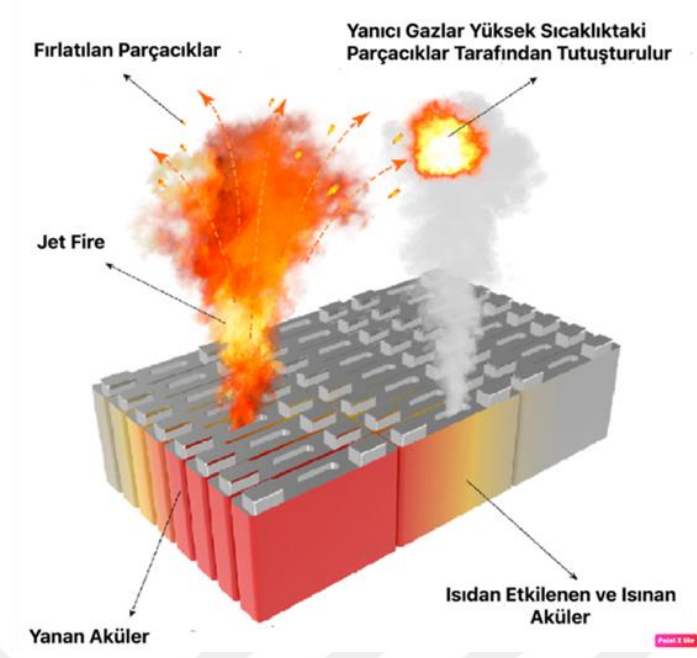
Lityum İyon Pillerin Yüksek Sıcaklık Yükselme Oranı: LIB'ler bazı aşırı koşullar tarafından kendiliğinden tetiklenen ekzotermik reaksiyonlar meydana gelebilir. TR'nin kritik sıcaklığına ulaşıldığında, bataryanın iç ekzotermik reaksiyonları şiddetlenir ve kısa sürede büyük miktarda ısı üreterek batarya sıcaklığını keskin bir şekilde yükseltir. TR oluştuğunda, bataryanın sıcaklık artış hızı ve maksimum sıcaklığı sırasıyla 100 C ve 800 C'yi aşabilir. Buna ek olarak, ekzotermik reaksiyon bataryanın içinde meydana gelir ve bataryanın iç sıcaklığının 1000 C'ye kadar yükselmesine neden olur. Bununla birlikte, yangın söndürme maddesinin soğutma için akünün iç kısmına erişmesi zordur. Söndürücü maddenin salınımı sırasında akünün yüzey sıcaklığı düşebilir. Soğutma yetersizse ve yangın söndürme maddesinin uygulanmasından sonra akünün iç sıcaklığı hala yüksekse, sıcaklık gradyanının etkisiyle akünün yüzey sıcaklığı tekrar yükselecektir. Dolayısıyla, ateşleme kaynağı

hala mevcut olduğundan, yangın söndürme işleminden sonra yeniden tutuşma olasılığı hala yüksektir.



Şekil 1.15. Zamana bağlı sıcaklıklar.

Lityum İyon Pillerin Yanma- Jet Yangını: Prizmatik ve silindirik LIB'ler, aşırı basınç nedeniyle patlamayı önlemek için genellikle emniyet valfleri ile donatılmıştır. TR işlemi sırasında, LIB içindeki kimyasal reaksiyonlar büyük miktarda gaz açığa çıkarır. Sürekli gaz birikimi ile bataryanın iç basıncı kademeli olarak artar. Bataryanın iç basıncı eşiğe ulaştığında, güvenlik valfleri yanıcı gazları, elektroliti ve iç malzeme parçacıklarını serbest bırakmak için açılır. TR oluştuğunda, kıvılcımlar ve yüksek sıcaklıktaki akü, enjekte edilen yanıcı gazları ve elektroliti kolayca tutuşturabilir. Ardından, emniyet valfinden şiddetli bir jet ateşi enjekte edilir ve alev yüksekliği 1 m-2 m'ye bile ulaşabilir. Bazı büyük ölçekli LIB'ler birden fazla jet alevi döngüsüne bile sahiptir. Torba hücrede emniyet valfi bulunmazken, iç basınç eşiğe ulaştığında torba zayıf noktalardan yırtılır (yani fiziksel patlama) ve tüm yanıcı elektrolit ve gazları yangın kaynağına maruz bırakır. Bu nedenle, poşet hücresi birden fazla jet alevi oluşturmak için birden fazla zayıf noktaya sahip olabilir ve bu da yangının boyutunu önemli ölçüde artırır.



Şekil 1.16. Batarya paketi yanması ve jet alevi.

Lityum İyon Pillerin Yangın Yayılması – Patlama: Batarya sisteminin yüksek voltaj ve yüksek kapasite talebini karşılamak için, LIB'ler genellikle batarya modüllerine seri ve paralel olarak bağlanır. Ayrıca, batarya modülleri sistem hacimsel enerji yoğunluğunu artırmak için sıkı bir biçimde birbirine yakın olarak düzenlenmiştir. Batarya modülündeki tek bir hücre TR'ye maruz kaldığında, kompakt düzenleme bitişik hücrelere hızlı ısı transferini kolaylaştırarak hücreden hücreye TR yayılımına neden olur. Bununla beraber tahliye kapağının tıkanması, şiddetli jet yangını, bitişik hücrelere ısı yayılım radyasyonunu artırır ve bu da TR yayılma sürecini hızlandırır. Bu arada, çok gaz birikmesinin ardından meydana gelebilecek olan ateşleme – patlama risklerini de doğurur. Yukarıda bahsedilen kimyasal reaksiyonlar, H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 gibi büyük miktarda gaz üretecektir. Ayrıca, elektrolit de yüksek sıcaklıkta buharlaşır. Yanıcı gazların bir kısmı yanma sırasında tüketilirken, diğer yanmamış gazlar modülde birikecektir. TR ile karşılaşan LIB'ler yüksek sıcaklıkta tutuşma kaynaklarıdır. Karışık yanıcı gaz konsantrasyonu patlama limitinin üzerinde olduğunda, yeterli oksidanla karşılaşıldığında deflagrasyon meydana gelebilir.



Şekil 1.17. Yangın başlaması ve yayılımı.

1.1.3.1. Lityum iyon piller yangın sırasında ne tür gazlar çıkarır?

Lityum iyon piller yangın sırasında çeşitli zehirli ve yanıcı gazlar üretebilir. Bu gazlar arasında şunlar bulunur:

Karbon Monoksit (CO): Yangın sırasında yaygın olarak üretilen toksik bir gazdır. Karbon monoksit oranı, pilin kimyasal yapısına ve yangının şiddetine bağlı olarak değişir.

Karbon Dioksit (CO₂): Her yanma olayı sonucunda ortaya çıkan bir gazdır. Genellikle yangın sırasında üretilen toplam gazın büyük bir kısmını CO₂ oluşturur.

Hidrojen (H₂): Yanıcı bir gaz olup, özellikle elektrolitlerin parçalanması sonucu oluşur.

Hidrojen Florür (HF): Elektrolitlerin yanması sonucu ortaya çıkan ve korozyif olan bir gazdır. Düşük miktarlarda bile oldukça tehlikelidir.

Metan (CH₄) ve Diğer Uçucu Organik Bileşikler (VOC): Pil bileşenlerinin yanması sonucu oluşabilir.

Elektrolit içinde yer alan organik solventler ve Lityum tuzları ısıya maruz kaldıklarında gaz üretirler. Burada tehlikeli olarak sınıflandırılan bileşen organik solventtir ve yanıcıdır. Lityum tuzu ise içeriğinde flor elementi bulunduğundan HF üretme potansiyeline sahiptir. Bu ürünün nem ile birleşimi sonucu HF gazı açığa çıkmaktadır. Aynı zamanda özellikle temel hammadde (LFP) ve diğer pil türlerinde (NMC) yer alan katot aktif malzemesi yüksek sıcaklıklarda Oksijen gazı üretme kabiliyetine sahiptir.

Lityum iyon pillerde kullanılan hammaddelere, deneylerin uygulama şartlarına (State of charge, herhangi bir dış kuvvet altında yapılıp yapılmadığı, yanma sıcaklığı vs.) ve

pil türüne (prizmatik 280Ah veya 100 Ah) bağlı olarak açığa çıkan gaz kompozisyonu farklılık gösteriyor.

Genel olarak yanma sonucu açığa çıkan temel gazlar; H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄ olarak belirtilebilir. Bunların bir kısmı elektrolitte yer alan bileşenlerin ayrışmasından, bir kısmı ise elektrotların yanmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan testlerde her bir pil türünün farklı gaz kompozisyonunu ortaya çıkardığı testpit edilmiştir. LFP türü 5.35 kg'lık hücreden, yanma sonucu ortalama 1.2 kg'lık gaz açığa çıktığı belirtilmiştir. Ortalama gaz miktarları ise şu biçimdedir.

CO₂: %45, CO: %22, CH₄: %12, C₂H₄: %11, HCl: %7

Hidrojen Gazı eklendiğinde oranlar bu şekilde oluyor:

CO₂: %36, H₂: %20, CO: %18, CH₄: %10, C₂H₄: %10, HCl: %5

Lityum iyon pillerin yangın sırasında çıkardığı gaz miktarları, pilin kapasitesine, bileşenlerine ve hangi koşullarda yandığına bağlı olarak değişir. Aşağıda bazı tahmini miktarlar verilmiştir:

Karbon Monoksit (CO): 1 kWh kapasiteli bir pil yangınında yaklaşık 20-50 gram CO gazı üretilebilir.

Karbon Dioksit (CO₂): Aynı pil yangınında yaklaşık 200-500 gram CO₂ gazı üretilebilir.

Hidrojen (H₂): Yaklaşık 10-20 gram H₂ gazı üretilebilir.

Hidrojen Florür (HF): Yaklaşık 1-5 gram HF gazı üretilebilir.

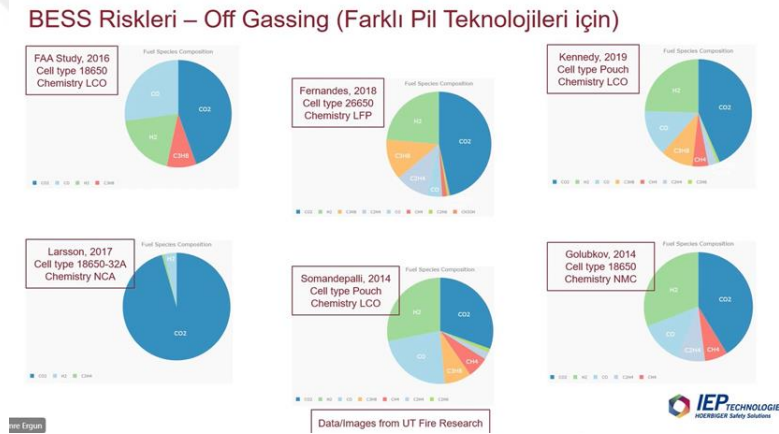
Metan (CH₄) ve Diğer VOC: Yaklaşık 10-30 gram arasında olabilir.

Bu tahmini miktarlar, yangının şiddeti, pilin kimyasal bileşimi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Aşağıda daha detaylı bir tablo sunulmuştur:

Tablo 1.2. Gaz türleri ve miktarları.

Gaz Türü	Tahmini Miktar (1 kWh pil)
Karbon Monoksit (CO)	20-50 gram
Karbon Dioksit (CO ₂)	200-500 gram
Hidrojen (H ₂)	10-20 gram
Hidrojen Florür (HF)	1-5 gram
Metan (CH ₄) ve VOC	10-30 gram

Lityum iyon pillerin yangın sırasında çıkardığı bu gazlar insan sağlığı için zararlıdır, üstelik çevre için de ciddi riskler oluşturabilir. Bu nedenle, lityum iyon pillerin kullanımı, depolanması ve imhası sırasında dikkatli olunmalıdır. Yangın durumunda, uygun yangın söndürme yöntemleri ve kişisel koruyucu ekipman kullanımı hayati öneme sahiptir. Aşağıda farklı zamanlarda farklı pil tipleri üzerinde yapılan testler sonucunda ortaya çıkan gazlar ile ilgili grafikler yer almaktadır.



Şekil 1.18. Pil tiplerine göre gaz çıkışları.

1.1.3.2. Hangi pil ne kadar ısı enerjisi meydana çıkarır?

Lityum iyon pillerin üretebileceği ısı enerjisi, pilin kimyasal bileşimine ve kapasitesine bağlı olarak değişir. Örneğin:

Lityum Kobalt Oksit (LiCoO₂): Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve termal kaçak sırasında büyük miktarda ısı üretebilir.

Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄): Daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olup, termal kaçak sırasında ürettiği ısı daha azdır.

Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC): Dengeli bir enerji ve güç yoğunluğuna sahip olup, orta seviyede ısı üretir.

Sonuç olarak, lityum iyon pillerin yangın tehlikeleri ve arıza nedenleri hem son kullanıcılar hem üreticiler hem de geri dönüşümcüler için önemli bir konudur. Güvenli

kullanım ve güvenli uygun BSS /BMS yönetim sistemleri, LIB’lerde oluşabilecek yanma risklerini en aza indirmek için ciddi bir kritik öneme sahiptir. Gelişen teknolojiler ile birlikte, lityum iyon pillerin güvenliği ve performansı sürekli olarak iyileştirilmektedir.

Lityum iyon pillerin yanması sırasında açığa çıkan ısı enerjisi, pilin kimyasal bileşimi, kapasitesi ve yanma koşullarına bağlı olarak değişkenlik arz eder. Ancak temel hesaplamalar hakkında genel bir fikir vermek açısından, bazı temel bilgiler sunabilirim.

Isı Enerjisi Hesaplaması: Bir lityum iyon pilin yanması sırasında açığa çıkan ısı enerjisi genellikle kilovat-saat (kWh) veya megajoule (MJ) cinsinden ifade edilir. Bu enerji miktarını hesaplamak için pilin kapasitesi ve kimyasal bileşimi dikkate alınmalıdır. Örneğin, 1 kilowatt-saat (kWh) enerji kapasitesine sahip bir lityum iyon pil, teorik olarak yanma sırasında yaklaşık 3.6 megajoule (MJ) enerji açığa çıkarabilir.

Örnek Hesaplama:

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ} \quad (1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ})$$

Bu temel hesaplama, bir pilin yanması sırasında açığa çıkan toplam enerjiyi temsil eder. Ancak, yanma sırasında açığa çıkan enerjinin ne kadarının ısı enerjisi olarak serbest bırakıldığı, pilin kimyasal yapısına ve yanma koşullarına bağlıdır. Örneğin, bir lityum kobalt oksit (LiCoO_2) pil, yüksek enerji yoğunluğu olması sebebi ile daha fazla ısı enerjisi açığa çıkarabilirken, lityum demir fosfat (LiFePO_4) pil daha az ısı enerjisi üretebilir.

Tipik Değerler:

Lityum Kobalt Oksit (LiCoO_2): 1 kWh kapasiteye sahip bir pil yanma sırasında yaklaşık 6-8 MJ enerji açığa çıkarabilir.

Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4): 1 kWh kapasiteye sahip bir pil yanma sırasında yaklaşık 4-5 MJ enerji açığa çıkarabilir.

Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC): 1 kWh kapasiteye sahip bir pil yanma sırasında yaklaşık 5-7 MJ enerji açığa çıkarabilir.

1.1.3.3. Güvenlik önlemleri

Lityum iyon pillerin yanma riski ve açığa çıkan ısı enerjisi nedeniyle, güvenlik önlemleri almak önemlidir. Pil yönetim sistemleri (BMS), aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa

devre risklerini en aza indirmek için çok kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, yangın söndürme sistemleri ve yangın geciktirici malzemeler, pil yangınlarının etkilerini azaltmak için kullanılabilir.

Sonuç olarak, lityum iyon pillerin yanma sırasında açığa çıkan ısı enerjisi, pilin kimyasal bileşimine ve kapasitesine bağlı olarak değişir. Genel olarak, 1 kWh kapasiteye sahip bir pil, yanma sırasında 4-8 MJ enerji açığa çıkarabilir. Bu değerler, güvenlik önlemlerinin önemini vurgular ve uygun pil yönetim sistemleri ile yangın risklerinin en aza indirilmesi gerektiğini gösterir.

Lityum iyon pillerin yangın sırasında çıkardığı yanıcı, toksik gazlar, hem insan sağlığı açısından risklidir, hem de çevre için ciddi riskler oluşturabilir. Yanıcı gazlara ek olarak, TR veya LIB'nin yanması sırasında çok sayıda duman, boğucu, tahriş edici veya zehirli gaz ortaya çıkacaktır ve bu da can kayıplarına neden olan birincil faktördür. Bu nedenle, lityum iyon pillerin kullanımı, depolanması ve imhası sırasında dikkatli olunmalıdır. Yangın durumunda, uygun yangın söndürme yöntemleri ve kişisel koruyucu ekipman kullanımı hayati öneme sahiptir.

Sonuç olarak, lityum iyon pillerin yangın sırasında çıkardığı gazlar ve bunların oranları, pilin kimyasal bileşimi ve hangi koşullarda yanma oluştuğuna bağlı olarak değişir. Bu gazların çoğu toksik ve yanıcıdır, bu nedenle lityum iyon pillerin güvenli kullanımı ve LIB kullanılan sistemlerin yönetimi kritik öneme sahiptir.

1.1.4. Lityum iyon pillerin yangınlarının algılanması ve söndürülmesi

Lityum iyon piller, bilindiği üzere yüksek enerji yoğunlukları ve yukarıda bahsedilen yangın davranışları nedeniyle yüksek yangın riski de taşırlar. Bu nedenle, lityum iyon pil yangınlarının erken algılanması ve etkili bir şekilde söndürülmesi büyük önem taşır.

1.1.4.1. Yangın algılama sistemleri

Lityum iyon pil yangınlarının erken algılanması, erken algılamaya bağlı yangının erken kontrol altına alınması ve ayrıca hızlı yayılmasının önlenmesi için kritik öneme sahiptir. Aşağıda, lityum iyon pil yangınlarının algılanması için kullanılan bazı yaygın algılama sistemleri yer almaktadır:

Duman Dedektörleri: Geleneksel duman dedektörleri, yanma başlangıcında oluşan ve ortaya çıkan dumanı algılar. Ancak, lityum iyon pil yangınları hızlı bir şekilde gelişebileceğinden, bu dedektörler tek başına yeterli olmayabilir.

Isı Dedektörleri: Lityum iyon pil yangınları genellikle ani ve yüksek sıcaklık artışı ile karakterize edilir. Isı dedektörleri, belirli bir sıcaklık noktası aşıldığında alarm verir.

Gaz Dedektörleri: Lityum iyon pil yangınları sırasında açığa çıkan gazlar, özellikle hidrojen, VOC ve karbon monoksit gibi yanıcı ve toksik gazlar, gaz dedektörleri tarafından algılanabilir.

Termal Kameralar: Termal kameralar, pil paketlerinde anormal ısı artışlarını tespit edebilir ve erken uyarı sağlayabilir.

1.1.4.2. Yangın söndürme sistemleri ve maddeleri

Lityum iyon pil yangınlarının söndürülmesi, yangının kimyasal doğası ve yüksek sıcaklıklar nedeniyle zor olabilir. Yangın söndürme maddesinin mekanizması temel olarak izolasyon, boğma, soğutma ve kimyasal bastırma olarak ayrılır. Bununla birlikte, yangın üçgeninin üç unsuru bataryanın kendisi tarafından sağlanabildiğinden, bataryanın yangın üçgeninin yok edilmesi zordur. Buna ek olarak, LIB yangını yukarıda tartışılan özelliklere sahip karmaşık bir yangındır. Bu nedenle, ideal LIB yangın söndürme maddelerini tasarlamak zor ve zahmetlidir. Şu anda, LIB yangını bastırmak için uygulanan yaygın yangın söndürme maddeleri gazlı söndürme maddesi (CO₂, HFC-227ea, C₆F₁₂O vb.), sıvı söndürme maddesi (su bazlı yangın söndürme) ve katı söndürme maddeleri (kuru tozlar, aerosol yangın söndürme maddesi vb.). Bunların avantaj ve dezavantajları, söndürme mekanizmaları ve uygulanabilir senaryoları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Su: Su, geleneksel yangınları söndürmek için yaygın olarak kullanılır, ancak lityum iyon pil yangınlarında sınırlı etkisi olabilir ve hatta bazı tür yangınlarda tehlikeli de olabilir.

Köpük: Köpüklü söndürücü maddeler, yüksek söndürme etkinliği, düşük maliyeti ve düşük kirliliği nedeniyle katı ve sıvı sınıfı yangınlarla mücadelede yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum pil yangınlarında çok etkin değildir.

Kuru Kimyasal Söndürücüler: Kuru kimyasal söndürücüler birçok yangın tipinde, yangının yayılmasını önlemek için etkili olabilir, ancak lityum iyon pil yangınlarında tamamen etkili değildir.

Gaz Söndürme Maddeleri: Gazlı söndürme maddeleri iletken olmadıkları, aşındırıcı olmadıkları, kalıntı bırakmadıkları için elektrik yangınlarında popülerdir. CO₂,

FM200 ve NOVEC 1230 denemelerinde soğutma etkisi olmadığı için yeniden alevlenme sık görülmüş. Ayrıca, gazlı söndürme maddelerinin yangın söndürme etkisi kapalı muhafazalarda daha iyi performans gösterir. En etkin en etkili likit Nitrojen (N₂) olmuştur çünkü yüksek seviye soğutma etkisi vardır.

Aerosol: Kuru kimyasal söndürücülerin söndürme etkisine benzer etki gösterirler, yangının yayılmasını önlemek için etkili olabilir, ancak lityum iyon pil yangınlarında tamamen etkili değildir.

Su sisi: Suyun temas verimliği daha çoktur ayrıca buna bağlı küçük partiküllerin de ısı emme oranı ve ısı emme hızı daha yüksektir bu sebeple su sisi daha etkilidir.

Su: Lityum-iyon pil (LIB) yangınlarında su kullanımı, yangını söndürmek veya sonrasında kontrol altına almak ve soğutmak için potansiyel bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem dikkatle ele alınmalıdır, çünkü lityum-iyon pillerin kimyasal yapısı ve yangın dinamikleri, su kullanımının etkinliğini ve güvenliğini etkileyebilir. Su, ısıyı hızla absorbe ederek yangının sıcaklığını düşürebilir. Bu, yangının yayılmasını yavaşlatabilir ve termal kaçağı kontrol altına almaya yardımcı olabilir. Su, elektrolitin buharlaşmasını ve pilin patlamasını önleyebilir veya bu süreçleri yavaşlatabilir. Su, yangının oksijenle temasını sınırlayarak alevlerin söndürülmesine yardımcı olabilir. Ancak, lityum-iyon pil yangınları kendi oksijen kaynaklarını üretme eğilimindedir (örneğin, katot malzemesinin bozulmasından dolayı), bu nedenle bu etki sınırlı olabilir. Su elektrik iletkenidir, bu nedenle suyun kullanılması sırasında, hala aktif olan elektrik devreleri veya kısa devre riskleri nedeniyle elektrik çarpması tehlikesi olabilir. Lityum-iyon pil yangınını söndürmek, soğutmak ve kontrol altına almak için gerekli su miktarı, yangının büyüklüğüne, ısı yüküne ve suyun soğutma kapasitesine bağlıdır. Yangın tamamen söndürülemeyebilir ve suyun buharlaşmasının ardından sıcaklık artışı devam edebilir. Lityum-iyon pil yangınlarında su kullanımı, bazı kimyasal reaksiyonları tetikleyebilir, özellikle metal yangınlarında bu da yangının daha da şiddetlenmesine neden olabilir.

Yangının Isıl Yükünün hesaplanması önemlidir. Yangının ürettiği enerji, pilin kapasitesine (Wh) ve yangın sırasında açığa çıkan enerjinin tamamının ısıya dönüştüğünü varsayarak hesaplanabilir. Örneğin, 10 kWh'lik bir pilin tamamen yandığını varsayalım:

$$\text{Isıl yük} = 10 \text{ kWh} \times 3600 \text{ s/h} = 36,000 \text{ kJ}$$

Suyun özgül ısısı yaklaşık: 4,18 kJ/kg°C'dir. Su, yangını soğutmak için kullanılacaksa, suyun sıcaklığı yükseldikçe yangının sıcaklığını da düşürecektir. Yangını söndürmek için suyun başlangıç sıcaklığını 20°C ve hedef sıcaklığı 100°C (kaynama noktası) olarak kabul edelim;

$$\text{Gerekli Su Miktarı} = \frac{\text{Isıl Yük}}{\text{Su Özgül Isısı} \times \Delta T} \quad (1.1)$$

$$\text{Gerekli Su Miktarı} = 36.000 \text{ kJ} / (4,18 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \text{C}) \times (100 - 20) \text{C} \quad (1.2)$$

$$\text{Gerekli Su Miktarı} = 107,5 \text{ kg su} \quad (1.3)$$

Su kaynadığında ve buharlaştığında, daha fazla enerji absorbe eder. Suyun buharlaşma ısısı yaklaşık 2260 kJ/kg'dır. Yangını tamamen soğutmak için bu buharlaşma ısısından da faydalanılabilir. Eğer 10 kWh'lik bir pil yangınına soğutmak için yeterli miktarda su kullanılacaksa:

Sadece Sıcaklık Artışı için Gerekli Su Miktarı: 107,5 kg. Eğer su buharlaşacaksa, buharlaşma ile ek soğutma sağlanabilir. Bu durumda, bu miktarın çok çok üstünde su gerekecektir.

Köpük: Köpük, yangının üzerine uygulandığında, alevlerin oksijenle temasını keserek yangının yayılmasını yavaşlatabilir veya durdurabilir. Köpüğün oluşturduğu fiziksel bariyer, yangının üzerine yayılarak oksijen akışını engeller. Köpük aynı zamanda su içeriği nedeniyle yangını soğutma etkisi de gösterebilir. Bu soğutma, termal bozunum devam etme riskini azaltarak yangının kontrol altına alınmasına yardımcı olabilir. Köpük, yangının daha fazla büyümesini sağlayacak kimyasal reaksiyonları sınırlayabilir. Ancak, lityum-iyon pillerin bazı yangınlarında, yangın içsel bir oksijen kaynağı (örneğin, katot malzemesinden salınan oksijen) kullanabilir, bu durumda köpük tek başına yangını tamamen söndürmekte yeterli olmayabilir. Lityum-iyon pil yangınları için yapılan araştırmalar sonucunda özel olarak formülize edilmiş köpükler, LIB yangınına kontrol altına almak için daha efektif ve etkili olabilirler. Bu köpükler, kimyasal reaktiviteyi sınırlayarak yangını söndürmeyi hedefler.

Köpük, genellikle belirli bir köpük konsantresi ile su karıştırılarak elde edilir. Örneğin, %3'lük bir köpük konsantresi kullanıldığında, 1000 litre köpük üretmek için 30 litre köpük konsantresi gereklidir.

$$Köpük \text{ Çöz. Mik} = \frac{A \times UO}{Cons} \quad (1.4)$$

Eğer yangın alanı 10 m² ve uygulama oranı 5 ise 1/m² ise, %3 köpük konsantrasyonu ile:

$$Köpük \text{ Çöz. Mik} = \frac{10 \times 5}{0,03} = 1667 \quad (1.5)$$

Bu durumda, köpük çözeltisini oluşturmak için yaklaşık 50 litre köpük konsantresi gereklidir.

Köpük kullanımı, lityum-iyon pil yangınlarında yangını kontrol altına almak için etkili bir yöntem olabilir, ancak yangının tamamen söndürülmesi için yeterli olmayabilir. Köpüğün etkinliği, doğru türde köpük seçimi, doğru uygulama oranı ve süresi ile doğrudan ilişkilidir. Elektrik çarpması riski ve köpüğün yangını tamamen söndürme kabiliyeti gibi faktörler göz önünde bulundurularak, köpük kullanımı öncesinde detaylı bir değerlendirme yapılmalıdır.

Kuru kimyasal söndürme maddeleri: Ana bileşeni sodyum klorür olan D tozu, metal yangınına söndürmek için uygundur. Ultra ince toz, havada uzun süre asılı kalabilen ve daha iyi yangın söndürme etkisi sağlayan daha küçük parçacıklara sahiptir. D tozu kısıtlı alanlarda Lityum piller için söndürmede yardımcı olabilir. ABC tipi kuru tozun LCO akü yangını üzerindeki yangın söndürme etkisini incelemek için deneyler yapmış ve açık alevin ABC kuru toz tarafından söndürülmesinden 8 saniye sonra yeniden ateşlemenin meydana geldiğini bulmuşlardır. Ayrıca kuru toz uygulamasından sonra kalan toz, koruma bölgesini kirletecek ve hassas aletlere zarar verecektir. Zamanında temizlenmezse, kalan toz suyu emdikten sonra elektriği iletken hale gelebilir ve bu da hücrenin harici kısa devre yapmasına sebep olabilir. Bu sebeplerle kuru toz LIB yangınına söndürmek için uygun görülmemektedir.

Gazlı söndürme maddeleri: Gazlı söndürme maddeleri ile yapılan deneylerde CO₂, FM200 ve NOVEC 1230 denemelerinde soğutma etkisi olmadığı için yeniden alevlenme sık görülmüş. Gazlı söndürme maddelerinin yangın söndürme etkisi kapalı muhafazalarda daha iyi performans gösterir. En etkin en etkili likit Nitrojen (N₂) olmuştur çünkü yüksek seviye soğutma etkisi vardır. Lityum-iyon pil (LIB) yangınlarında likit nitrojen kullanımı, yangını soğutmak ve söndürmek için daha etkili bir yöntem olarak kabul edilebilir.

Likit nitrojenin çok düşük sıcaklığı (-196°C), yangını hızla soğutarak termal kaçağı durdurabilir ve yanmayı engelleyebilir. Likit nitrojen, çok düşük bir sıcaklığa sahiptir ve bir yüzeye uygulandığında hızla buharlaşarak büyük miktarda ısı emer. Bu, lityum-iyon pil yangınlarının hızla soğutulmasını sağlar ve yangının kaynağındaki kimyasal reaksiyonları durdurabilir. Bir yangını söndürmek için gerekli likit nitrojen miktarı, yangının büyüklüğüne, yangının ısı yüküne ve çevre koşullarına bağlıdır. Genel olarak, likit nitrojenin buharlaşma ısısı, lityum-iyon pil yangınının ürettiği ısıyı absorbe edecek şekilde hesaplanmalıdır.

Buharlaşma Isısı: Likit nitrojenin buharlaşma ısısı yaklaşık 199 kJ/kg'dır. Bu, likit nitrojenin buharlaşırken çevresinden emdiği enerji miktarını ifade eder.

Örnek Hesaplama: Eğer yangın 5000 kJ enerji üretiyorsa, bu enerjiyi soğutmak için gerekli likit nitrojen miktarı yaklaşık olarak:

$$Ger.Nit.Mik = \frac{5000 \text{ kJ}}{199 \text{ kJ/kg}} = 25,1 \text{ kg} \quad (1.6)$$

Likit nitrojen, yangının olduğu bölgeye dikkatli bir şekilde uygulanmalıdır. Ani soğutma nedeniyle malzemelerde kırılma ve çatlama gibi fiziksel hasarlar oluşabilir. Bu nedenle, likit nitrojenin uygulama şekli ve miktarı dikkatle kontrol edilmelidir.

Aerosol söndürme maddeleri: DNV-GL tarafından yapılan testlerde, aerosolün LIB'nin yangınına hızla söndürebildiği, ancak aerosolün ısı emme ve soğutma yeteneğinin ise suyunkinden çok büyük ölçüde düşük olduğu tespit edilmiştir. Aerosol başlangıç aşamasında bir miktar soğutma sağlar, ancak hücrenin ekzotermik reaksiyonları bozulmaya başlayana kadar pilin sıcaklığını düşürmez. Bu nedenle, yeniden ateşleme sorunu hala en büyük engeldir, çünkü TR hücresi hala kalan yakıtı ateşleyecek ve hatta komşu hücrelerin TR'sini tetikleyecek kadar sıcaktır. Özellikle jet alevi oluştuğunda ve basınçlı gaz çıkışına bağlı olarak, aerosollerin yangına- yangın kaynağına yaklaşması da fiziksel olarak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, aerosol yangın söndürme maddeleri, LIB'lerin yangınına söndürme gerekliliğini tam olarak karşılayamaz.

Su sisi: Su sisi, yangını soğutma ve boğma etkisi gösteren ince su damlacıkları (mist) şeklinde uygulanan bir söndürme yöntemidir. Bu yöntem, suyun soğutma kapasitesini artırırken, suyun elektrik iletkenliğini minimize eder ve su hasarını azaltır. Su sisi, yangının bulunduğu alanın hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlar. Su sisi, yüksek yüzey

alanına sahip küçük damlacıklar olarak uygulandığından, yangının ısını hızla emer ve yangının sıcaklığını düşürür. Su sisi, ince su damlacıklarının buharlaşmasıyla ortamda oksijen yoğunluğunu düşürerek yangını boğabilir. Buharlaşma sırasında su, yangın çevresindeki oksijen miktarını azaltır ve yangının yayılmasını engeller. Su sisi, lityum-iyon pil yangınlarında termal kaçak ve kimyasal reaksiyonları durdurmak için kullanılabilir. Su sisi, yangının doğrudan kontrol altına alınmasına yardımcı olurken, pilin patlama riskini de azaltabilir.

Tüm bunlara rağmen, Su sisi birçok durumda LIB yangınına söndürme ihtiyacını karşılayamaz. Bazı araştırmalarda ve deneylerde su sisinin yangın söndürme ve soğutma performansını daha da artırmak için bazı ıslak kimyasal katkı maddeleri kullanılmışlardır. Su sisi ile karşılaştırıldığında, katkı maddeleri kullanılarak su sisinin iyileştirilmesi, su sisinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine yansır ve böylece etkili bir yangın söndürme performansı ortaya koyar.



Şekil 1.19. Su sisinin tipik söndürme mekanizması.

1.1.4.3. Söndürme maddelerinin performans karşılaştırması

Lityum iyon pil yangınlarının söndürülmesi için kullanılan klasik söndürme maddelerinin performansı ve diğer özelliklerine göre tablolaması aşağıdadır.

Tablo 1.3. Söndürme maddelerinin performans karşılaştırması.

Sistem	Söndürme Kapasitesi	Soğutma Kapasitesi	Yalıtkanlık	Kalıntı Bırakma	Toksisite	Fiyat
Su Sprinkler	Zayıf	Çok İyi	Zayıf	Orta	İyi	Çok Ucuz
Su Enjeksiyon	Çok İyi	Çok İyi	Zayıf	Orta	İyi	Çok Ucuz
Su Sisi	İyi	Çok İyi	İyi	İyi	İyi	Ucuz
Köpük	Zayıf	İyi	Orta	Orta	İyi	Ucuz
Kuru Kimyasal	Zayıf	Zayıf	İyi	Zayıf	Orta	Orta
Co2	Zayıf	Zayıf	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Orta
HFC 227ea	İyi	Orta	Çok İyi	Çok İyi	Orta	Pahalı
C6h12o	İyi	Orta	Çok İyi	Çok İyi	Orta	Pahalı
N2 Likit	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Orta
Aerosol	Zayıf	Zayıf	İyi	İyi	Çok İyi	Pahalı

Sonuç olarak, lityum iyon pil yangınlarının algılanması ve söndürülmesi, uygun algılama sistemleri ve etkili söndürücü maddelerin kullanımı ile sağlanabilir. Erken algılama ve doğru söndürücü maddelerin seçimi, yangının kontrol altına alınmasında ve yangının yayılmasının önlenmesi için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Günümüzde yeni gelişen teknolojilerle birlikte, lityum iyon pil yangınlarına karşı daha etkili çözümler geliştirilmektedir. Klasik söndürme maddeleri ve yöntemleri ile lityum iyon pil yangınlarının söndürülme oldukça zordur. En etkili kullanılabilecek yöntemlerden biri suya karıştırılmış özel söndürme ıslak kimyasal maddeleri ile su sisi söndürme yöntemi ile müdahale etmek olarak görülebilir.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Lityum iyon piller, yapıları gereği yüksek enerji yoğunlukları ve kimyasal yapıları nedeniyle yangın riski taşıyan önemli enerji depolama cihazlarıdır. Bu pillerin yangınları, özel yangın söndürme maddeleri gerektirir. Klasik söndürme maddeleri ile yapılan deneylerde çok fazla başarı sağlanamamıştır. NFPA 18A'nın 2022 baskısında, yanıcı sıvı ve lityum pil yangınlarına karşı Encapsulated Agent (Kapsülleme Ajanı) tanımlamaları ve önemine değinilmiştir, bu çerçevede F-500 güçlü bir söndürücü ıslak kimyasal ve bu tür yangınların söndürülmesinde etkili bir madde olarak öne çıkmaktadır.

2.2. Yöntem

Lityum İyon pillerin yangın testleri NTA 8133 yangın test parametreleri kapsamında yapılmaktadır, lityum iyon bataryaların termal bozunum, yanma, patlama ve yangına dayanıklılığı bu testler ile değerlendirilir.

NTA 8133 standardı kapsamında uygulanan yangın test parametreleri şunlardır;

Termal Bozunum Tetikleme Testleri: Termal bozunumun tetiklenmesiyle bataryanın güvenlik performansını ölçmek için yapılır

Tetikleme Yöntemi: Aşırı ısı, aşırı şarj, kısa devre veya mekanik darbe ile termal bozunum başlatılır.

Sıcaklık Aralığı: Hücre veya batarya paketinin ısıtılması genellikle 80°C - 200°C aralığında yapılır.

Zincirleme Reaksiyon: Termal bozunumun komşu hücrelere veya modüllere yayılma oranı gözlemlenir.

Alev ve Yanma Davranışı Testleri: Bataryanın alev alması durumunda yanma karakteristiklerini ve yanıcı gaz çıkışını değerlendirmek amacı ile yapılır.

Alev Çıkışı: Jet alevi (basınçla çıkan gazın alevlenmesi) oluşumu ve süresi.

Yanma Süresi: Alevlenme başladığı andan söndürmeye kadar geçen süre.

Alev Sıcaklığı: Yanma sırasında oluşan alev sıcaklıkları (1000°C üzeri değerlere ulaşabilir).

Gaz Çıkışı: Karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), hidrojen (H₂), hidrojen florür (HF) ve diğer yanıcı gazların miktarı (ppm cinsinden ölçüm).

Harici Yangın Maruziyeti Testleri: Batarya paketinin harici bir yangına dayanıklılığını ölçer.

Yangına Maruz Kalma Süresi: Batarya, harici bir yangına genellikle 10-20 dakika boyunca maruz bırakılır.

Alev Şiddeti: 800°C ila 1000°C arası bir sıcaklıkta sabit bir alev.

Kalıntı Analizi: Yangın sonrası batarya yapısındaki hasar incelenir.

Patlama Riski ve Gaz Basıncı Testleri: Bataryanın gaz basıncını ve patlama potansiyelini değerlendirmek amacı ile yapılır.

Gaz Çıkışı Hızı: Hücre içindeki gazların dışarı çıkma hızı ölçülür.

Basınç Ölçümü: Batarya içinde biriken gaz basıncı (ör. 1-3 bar üzeri değerlere ulaşabilir).

Patlama Olasılığı: Güvenlik valfi çalışmazsa patlama riski değerlendirilir.

Yangın Söndürme Performans Testleri: Farklı söndürme ajanlarının batarya yangınlarında etkinliğini değerlendirmek için yapılır.

Söndürme Ajanı Tipi: Su, aerosol, gaz bazlı söndürme ajanları (ör. F500 EA veya FM-200).

Söndürme Süresi: Yangının kontrol altına alınma süresi.

Söndürücü Penetrasyonu: Söndürücü maddenin batarya paketine nüfuz edebilme yeteneği.

Yangın Yeniden Başlama Riski: Söndürme sonrası termal bozunumun tekrar başlama olasılığı.

Isı Yayılımı ve Hücreler Arası Bulaşma (Propagation): Termal bozunumun komşu hücrelere yayılma hızını ölçme amaçlıdır.

Hücreden Hücreye Yayılma Süresi: İlk hücrede başlayan termal bozunumun komşu hücreye ulaşma süresi.

Modül Seviyesi Etki: Bir hücredeki termal bozunumun tüm modülü etkileyip etkilemediği.

Soğutma Sistemlerinin Etkinliği: Aktif veya pasif soğutma mekanizmalarının yayılmayı önleme performansı.

Yangın Alanı Güvenliği: Amaç bataryanın kurulu olduğu ortamda yangının yayılmasını ve çevresel güvenlik risklerini değerlendirmektir

Yangın İzolasyonu: BESS odalarında veya araç batarya paketlerinde yangının sınırlandırılabilmesi.

Sistem Duyarlılığı: LIB yangınını otomatik algılama ve söndürme sistemlerinin etkinliği.

Oda Toksisite Analizi: Yangın sırasında ortamda oluşan toksik gaz miktarı.

Test Sürecinde Kullanılan Ekipman ve Yöntemler şunlardır;

Termal Kamera: Sıcaklık değişimlerini gerçek zamanlı takip etmek için.

Gaz Analiz Cihazları: Yanıcı gazların türünü ve miktarını ölçmek için.

Basınç Sensörleri: Batarya içindeki gaz basıncını ölçmek için.

Söndürme Sistemleri: Söndürme ajanlarının etkinliğini test etmek için.

2.2.1. Seçilen DOE yöntemi

Termal Bozunum (Termal Runaway) ve Yangın Oluşum Yöntemleri

Yöntem Türü: Elektriksel kısa devre, mekanik darbe, ısı uygulama.

Uygulama Süresi (s): Termal Bozunum (Termal runaway)'e sebep olan işlemin ne kadar süreyle uygulandığı.

Pil Türleri

Pil Kimyası: LFP, NMC, NCA, LCO gibi.

Pil Kapasitesi: mAh veya Ah cinsinden (örneğin, 2 Ah, 5 Ah).

Pil Boyutu: 18650, 21700, prizmatik gibi.

Yangın ve Söndürme Parametreleri

Söndürme Süresi (s): F500 EA'nın yangını kontrol altına alma süresi.

Söndürücü Konsantrasyonu: F500 EA'nın suyla karışım oranı (%3, %6).

Gaz Çıkışı (ppm): CO, CO₂, H₂ gibi gazların çıkış miktarları.

Sıcaklık Değişimi (°C): Yanma öncesi ve sonrası pilin yüzey sıcaklıkları.

Söndürme Sonrası Sıcaklık (°C): Soğutma etkinliğini ölçmek için.

Çevresel Faktörler

Başlangıç Ortam Sıcaklığı (°C): Deneyin yapıldığı çevrenin sıcaklığı.

Havalandırma Durumu: Kapalı veya açık ortam.

Nem (%): Ortamın bağıl nem düzeyi.

Güvenlik ve Performans Analizi

Thermal Runaway Hızı: Termal runaway'ın başlama ve maksimum sıcaklığa ulaşma süresi.

Yanma Yayılma Hızı: Yangının başka hücrelere veya bölgelere sıçrama zamanı.

Kalıntı Analizi: Söndürme sonrası kalan pil durumu.

2.2.2. Kullanılan araç gereçler

Deneyler sırasında aşağıdaki ekipmana ve malzemeler kullanılmıştır.

LFPO4 Lityum ion piller

Islak kimyasal yangın Söndürücü (F-500 EA)

Taşınabilir YSC

Otomatik Yangın söndürme düzeneği

Termal kamera

2.2.3. Kullanılan ıslak kimyasal katkı maddesi

F-500, çok amaçlı bir yangın söndürme ajanıdır ve özellikle enerji depolama cihazları, petrol ve kimyasal yangınlar gibi zorlu yangın koşullarında etkili olması için geliştirilmiştir. F-500, mikrokapsülleme teknolojisi kullanarak yangınların hızlı ve etkili bir şekilde söndürülmesini sağlar. Bu ajan, yangının enerjisini emerek ve soğutma etkisi sağlayarak yangının yayılmasını engeller. F-500, lityum iyon pil yangınlarını söndürmede birkaç önemli avantaja sahiptir. Bunlar;

Hızlı Soğutma: F-500, yangın sırasında açığa çıkan ısıyı hızla emerek yangının sıcaklığını düşürür. Bu, termal kaçağın yayılmasını ve pilin diğer hücrelerine sıçramasını önler.

Mikrokapsülleme: F-500, yangının yüzeyini kaplayarak oksijenin yangına ulaşmasını engeller. Bu, yangının hızla boğulmasına ve yayılmasının durdurulmasına yardımcı olur.

Duman ve Zehirli Gazların Azaltılması: F-500, yangın esnasında açığa çıkan duman ve zehirli gazların miktarını azaltır, bu da yangınla mücadele eden kişiler için daha güvenli bir ortam sağlar.

Yeniden Ateşlenmeyi Önleme: F-500, yangının söndürüldükten sonra yeniden ateşlenmesini önler, bu da yangın sonrası güvenliği artırır.

F-500'ün lityum iyon pil yangınlarında kullanımı, özel ekipman ve teknik gerektirebilir. Ancak, bu madde, geleneksel yangın söndürme maddelerine kıyasla bazı üstünlükler sunar:

Etkililik: F-500, lityum iyon pil yangınlarını hızlı ve etkili bir şekilde söndürebilir. Bu, yangının kontrol altına alınma süresini kısaltır ve yangının yayılmasını engeller.

Güvenlik: F-500, yangın sırasında açığa çıkan zararlı maddelerin miktarını azaltarak yangınla mücadele eden kişiler için daha güvenli bir çalışma ortamı sağlar.

Çevresel Etki: F-500, çevreye daha az zarar verdiği sertifikalanmış bir yangın söndürme maddesidir. Geleneksel kimyasallara kıyasla daha az kalıntı bırakır ve çevreye daha az zararlı bileşenler içerir. Aşağıdaki tablo, F-500'ün lityum iyon pil yangınlarında diğer yaygın yangın söndürme maddelerine göre performansını özetlemektedir;

Tablo 2.1. F-500'ün lityum iyon pil yangınlarında diğer yaygın yangın söndürme maddelerine göre performansı

Söndürme Maddesi	Etkililik	Güvenlik	Çevresel Etki
F-500	Yüksek	Yüksek	Düşük
Su	Düşük	Orta	Orta
Kuru Kimyasal	Orta	Düşük	Yüksek
Gazlar	Orta	Orta	Düşük
Söndürme Maddesi	Etkililik	Güvenlik	Çevresel Etki

Sonuç olarak, F-500, lityum iyon pil yangınlarının söndürülmesinde etkili ve güvenli bir çözümdür. Hızlı soğutma, mikrokapsülleme ve ayrıca yine çevreye verdiği düşük zararlı etki gibi avantajları sayesinde, F-500, lityum iyon pil yangınlarına karşı mücadelede tercih edilen bir yangın söndürme maddesi olarak öne çıkmaktadır. Mikrokapsül teknolojisi, Lityum iyon pillerin termal yönetimi için faz değiştirme malzemelerinde yaygın olarak kullanılan faz değiştirme malzemeleri türleri için daha fazla olasılık sağlar. Bununla birlikte mikrokapsül teknolojisi aynı zamanda yangın söndürme stratejisi için yeni bir yön de sağlar. Mikrokapsüller elektrolitte mükemmel karışabilirliğe ve makul elektrokimyasal performansa sahiptir. Bilimadamları çeşitli lityum iyon piller için yangın söndürme ajanlarını analiz eden bir çalışma yaparak, F-500'ün belirli koşullarda etkinliğini vurgulamıştır. F-500'ün yangın şiddetini azaltabildiğini, ancak performansının yangının doğasına ve pilin yapılandırmasına bağlı olarak değiştiğini bulmuşlardır. F-500'ün alevleri bastırıp yeniden yanma riskini azaltabileceğini, ancak etkinliğinin yangının belirli koşulları, örneğin dahili kısa devrenin varlığı gibi, tarafından etkilendiğini göstermiştir. F-500'ün su buğusu ile kombinasyonunun soğutma oranlarını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve tepe sıcaklıkları azalttığını göstermiştir, bu da geliştirilmiş yangın söndürme stratejileri için potansiyel olduğunu öne sürmektedir. Yapılan deneyler F-500'ün toksik gaz emisyonlarını azaltmada ve yangın yayılımını kontrol etmede kullanımını desteklemiştir.

2.2.4. Su sisi söndürme sistemi temel tasarım özellikleri

Su sisi püskürtme dinamiğini, performansını ve yangın söndürme davranışını tam olarak anlamak için aşağıdaki parametreler karakterize edilmelidir:

Su Sisi Yoğunluğu

Nozul özellikleri

Damlacık boyutu dağılımı (DSD)

Püskürtme konisi açısı

Püskürtme hızı

Kütle akış hızı

Püskürtme momentumu.

Su sisi özellikleri de bir yangının varlığından etkilenecektir ancak ilk olarak yangının olmadığı bir ortamda tanımlanmıştır.

2.2.5. Su sisi yoğunluğu

Su sisi yoğunluğu, yangının soğutulması ve söndürülmesi için gerekli su miktarını belirler. Yoğunluk genellikle litre/saniye veya litre/dakika cinsinden ifade edilir.

$$Su\ Sisi\ Yog = \frac{V}{A \times t} \quad (2.1)$$

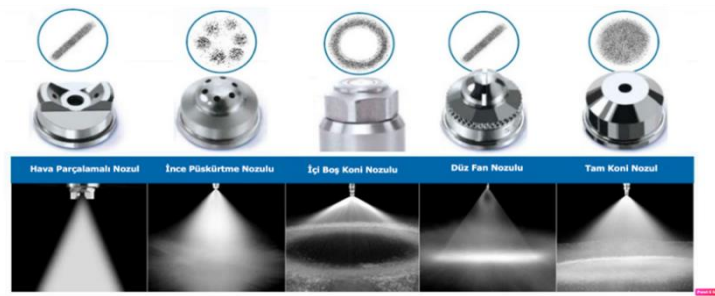
Eğer 10 m²'lik bir alanı kaplamak için 500 litre su kullanılması planlanıyorsa ve su sisi 5 dakika (300 saniye) boyunca uygulanacaksa:

$$Su\ Sisi\ Yog = \frac{500}{10 \times 300} = 0,167\ L/s/m \quad (2.2)$$

Yangının büyüklüğüne ve yangının yayılma hızına bağlı olarak su miktarı hesaplanmalıdır. Su sisi sistemlerinde suyun verimli kullanımı sağlandığından, geleneksel su söndürme yöntemlerine kıyasla daha az su kullanılır. Su sisi uygulama miktarı, yangın bölgesinin soğutulması ve yangının söndürülmesi için yeterli olmalıdır.

2.2.5.1. Nozul özellikleri

Püskürtmenin yapısı esas olarak püskürtme basıncı gibi memenin tipine ve çalışma koşullarına göre belirlenir. Nozullar temel olarak iki kategoriye ayrılabilir: tek delikli ve çok delikli nozullar. Püskürtme düzeni dikkate alındığında nozullar tam koni, içi boş koni veya düz sprej olarak sınıflandırılabilir. Su sisi sistemlerinde uygulamaya göre farklı desenler üretebilen tek ve çok delikli nozullar gibi çok çeşitli tipte nozullar kullanılmaktadır.

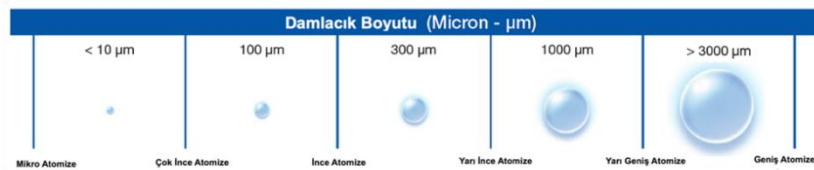


Şekil 2.1. Nozul tipleri.

2.2.5.2. Damlacık boyutu dağılımı

Damlacık Boyutu Dağılımı (DSD), bir sis sprejinde sunulan damlacık boyutları aralığını ifade eder. Buharlaşma hızını, püskürtme dinamiğini, gazların sürüklenmesini ve yangın dumanının kaldırma kuvvetine göre püskürtme momentumunu etkiler. Genel olarak, bir sprejdeki damlaların boyutu, kütle ortalama çapı (MMD) veya

hacimsel ortalama ap (VMD) gibi tek bir damlacık boyutu parametresi ile tanımlanır. VMD (DV 0,5) olarak ifade edilen VMD, spreycin hacminin %50'sinin daha küçük parçacıklar içerdiği ve hacmin diğercin %50'sinin ortalamadan daha büyük parçacıklar içerdiği orta nokta damlacık boyutunu belirtir. Damlacık boyutunun en yaygın ölçüsü, alanın tamamıyla aynı hacim/yüzey alanına sahip ortalama çap olan sauter ortalama çapıdır (SMD). Aynı VMD veya SMD'ye sahip iki spreycin mutlaka aynı olması gerekmediğinden, tek bir parametrenin damla boyutu dağılımını tam olarak belirleyemeyeceğı belirtilmelidir. Bunu göstermek için, NFPA 750 su sisindeki kütle, hacim ve damla boyutlarının dağılımını belirtmek için kümülatif hacim yüzdesine karşı çap eğrisini kullanmıştır. 300 µm'den küçük SMD'lere sahip su sislerinin difüzyon alevlerini önemli ölçüde soğutabildiğı ve söndürebildiğı rapor edilmiştir. Su sisi söndürme sistemi'nin etkinliğı üretilen parçacık boyutlarının aralığına bağılıdır. Daha küçük damlacıklar teknik olarak daha büyük yüzey alanları oluşturur ve buharlaşma oranını ve soğutma etkisini iyileştirir, bu da yangını söndürmek için gereken su miktarını daha da azaltarak su sisi söndürme sistemi'nin verimliliğini artırır. Buna karşılık, daha büyük boyuttaki damlacıklar küçük damlacıklara göre daha yüksek momentuma sahiptir , bu damlacıkların bir yangın bulutu oluşturmalarına , duman katmanına , dolayısıyla da ıslak ve soğuk yanan malzemelere özellikle sıcak gazlara girme kabiliyetinin daha efektif- yüksek olmasını sağlar. Bu nedenle, daha büyük damlacıklara sahip bir spreycin, engellenmemiş bir yangının söndürülmesinde daha ince damlacıklara karşı daha etkili olabilirken, daha ince damlacıklara sahip bir spreycin, engellenmiş bir yangının söndürülmesinde daha büyük damlacıklar üzerinde daha etkili olabilir.

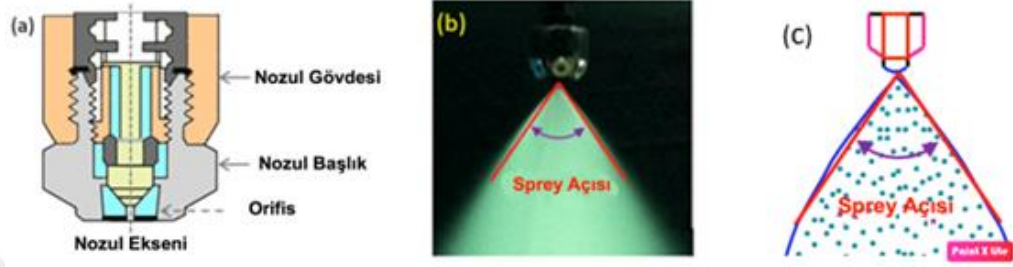


Şekil 2.2. Damlacık boyutu.

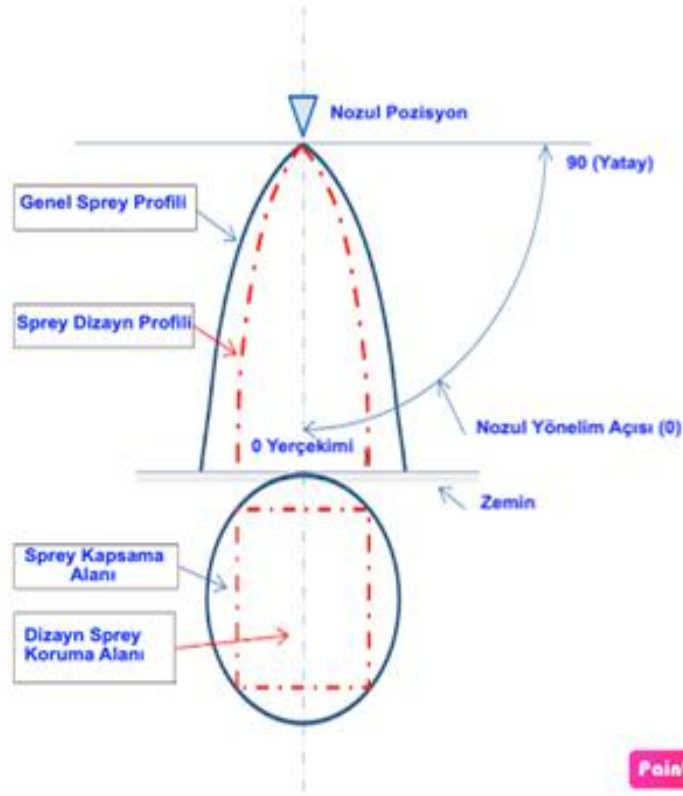
2.2.5.3. Nozul püskürtme koni açısı

Su sisi söndürme sistemlerinde genellikle katı koni nozullar ve 90° veya 120° püskürtme konileri (merkezi, düz ekseni çevreleyen) kullanılır. Diğercin koni açıları da mümkündür ancak yangın söndürme sistemleri için ticari olarak mevcut değildir. Katı konik bir nozul, gazların sürüklenmesiyle nozulün aşağısında daha fazla seyreltilen

tam koni bir sprej oluşturur. Su kütlesinin çoğu, sprejin merkez ekseninin yakınında bulunurken, dış sprej bölgeleri daha az sıvı kütlesi ve daha fazla su buharı içerir. Damlacık hızları da püskürtme eksenine yakın bölgede çok daha yüksek olup, sürüklenen gazlarla etkileşime bağlı olarak radyal yönde azalmaktadır. Daha küçük püskürtme konisi açıları, daha yüksek damlacık çarpışma olasılığıyla daha yoğun bir püskürtmeye yol açar.



Şekil 2.3. Nozul sprej açısı.



Şekil 2.4. Nozul kapsama alanı.

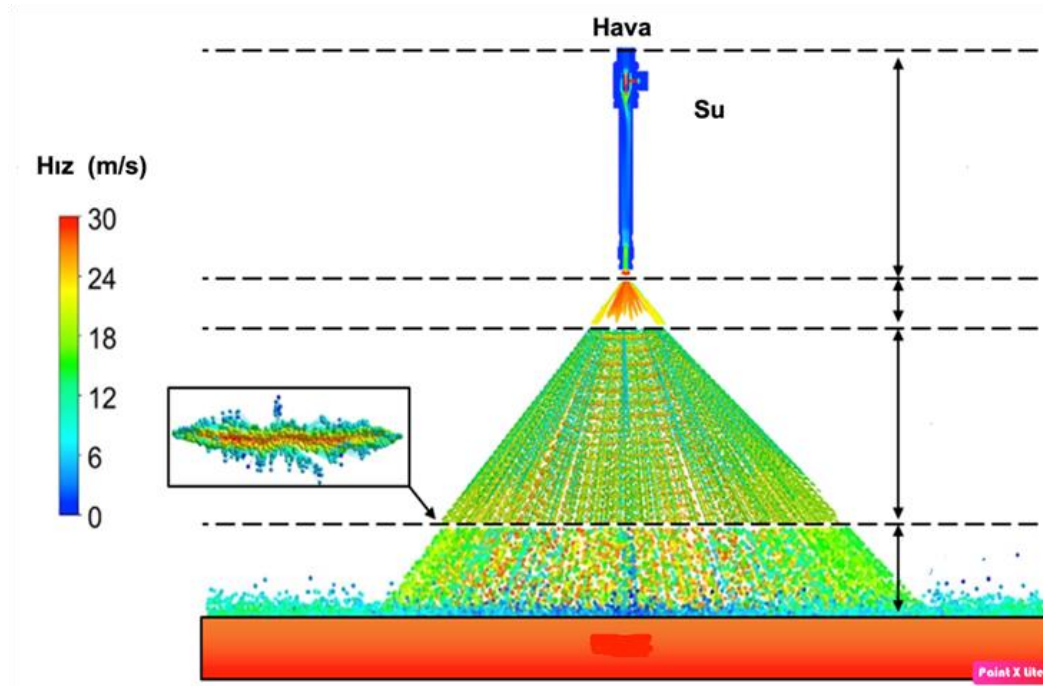
2.2.5.4. Nozul püskürtme hızı

Püskürtme hızının büyüklüğü, suyun küçük damlacıklar halinde püskürtülmesi veya parçalanması sürecini belirler, su sisinin etki yönü ise püskürtme konisinin şeklini belirler. Her bir damlacığın hızı, hava sürüklenmesini çoğaltan ve püskürtme konisinin

kütle akışını çoğaltan sürüklenme etkisi ile çevredeki havaya aktarılır. Püskürtme kütle akışı ve hızı su spreynin bir yangın alanı ve yangın duman katmanı üzerindeki toplam etkisini belirleyen sprej momentumunu belirler.

2.2.5.5. Nozul kütle akış hızı

Püskürtmenin kütle akış (boşaltma) hızı, enjeksiyon basıncına ve meme deliğinin toplam alanına bağlıdır. Bir nozul tasarlamak için gerekli kütle akış hızı, sprejden çıkan suyun ısı emme oranı veya gerekli söndürme ortamı alanı değerleri kullanılarak hesaplanabilir.

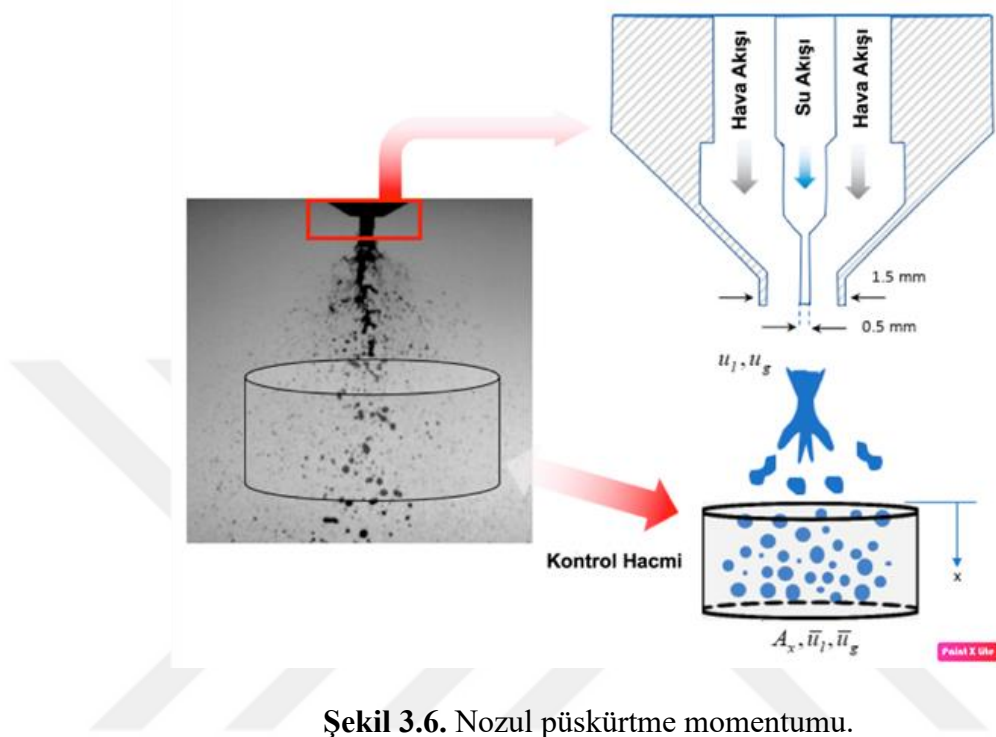


Şekil 2.5. Nozul kütle akış hızı.

2.2.5.6. Nozul püskürtme momentumu

Püskürtme momentumu, su damlacıklarının kütlesi ile sürüklenen havanın kütlesinin toplamının damlacıkların ve sürüklenen havanın hızıyla çarpılmasıyla hesaplanır. Sabit bir kütleli boşaltma oranı için, püskürtme hızındaki bir artış aynı zamanda hava sürüklenme oranını da artırır, bu da daha sonra püskürtme momentumunu artırır. Püskürtme momentumunun yönü yangın söndürmede ciddi bir rol oynar , bu rol yangın dumanının üzerine yapılan bir enjeksiyon su buharının yangın merkezine ulaşması ve su sisinin nüfuz etmesi buna bağlıdır. Yangın alanına eş yönlü akışlarla yapılan bir su sisi uygulaması, gerekli soğutmayı dağılayacak bir karışımını oluşturamayabilir. Su sisi ile üretilen su buharı, yanan yüzeyin altına doğru

sürüklenmek yerine yanan yüzeyden uzaklaşabilir. Hangi nozul türünün kullanılacağını, yüksek veya düşük hızlı su sisi nozullarından hangisinin kullanılacağını belirlerken püskürtme hızlarının büyüklüğüne ek olarak momentumun yönsele bileşeni de hesaba katılmalıdır.



Şekil 3.6. Nozul püskürtme momentumu.

2.2.6. Su sisi sisteminin söndürme mekanizmaları

Kapalı bir bölmedeki su sisi söndürme sistemi ile ilişkili beş mekanizma vardır;

Gaz fazında soğutma;

Oksijenin tükenmesi ve yanıcı buharın seyrelmesi;

Yakıt yüzeyinin ıslatılması ve soğutulması;

Radyasyonun zayıflatılması;

Kinetik etkiler, çevreleme etkileri, türbülanslı karıştırma ve döngü.

Genel olarak kapalı alanlardaki lityum pil yangınlarının söndürülmesi sırasında tüm mekanizmalar bir ölçüde gerçekleşir.

2.2.6.1. Gaz fazında soğutma

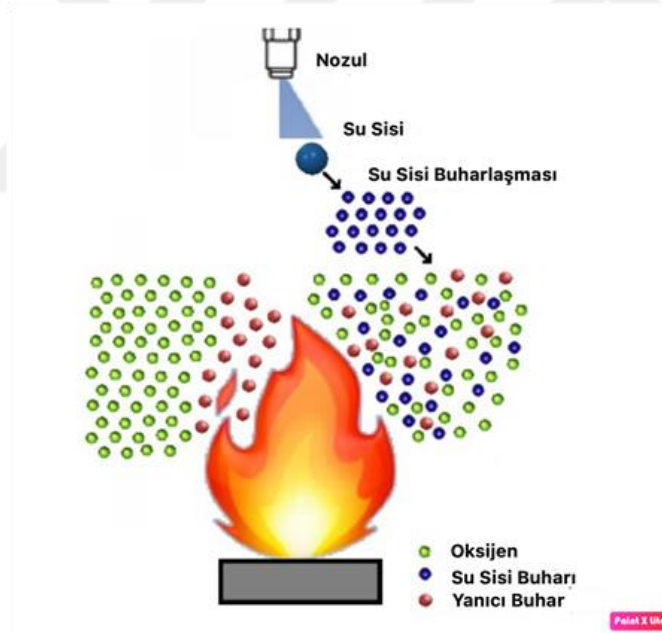
Su sisi çok ince damlacıklardan oluşur, ince damlacıklar oluşturmak ise damlacıkların yüzey alanı/hacim oranını arttırarak, alevlerden, sıcak yanma gazlarından, duman katmanından ve sıcak yüzeylerden ısının hızlıca emilmesiyle buharlaşma oranını

artırır. Gaz fazında soğutma işleminde yanma bölgesindeki ısı su sisi damlacıklarının buharlaşmasıyla emilir bu da alevlerin sıcaklığının düşmesine neden olur. Bu işlemler sonucunda sıcaklık, yanmayı sürdürmek için gereken sıcaklığın altına düşerse alevler de söner. Soğutma işlemi aynı zamanda yakıt yüzeyine gelen alev ışınlamını (radyasyon lile ısı yayılımı) da azaltarak yakıtın piroliz olma oranını azaltır.

2.2.6.2. Oksijenin tükenmesi ve yanıcı buharın seyrelmesi

Su sisi söndürme sisteminin çalışması ile su damlacıkları buharlaşır ve su buharının kapladığı toplam hacim üç kattan fazla artar. Su hacminin genişlemesi, alevin içine hava girişinin sürekliliğinin engellenmesine ve alevin etrafındaki oksijenin ve yanıcı buhar konsantrasyonunun seyrelmesine neden olur.

Oksijen konsantrasyonu, (a) yanma reaksiyonu nedeniyle tükenir, (b) su buharı nedeniyle yer değiştirerek seyrelir ve (c) yanma sonucu ortaya çıkan ürünler nedeniyle azaltılır.



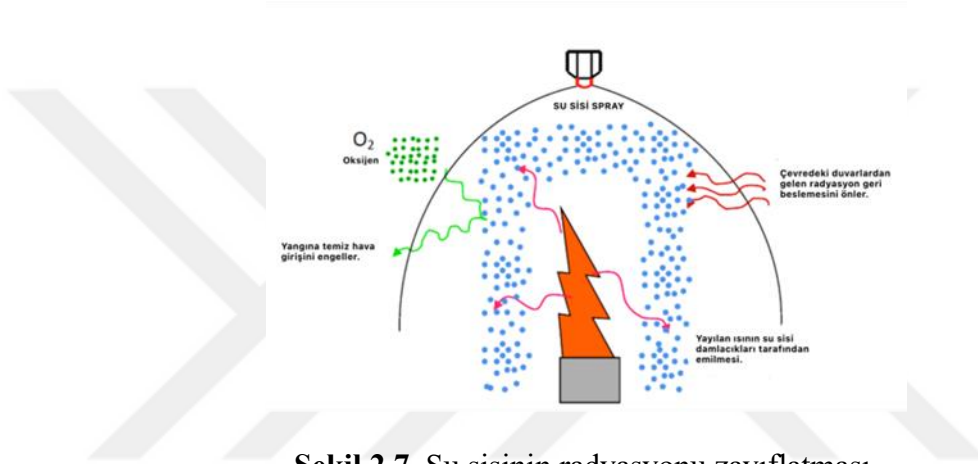
Şekil 2.6. Su sisinin yanıcı buhar seyreltmesi.

2.2.6.3. Yakıt yüzeyinin soğutulması

Genel olarak birçok katı ve sıvı yakıt için özellikle katı yanıcı maddeler için ana söndürme mekanizması, yakıt yüzeyinin su (köpük vb.) ile ıslanması ve soğumasıdır. Su sisinin yanma bölgesine ulaşan parçacıkları yanma yüzeyinde bir tabaka oluşturarak soğutma sağlar. Bu soğutma işlemi aynı zamanda yakıtın piroliz olma oranındaki azalmayı da gerçekleştirir.

2.2.6.4. Radyasyonun zayıflatılması

Yakıt ile alev arasında su buharının bulunması nedeniyle radyasyon zayıflaması meydana gelir. Su buharı radyant enerjiyi emer ve yakıt yüzeyine daha düşük bir yoğunlukta yeniden yayılır. Yapılan bir çalışmada bildirildiği gibi, bir bölme içinde taşınan su damlacıkları aynı zamanda ısıyı emer ve duvarlara gelen ve duvarlardan gelen radyasyonu azaltır. Burada bir muhafaza içindeki duvarlara olan radyant ısı akısı bir su sisi söndürme sistemi kullanılarak %70 oranında azaltılabilir. Daha küçük damlacıkların, daha büyük sprey damlacıklarıyla karşılaştırıldığında daha düşük su konsantrasyonunda termal radyasyonu zayıflatabildiği bulunmuştur.



Şekil 2.7. Su sisinin radyasyonu zayıflatması.

2.2.6.5. Kinetik etkiler, çevreleme etkileri, türbülanslı karıştırma

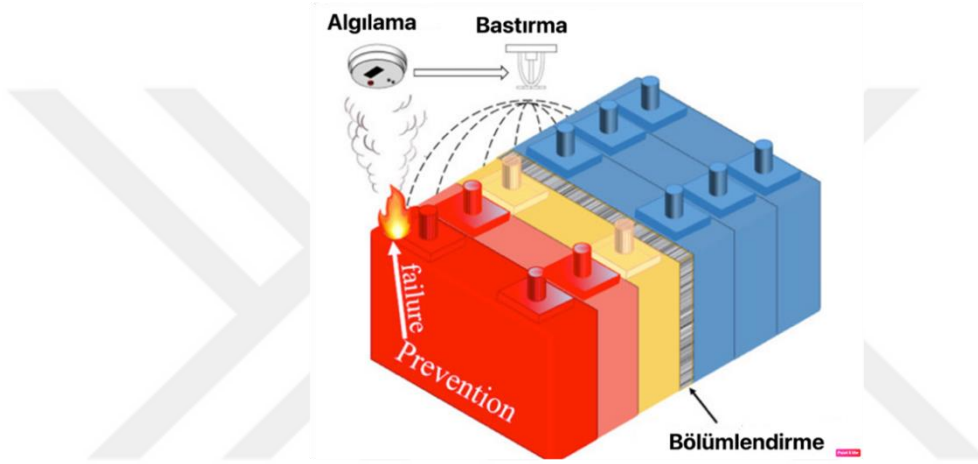
Türbülanslı Karıştırma ve Döngü Kinetiği, çevresel değişkenlerin kimyasal reaksiyon hızları ve ara reaksiyon bileşiklerinin oluşumu üzerindeki etkilerini ifade eder. Su sisi, alevi yoğunlaştırabilecek veya söndürebilecek kinetiği değiştirebilir. Alev yüzeyindeki buharlaşmanın türbülansı ve sürüklenmeyi arttırması nedeniyle su sisi ile ilk temasta alev yoğunlaşabilir. Bu, yakıt/hava karışımını artırarak yanma oranının artmasına ve yangının alevlenmesine neden olabilir. Alternatif olarak kinetik etkiler, gaz fazının soğuması ve oksijen tükenmesi/seyreilmesi nedeniyle yangının bastırılmasına yol açabilir. Su sisi ve sürüklenen ve bozulmuş gazlar, yanıcı gazları seyreltir ve alevle soğutmayla birleştirildiğinde, yanma hızını stokiyometrik durumundan değiştirerek alevi söndürebilir. Kapalı alanlarda oksijen tükenmesi ve seyrelişmesinin etkileri yoğunlaşıyor. Su sisi başlatıldığında kapalı bir bölmenin üst katmanında sıkışan sıcak gazlar hızla soğutulur. Genişleyen su buharının momentumu, su buharı ve gaz karışımını yangına doğru taşıyarak, lokal oksijen tükenmesine yol

2.2.6.6. Su sisi yangın söndürme stratejisi

Su sisi söndürme sisteminin performansı öncelikle nozullar tarafından üretilen sprelerin özelliklerine göre belirlenir Tek ve çok delikli gibi farklı tipte nozullar, sprelerin kütle dağılımını önemli ölçüde değiştirebilir. Tek delikli nozül, çok delikli nozulla karşılaştırıldığında nispeten daha büyük damlacıklar, daha uzun penetrasyon uzunluğu ve nozülün altındaki bölgede daha yüksek konsantrasyon üretir.

62

potansiyel yangın ile belirlendiği birden fazla nozuldan oluşur. Nozulun konumu söndürme sisteminin performansını etkileyebilir. Bir nozulun doğrudan bir yangının üzerine yerleştirilmesi durumunda, spreyn su damlacıkları yangına ulaşmak için en az mesafeyi kat edecek ve yangını söndürmede daha iyi performans gösterebilecektir. Buna karşılık, birden fazla nozulun kurulumu sistem için daha yüksek bir maliyet meydana getirir, ancak birden fazla nozul, sisi daha düzgün bir şekilde dağıtarak ve oksijen tükenme sürecini artırarak daha iyi yangını bastırma / söndürme performansı gösterebilir. Ancak aynı anda birden fazla nozulun etkinleştirilmesi, su kaynağının basıncında bir düşüşe de neden olabilir ve bu su spreynin performansını da azaltabilir.



Şekil 2.9. Yangını söndürme stratejisi.

2.2.7. Taşınabilir YSC

Taşınabilir YSC'ler başlangıç yangınlarına ilk müdahalede çok önemlidir. Yangın daha başlangıç aşamasında tespit ederseniz ve doğru tip yangın söndürücü ile müdahale ederseniz yangın daha büyümeden söndürebilirsiniz ya da yangını yavaşlatır sizden sonra gelecek müdahale ekibine zaman tanırırsınız. Kullanacak olan cihazların test ve sertifikalandırılmış olması önemlidir. Test ve sertifikalandırması olmayan cihazların söndürme yetenekleri ve kapasiteleri belirsiz olduğu için bu tür cihazların kullanılması tavsiye edilmez. Lityum ion pil yangınlarını söndürme yeteneğine sahip olan yangın söndürme cihazlarının testleri için dünyada geliştirilmiş sadece bir test yöntemi bulunmaktadır. KIWA ve Hollanda Kraliyet Standardizasyon Enstitüsü lityum iyon pil yangınları için taşınabilir yangın söndürücülerin uygunluğunu test etmek üzere teknik bir kılavuz oluşturmuştur. NTA 8133 (Nederlandse Technische Afspraak) kılavuzu, 600 Wh'ye kadar orta kapasiteli lityum iyon pil yangınlarının test edilmesi için yazılmış ve kabul edilmiş ilk yayındır. 600 Wh kapasite şarj edilebilir

piller, akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, elektrikli aletler, ev aletleri, taşınabilir tıbbi ekipmanlar, oyuncaklar, radyo kontrollü nesneler, dronlar ve e bisikletler gibi elde taşınan elektroniklerde bulunan pillerdir.

Taşınabilir YSC ve tekerlekli YSC'ler aşağıdaki şekilde üretilirler; Portatif söndürücüler olarak 6 kg, 9 kg ,12 kg ve 50 kg su esaslı Endotermik Reaksiyonlu yangın söndürme cihazları olarak üretilir. 50 kg söndürücüler tekerlekli taşınabildir. Su esaslı *endotermik sıvılı* yangın söndürme cihazları CE standartlarına uygun olarak yangın söndürme maddesi endotermik sıvı bazlı söndürücü, NFPA 18 veya TS EN 1568-3 standartlarına uygundur. Söndürücülerin çalışma düzeni içten basınçlı olmalı, tetik üzerinde emniyet sigortalı ve basıncı gösteren manometresi vardır. Yangın söndürme cihazlarının A, B, C, F (E sınıfı elektrik yangınları da C sınıfı içinde kabul edilecektir.) sınıfı yangınlarda kullanıma uygundur. Yangın söndürme cihazların da kullanılan etken yangın söndürme maddesi en az 12 saat yangını yeniden alevlendirmeyecek türdendir. Üzerinde elektrik akımı geçen yerlerde bulunan cihazlarda minimum 1 metre mesafeden kullanıldığında 35000 volta kadar elektriği iletmeyecek özelliktedir. Yangın söndürme cihazında kullanılan etken yangın söndürme sıvısı İnsan sağlığına zararı yoktur. Yangın söndürme cihazı, içindeki su esaslı endotermik 15-20 bar arasında atmosfer basınçla dışarı püskürtebilir ve püskürtme uzaklığı 2 metreden az değildir. Kullanılan endotermik söndürme sıvısı UL onaylı olacaktır. UL Class A & B listed (2N75) ve Class D & K yangın söndürebilir, Class B foam listed (UL 711) ve Class B foam listed (UL 711) sertifikasyonlarına uygun olacaktır. Kullanılan endotermik sıvı Class A, Class B ve Class D ve Class K yangınları söndürme özelliğine sahip olacaktır. Kullanılan endotermik söndürme sıvısı EPA – SNAP listed – Doğaya Zararlı olmayan yangın söndürücü listesinde yer alır. Kullanılan endotermik söndürme sıvısı Tehlikeli Maddeler Tanımlama Sistemi (HMIS) 0,0,0 derecelendirmesi insan sağlığına zarar vermemelidir- suyla aynı olmalıdır. Endotermik söndürme maddesi %100 biyolojik olarak parçalanabilir, korozyif değildir ve toksik değildir, bu nedenle temizleme gerektirmez ve kullanımdan sonra ekipmanınızın yıkanması gerekmez özelliklerine sahiptir. Endotermik söndürme maddesi Hidrokarbon dumanının yoğunluğunu azaltır, görünürlüğü artırır ve daha kolay solunum sağlar özelliklere sahiptir.

6 LT lik YSC < 2.280 Wh

9 LT lik YSC < 3.420 Wh

50 LT lik YSC < 19.000 Wh



Şekil 2.10. Taşınabilir yangın söndürme cihaz.

NTA 8133 Test prosedürü

Her biri 100 Wh olan 6 tam şarjlı lityum kese hücresinden oluşan bir pakette, üçüncü hücre aşırı şarj yoluyla termal bir kaçak durumuna getirilir.

Aşırı şarjın başlaması ile yangının başlaması arasındaki süre 7 ila 9 dakika arasındadır.

İlk alevler ortaya çıkar çıkmaz söndürme çalışmaları başlayacaktır.

Yangın 3 dakika içinde söndürülmelidir.

Yangın söndürüldükten sonraki 20 dakika boyunca yeniden tutuşma meydana gelmemelidir.

20 dakikadan sonra en az 1 kese hücresi kurtarılmalı ve çalışır durumda olmalıdır.

3 denemeden 2'si başarılı olduğunda test başarılı olmuştur demektir.

2.2.8. Otomatik algılama söndürme sistemi

2.2.8.1. Yangını algılama

Genel olarak, yangın söndürme maddesi, yangın kaynağının bulunduğu yere salındığında yangın söndürme etkisi daha iyi olur. Ancak her hücrenin arızalanma ihtimali varken, bu kadar çok hücre için yangını noktadan noktaya söndürmek büyük bir zorluktur. Yangın algılama, Lityum ion pil yangını tespit etmenin ve yangın hasarını en aza indirmek için aktif yangın söndürmeyi devreye sokmanın etkili bir yoludur. Önceden ayarlanan sıcaklığa ulaşıldığında ya da algılama için belirlenen parametreler gerçekleştiğinde yangın algılama sistemi yangın söndürmeyi gerçekleştirmek için basınçlı kaptaki söndürme maddesini nozul vasıtasıyla boşaltır.

Bu nedenle otomatik yangın algılamalı söndürme sistemi hem alarm hem de yangın söndürme fonksiyonlarına sahip olup, yangını daha başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde söndürebilmektedir.

Sıcaklık Sensörleri: Termal Bozunum Algılama: Lityum-iyon pil yangınları genellikle termal bozunum ile başlar, bu da pilin sıcaklığında hızlı istenmeyen bir artışa neden olur. Bu tür yangınları erken aşamada algılamak için sıcaklık sensörleri kullanılır. Termokupl veya termistör gibi sensörler, pillerin sıcaklık artışlarını izleyerek yangını öncesinde tespit edebilir.

Kritik Sıcaklık Seviyeleri: Sistem, belirli bir sıcaklık eşiği aşıldığında alarm verir ve müdahale tetiklenir. Bu sayede termal bozunum başlangıcında yangın önlenir.

Gaz Sensörleri: Elektrolit Buharlarının Algılanması: Termal bozunum durumunda, pilin içindeki elektrolitler bozulmaya başlar ve bozunum yanıcı gazları açığa çıkarır. Bu gazların tespiti için gaz sensörleri kullanılabilir. Özellikle hidrojen, karbon monoksit ve diğer yanıcı gazların algılanması, yangının erken aşamada tespit edilmesini sağlar.

VOC Sensörleri: Uçucu organik bileşikler (VOC) sensörleri, elektrolitlerin bozulmasından kaynaklanan gazların varlığını algılayabilir. Bu sensörler, yangın başlamadan önce bile gaz çıkışını tespit edebilir.

Duman Dedektörleri: Erken Duman Algılama: Lityum-iyon pil yangınlarının dumanı, genellikle ince ve hızlıca alana yayılan bir yapıya sahiptir. Optik duman dedektörleri, bu tür dumanları algılamak için kullanılabilir. Duman dedektörleri yangının başlamasından hemen sonra dumanı tespit ederek alarm sistemini devreye sokar.

Aerosol Algılama: Lityum-iyon pillerdeki yangınlar sırasında oluşan ince aerosolleri tespit edebilen hassas dedektörler, yangının çok erken bir aşamada algılanmasını sağlayabilir.

Isı Artışı Oranı (Rate of Rise) Dedektörleri: Ani Sıcaklık Değişimleri: Bu dedektörler, ortam sıcaklığındaki ani ve hızlı artışları algılayarak yangını tespit eder. Lityum-iyon pillerde termal kaçak sırasında hızlı bir sıcaklık artışı yaşandığından, bu tür dedektörler yangının başlangıç anında devreye girer.

Görsel Algılama Sistemleri: Termal Kameralar: Lityum-iyon pil gruplarının izlenmesinde termal kameralar kullanılmaktadır. Bu kameralar, pil yüzeyindeki

sıcaklık farklılıklarını görsel olarak tespit ederek potansiyel yangın tehlikelerini belirler.

Optik İzleme Sistemleri: Alevlerin veya dumanın optik olarak izlenmesi, yangının başlangıç anında tespit edilmesini sağlar.

Yangını Algılama ve Söndürme Sistemi

Otomatik Yangından algılama ve söndürme sistemindeki anahtar faktörün, mümkün olan en erken algılama kombinasyonunun uygulanması ve en doğru söndürücü maddenin kullanılması olduğu ileri sürülebilir.

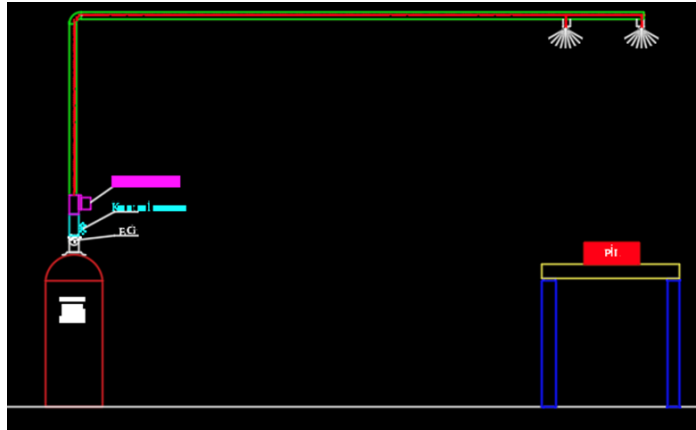
Söndürme maddesinin en erken durumda boşaltılması; hem patlayıcı elektrolit-oksijen karışımlarının büyük miktarlarda oluşmasına engel olmakta, hem de başlangıçtaki (Thermal Bozunum) ısı sürüklenmeyi önlemektedir. Bu süreç ile sürüklenmelerin yayılması durdurulur, ikincil yangınlar önlenir ve uzun süreli etkisizleştirme ile de tekrar tutuşma gerçekleşmesine engel olur.

Sistem Isı sensörü termakopul ile yanma alanındaki ısıyı ölçecek ve ısı ayarlanan değere geldiğinde sıcaklık kontrol modülü belirlenen senaryoya göre selenoid valfi enerjilendirerek sistem tüpü içinde bulunan kapsülleyici ajan katkılı sıvıyı serbest bırakacaktır. Sıvı nozullar ile yanmakta olan lityum pil üzerine boşalacaktır.

Sistem bileşenleri ve projeleri aşağıdaki gibidir;

1. Sistem kazanı 6 LT
2. Kontrol Valfi + Basınç göstergesi
3. Elektrikli Selenoid valf
4. Full kone sis nozul
5. 1/2 inç galvaniz boru
6. 1/2 maşon galvaniz
7. 1/2 dirsek galvaniz
8. 1/2 T bağlantı galvaniz
9. F 500 kapsülleyici söndürücü madde
10. PTC ısı sensörü termokopul
11. Sıcaklık Kontrol cihazı
12. Zamanlama Modülü
13. Sesli uyarı
14. Acil Başlatma Butonu

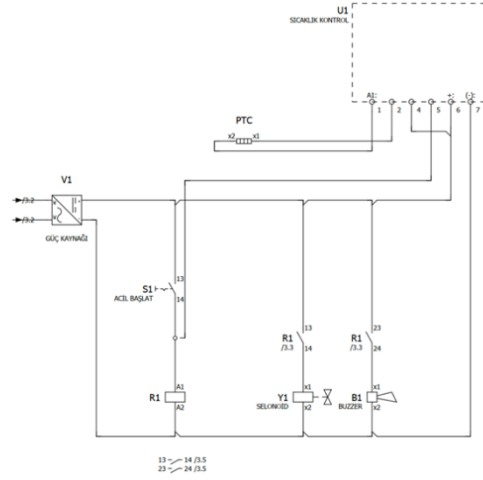
16. Sistem Kabini



Şekil 2.11. Söndürme sistemi deney seti görünüş 1.



Şekil 2.12. Söndürme sistemi deney seti görünüş 2.



Şekil 2.13. Söndürme deney seti elektriksel şema.

2.3. Deneyler

2.3.1. Taşınabilir YSC lityum pil söndürme deneyleri

2.3.1.1. Deney 1

LFPO4 Batarya delme ezme yöntemi ile hasarlandırılmış. Termal Bozunum Sağlanmıştır.

Batarya delindikten 3 sn sonra Termal Bozunuma girmiş ve dumanlar çıkarmaya başlamıştır.

Batarya delindikten 30 sn sonra yanma başlatılmıştır.

Sıcaklık Ölçümleri yapılmış sıcaklık yanma sürecinde açık havada 600 C ulaşmıştır.

Yanma başladıktan 1 dk sonra 6 LTlik F500 EA katkılı sulu söndürücü ile müdahale edilerek söndürülmüştür.

Söndürme gerçekleştirildikten sonra 20 dk boyunca gözlemlenmiş ve tekrar yanma olmamıştır



Şekil 2.14. Deney-1 resimler.

2.3.1.2. Deney 2

LFPO4 Batarya çivi ile delme yöntemi ile hasarlandırılmış. Termal Bozunum Sağlanmıştır.

Delinme ve TR gerçekleştikten 25 sn sonra gaz çıkışı başlamış ve gaz basınçlı bir şekilde çıkmaya devam etmiştir.

Kendi kendiliğinden tutuşma gerçekleşmediği için 40 sn sonra dışarıdan tutuşturulmuştur.

Yanma basınçlı gaz çıkışı sebebi ile JETFLAME biçiminde devam etmiştir.

Yanma ve Gaz çıkışı 215 sn boyunca devam etmiştir.

Yanma devam ederken 260 sn'lerde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 280-290 C arası pil gövde sıcaklığı ölçülmüştür.

Yanma azaldığında Pil F500 EA karışımı sıvı içerine konulmuştur.

Sıvı hızlı soğutma yapmış ve sıvı sıcaklığı 15-18 C ölçülmüştür.



Şekil 2.15. Deney-2 resimler.

2.3.1.3. Deney 3

LFPO4 Batarya benzin mazot karışımı içerisinde yakılarak. Termal Bozunum Sağlanmıştır. Hibrid araçlarda ya da dışarıdan aleve maruz kalma sonrası yanma oluşması halindeki durum incelenmiştir.

Yanma başlatıldıktan 57 saniye sonra LFPO4 pil jet flame şekline yanmaya başlamıştır.

LFPO4 pil jet flame şeklinde yanmaya devam ederken 60 sn sonra 6 litrelik F500 EA katkılı sulu söndürücü ile müdahale edilerek söndürülmüştür.

Söndürme işlemi kesik kesik aralıklı söndürücü sıkılarak 6 saniyede gerçekleştirilmiştir.

Söndürme gerçekleştirildikten sonra 20 dk boyunca gözlemlenmiş ve tekrar yanma olmamıştır



Şekil 2.16. Deney-3 resimler.

2.3.2. Otomatik su sisi lityum pil söndürme deneyleri

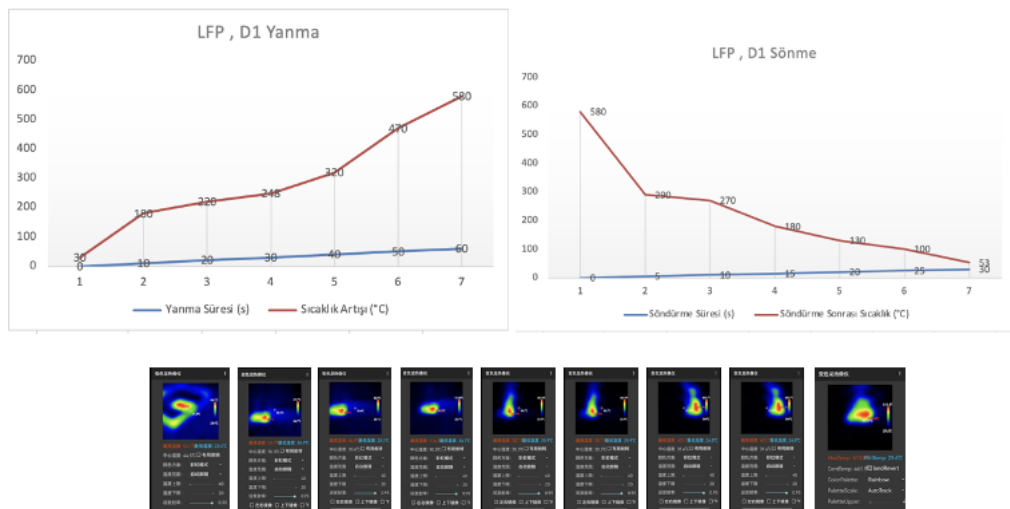
Seçilen DOE yöntemine ve parametrelere göre, sabit algılama söndürme düzeneği kullanılarak 6 deney yapılmıştır. Tüm deneylerde 6 LT lik %3 F-500EA katkıli söndürme maddesi kullanılmıştır.

Deney 1:

Pil türü : LFP prizmatik ,

Çevresel parametreler ; 25 C ,%40 Nem hava açık.

Prizmatik pil alttan ısıtılarak 180 sn Termal bozunum başlatılmıştır. Önce pilde şişme meydana gelmiş ancak kendi kendine ateşlenme olmamıştır, Termal bozunum hızı yavaş oluşmuş. Yanma dışarıdan alev vererek başlatılmış.60 sn yanma oluşmasına müsaade edilmiş ve jet alevi oluşmuştur. Yanma anında termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık 580 C olarak kaydedilmiştir.60 sn sonrasında otomatik F500 EA, %3 katkıli su sisi söndürme sistemi başlatılmış , 30 sn boyunca devam etmiş. Alevler söndürülmüş , gaz çıkışı devam etmiş ancak yeniden alevlenme olmamıştır. Söndürme sonrası ölçülen sıcaklık 53 C tır.



Şekil 2.17. Otom. Sönd. Deney-1 resimler.

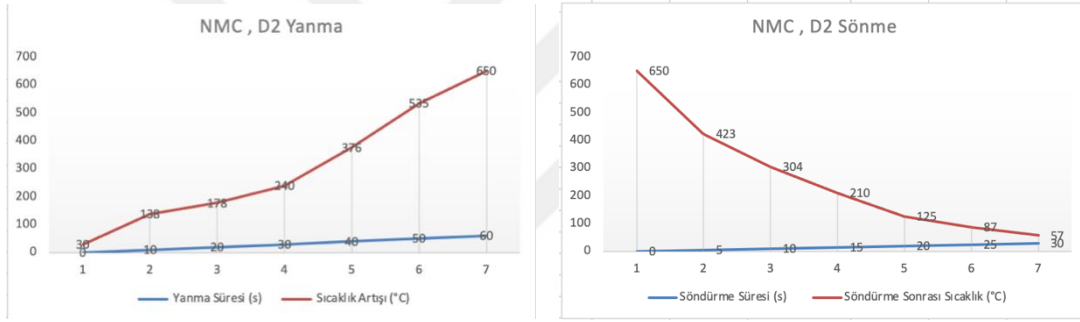
Deney 2:

Pil Türü: NMC prizmatik

Çevresel Parametreler: 25°C, %40 Nem, hava açık

Deney sırasında prizmatik pil delme yöntemi ile hasara uğratılarak termal kaçak tetiklenmiştir. Pil delinmesi sonrasında anında alev alma gözlemlenmiştir. Yanma 50 saniye boyunca devam etmiş ve jet fire oluşmamıştır. Termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık 650°C olarak kaydedilmiştir.

Yanmanın 50. saniyesinde otomatik F500 EA su sisi söndürme sistemi (%3 konsantrasyon) devreye alınmış ve 30 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Alevler tamamen sönmüş, ancak gaz çıkışı devam etmiştir. Yeniden alevlenme gözlenmemiştir. Söndürme sonrası pil yüzey sıcaklığı 57°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.18. Otom. Sönd. Deney-2 resimler.

Deney 3:

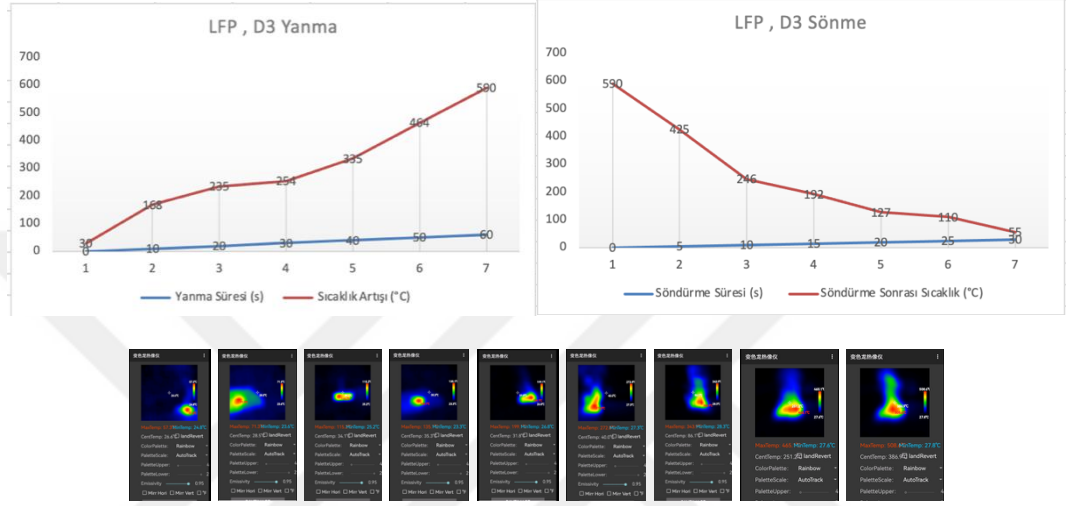
Pil Türü: LFP prizmatik

Çevresel Parametreler: 23°C, %40 Nem, hava açık

Pil, 180 saniye boyunca alttan ısıtılarak termal bozunum başlatılmıştır. Pilde şişme gözlemlenmiş ancak kendi kendine alev alma gerçekleşmemiştir. Termal bozunum

süreci yavaş ilerlemiştir. Yanma, dışarıdan verilen alevle tetiklenmiş ve 60 saniye boyunca yanmaya devam etmiştir. Yanma sırasında jet alevi oluşmuştur.

Maksimum sıcaklık 590°C olarak kaydedilmiştir. Yanmanın 60. saniyesinde F500 EA su sisi söndürme sistemi (%3 konsantrasyon) devreye alınmış ve 30 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Alevler tamamen sönmüş, ancak gaz çıkışı devam etmiştir. Söndürme sonrası pil yüzey sıcaklığı 55°C olarak ölçülmüştür.

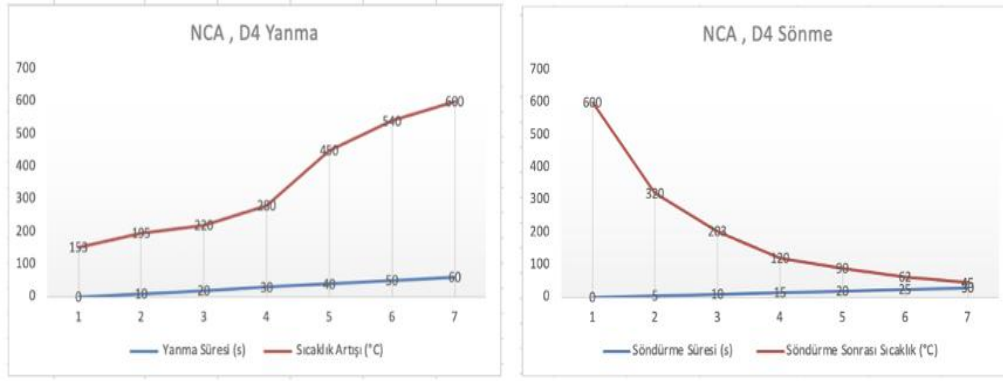


Şekil 2.19. Otom. Sönd. Deney-3 Resimler

Deney 4:

Pil Türü: NCA prizmatik

Çevresel Parametreler: 23°C, %40 Nem, hava açık: Pil, 120 saniye boyunca alttan ısıtılarak termal bozunum başlatılmıştır. Bu süreçte pilin doğrudan alev aldığı gözlemlenmiştir. Termal kaçak hızlı ilerlemiş ve 60 saniye boyunca yanma devam etmiştir. Yanma sırasında jet fire oluşmamıştır ve maksimum sıcaklık 600°C olarak ölçülmüştür. Yanmanın 60. saniyesinde F500 EA su sisi söndürme sistemi (%6 konsantrasyon) devreye alınmış ve 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Alevler tamamen söndürülmüş, ancak gaz çıkışı devam etmiştir. Söndürme sonrası pil yüzey sıcaklığı 45°C olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.20. Otom. Sönd. Deney-4 Resimler

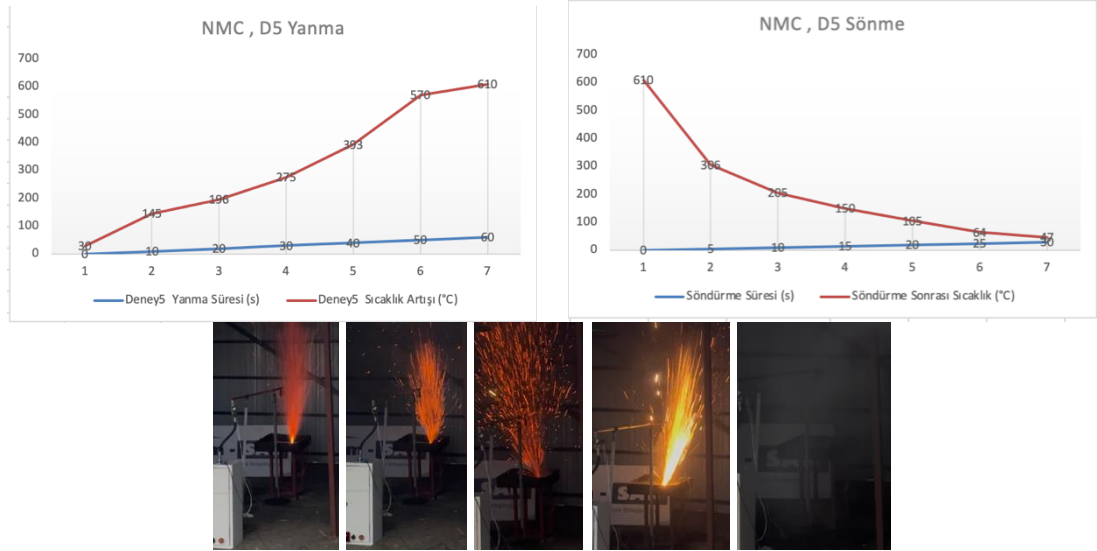
Deney 5:

Pil Türü: NMC prizmatik

Çevresel Parametreler: 22°C, %40 Nem, hava açık

Deneyde prizmatik pil delme yöntemi ile hasara uğratarak termal kaçak tetiklenmiştir. Pil delinmesinin ardından hemen alev alma gerçekleşmiş ve yanma 60 saniye boyunca devam etmiştir. Yanma sırasında jet fire gözlemlenmemiştir. Termal kamera ile ölçülen maksimum sıcaklık 610°C olarak kaydedilmiştir.

Yanmanın 60. saniyesinde F500 EA su sisi söndürme sistemi (%6 konsantrasyon) devreye alınmış ve 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Alevler tamamen sönmüş, ancak gaz çıkışı devam etmiştir. Söndürme sonrası pil yüzey sıcaklığı 47°C olarak ölçülmüştür.

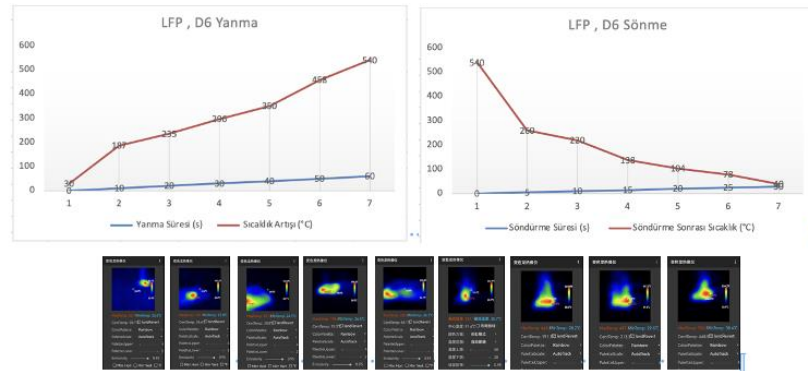


Şekil 2.21. Otom. Sönd. Deney-5 Resimler

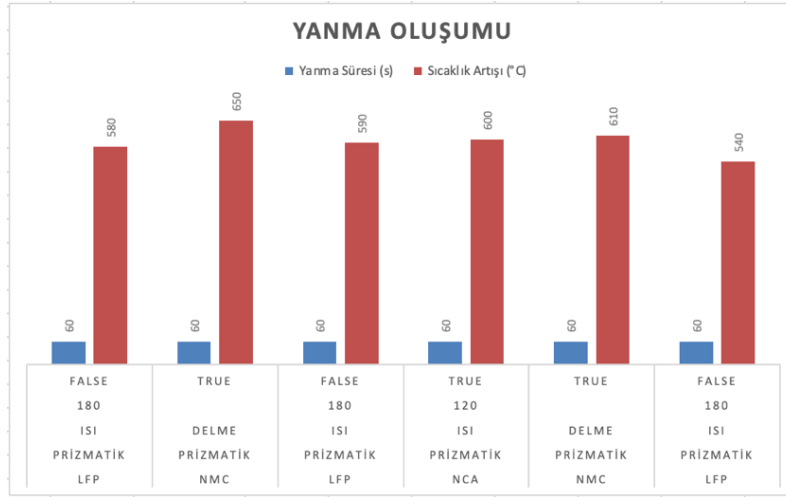
Deney 6:

Pil Türü: LFP prizmatik Çevresel Parametreler: 22°C, %40 Nem, hava açık

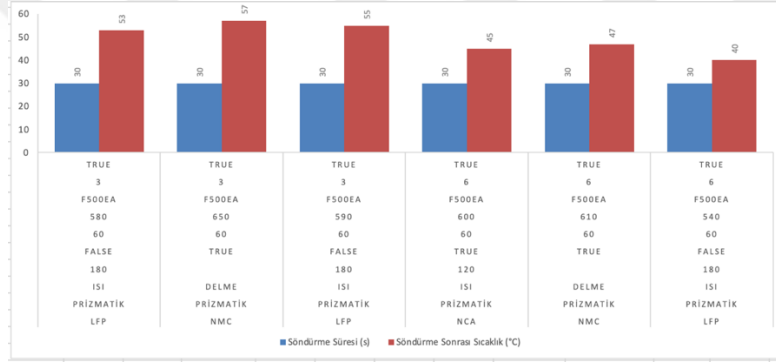
Pil, 180 saniye boyunca alttan ısıtılarak termal bozunum başlatılmıştır. Pilin şiştiği gözlemlenmiş ancak kendi kendine alev almadığı kaydedilmiştir. Termal bozunum süreci yavaş ilerlemiştir. Yanma, dışarıdan verilen alevle başlatılmış ve 60 saniye boyunca devam etmiştir. Yanma sırasında jet fire oluşmuştur. Maksimum sıcaklık 540°C olarak ölçülmüştür. Yanmanın 60. saniyesinde F500 EA su sisi söndürme sistemi (%6 konsantrasyon) devreye alınmış ve 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Alevler tamamen sönmüş, ancak gaz çıkışı devam etmiştir. Söndürme sonrası pil yüzey sıcaklığı 40°C olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.22. Otom. Sönd. Deney-6 Resimler



Şekil 2.23. Yanma oluşumu grafikleri



Şekil 2.24. Söndürme grafikleri.

Yapılan deneylerin tamamının özet bilgileri olan tablo aşağıda verilmiştir

Tablo 2.2. Deney sonuçları özet tablosu.

Deney No	Pil Türü	Pil Boyut	Yöntem Türü	Uy. Süresi (s)	Alev Alma	Yanma Süresi (s)	Sıcaklık Artışı (°C)	Söndürücü Tipi	Söndürücü Kons. (%)	Gaz Çıkışı	Söndürme Süresi (s)	Söndürme Sonrası Sıcaklık (°C)	Başlangıç Ortam Sıcaklığı (°C)	Havalandırma Durumu	Nem (%)	Thermal Runaway Hızı	Jet fire
1	LFP	Prizmatik	Isı	180	False	60	580	F500EA	3	TRUE	30	53	25	Açık	40	Düşük	True
2	NMC	Prizmatik	Delme		True	60	650	F500EA	3	TRUE	30	57	25	Açık	40	Orta	False
3	LFP	Prizmatik	Isı	180	False	60	590	F500EA	3	TRUE	30	55	23	Açık	40	Düşük	True
4	NCA	Prizmatik	Isı	120	True	60	600	F500EA	6	TRUE	30	45	23	Açık	40	Orta	False
5	NMC	Prizmatik	Delme		True	60	610	F500EA	6	TRUE	30	47	22	Açık	40	Yüksek	False
6	LFP	Prizmatik	Isı	180	False	60	540	F500EA	6	TRUE	30	40	22	Açık	40	Düşük	True



3. SONUÇ

Termal bozunum (TR) = Yangın değildir, Termal bozunum ve yangın birbirine eşdeğer kavramlar değildir. Termal bozunum, pilde başlayan bir zincirleme reaksiyondur ve yangına yol açabilir. Ancak müdahale sırasında genellikle odak noktası, dışarı çıkan gazların yanmasını kontrol altına almak ve yangının büyümesini önlemektir. Termal bozunum (TR) = Yangın değildir, ancak risk yönetimi ve doğru söndürme yöntemleri ile bu süreçlerin etkileri kontrol edilebilir.

Lityum iyon pil yangınlarından, birinci evre yangının oluşum öncesi evresidir, bu evreye termal bozunumu hazırlayan evre de diyebiliriz, bu evrede ısı ile ya da diğer termal bozunum tetikleyecek olan etkenler var ise bir termal bozunum oluşma riski ön plandadır. Eğer birinci evrede gerekli tedbirleri alamamış isek, ya da termal bozunumu önleyecek tedbirleri alamamış isek ikinci evre meydana gelir. İkinci evre termal bozunumu oluşup yani pil ısısının 150 – 200 santigrat dereceler civarına gelmesi sebebiyle yanıcı, parlayıcı ve toksik gazların açığa çıktığı bir evredir. Bu evrede gerekli önlemler gerekli müdahaleler yapılmaz ise, üçüncü evremiz başlar, üçüncü evrede sıcaklık 400C kadar ulaşabilir, bu evre alevlenme veya patlama gerçekleşme potansiyeli taşıyan bir evredir, eğer üçüncü evrede de gerekli müdahaleler yapılmamışsa dördüncü evre başlar. Dördüncü evre yanma ve patlamanın oluşabileceği yanma veya patlamanın oluşabileceği bir evredir ve artık yanma ve patlama oluşmuş demektir, bu evrede alınması gereken önlemler ve yapılması gerekenler yanmaya ve yangına müdahale ederek, doğru bir biçimde termal bozunumu yavaşlatıp, yanmayı ve yangını kontrol altına almaktır. Lityum pillerin yangın evrelerini iyi anlar ve bunlarla ilgili gerekli tedbirleri doğru alıp, doğru müdahaleler yaparsak termal bozunumu önüne geçemesek bile sonuçlarını, olası kötü sonuçlarını en aza indirebiliriz.

Lityum-iyon piller potansiyel bir yangın riski oluşturur ve geleneksel yangın söndürme sistemleri yeterli güvenliği sağlayamayabilir. Su bazlı yangın söndürmenin lityum iyon pil yangınlarında etkili olduğu tespit edilmiştir. Su, alevleri söndürür ve LIB'i soğutarak termal kaçak olayı sırasında ekzotermik reaksiyonları engelleyebilir.

Araştırmalar su sisi yangın söndürme sistemlerinin altı batarya bölmeleri gibi alanlar için potansiyel olarak uygulanabilir olduğu kabul edilmektedir. Dodekafloro-2-metilpentan-3-on ($C_6F_{12}O$), kimyasal engelleme ve fiziksel soğutma kombinasyonunu içeren, lityum iyon pil yangınları için etkili bir önleyici olarak araştırılmıştır, ancak tek başına yeterli bulunmamıştır. Kuru kimyasal tozlar yangını geçici olarak söndürebilir ancak LIB'in yeniden tutuşmasını engellemeyebilir. Lityum-iyon piller için ideal yangın söndürme maddesi, ısıl olarak yüksek iletkenliğe sahip, elektriksel olarak yüksek düzeyde yalıtkan, yangınları söndürmede etkili, ucuz, toksik olmayan, kalıntı bırakmayan ve zehirli gazları emen maddeler olmalıdır.

Lityum iyon pil yangınlarının önlenmesi ve müdahale süreçleri, her aşamada titizlikle ele alınmalıdır.

- Erken Algılama: Termal ve gaz izleme sistemleriyle risklerin hızlı tespiti sağlanmalıdır.
- Baskılama ve kontrol: Yangın battanileri, inert gazlar ve havalandırma sistemleriyle yanıcı gazların etkisi azaltılmalıdır.
- Yangın Söndürme: Duruma uygun söndürme ajanları özellikle encapsulated ajanlar ve su sisi söndürme sistemleri kullanılmalıdır.
- Takip ve izleme: Yangın sonrasında pillerin sndrlşmş olduğu düşünülse bile en az 24 saat gözlem altında tutulmalı ve piller güvenli alanlarda saklanmalıdır.
- Eğitim ve tatbikat: Müdahale ekipleri düzenli olarak eğitim ve tatbikatlarla bu durumlara hazırlanmalıdır.

Yangın söndürme işlemi tamamlandıktan sonra termal kaçak riski devam edebilir, bu nedenle;

- Sürekli izleme: Termal kameralar ve gaz sensörleri ile 24 saat gözlem yapılmalıdır.
- Soğutma İşlemleri: Pil hücreleri tamamen soğutulmalı ve güvenli bir sıcaklığa düşürülmelidir.
- Özel depolama alanları: Hasarlı piller özel konteynerlerde saklanmalıdır.

- Kişisel koruyucu ekipmanlar (PPE): Müdahale ekipleri koruyucu kıyafetler, solunum maskeleri ve eldivenler kullanmalıdır.

F-500 katkı maddeleri içeren su sisinin, lityum iyon pil yangınlarında en etkili söndürücü olduğu birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiş ve denemelerde başarı sağlanmıştır. Araştırmalar, su sisi bazlı yangın söndürmenin, özellikle F-500 katkı maddesi içeren su sisinin, lityum iyon pil yangınlarının bastırılmasında etkili olduğunu öne sürüyor. Ancak lityum iyon piller için ideal yangın söndürme maddesini bulma konusunda zorluklar halen devam ediyor. F-500'ün lityum iyon pil yangınlarını söndürme ajanı olarak yapılan araştırmalar, diğer soğutma yöntemleriyle birlikte kullanıldığında potansiyel faydalarını göstermektedir. Umut vaat etmekle birlikte, farklı yangın senaryolarında kullanımını optimize etmek ve yeteneklerini tam olarak anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardı



KAYNAKLAR

- [1] Liao, Z., Zhang, S., Li, K., Zhang, G., & Habetler, T. G. (2019). A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2019, 436.
- [2] Feng, X., Zheng, S., Ren, D., He, X., Wang, L., Liu, X., Li, M., & Ouyang, M. (2019). Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries. *Energy Procedia*, 158, 4684–4689.
- [3] Yuan, C., Wang, Q., Wang, Y., & Zhao, Y. (2019). Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 153, 39–50.
- [4] Steinbach, J. (1995). *Chemische Sicherheitstechnik*. Wiley/VCH.
- [5] Wang, Q. S., Ping, P., & Sun, J. H. (2010). Nonlinear dynamics of lithium-ion batteries. *Nonlinear Dynamics*, 61, 763–772.
- [6] Kumaresan, K., Sikha, G., & White, R. E. (2008). Thermal runaway and safety of lithium-ion batteries: A review. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(10), A164–A171.
- [7] Wang, Q. S., & Sun, J. H. (2005). Fire safety science – Proceedings of the Eighth International Symposium. *International Association for Fire Safety Science*, 375–382.
- [8] Kim, G. H., Pesaran, A., & Spotnitz, R. (2007). Modeling of thermal runaway in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 170(2), 476–489.
- [9] Spotnitz, R., & Franklin, J. (2003). Abuse behavior of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 113(1), 81–100.
- [10] Schmidt, V. M. (2003). *Elektrochemische Verfahrenstechnik*. Wiley/VCH.
- [11] Kaliaperumal, M., Dharanendrakumar, M. S., Prasanna, S., Abhishek, K. V., Chidambaram, R. K., Adams, S., Zaghib, K., Reddy, M. V. (2021). Cause and mitigation of lithium-ion battery failure – A review. *Energy Procedia*, 10, 12345–12354.
- [12] Zhang, L., Jin, K., Sun, J., & Wang, Q. (2022). A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fires. *State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China*.
- [13] Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. (2020). A review of lithium-ion battery fire suppression. *Energies*, 13(16), 4095.
- [14] Buldu, M., Altın, S., & Bulut, F. (2024). Safety risks and solution recommendations for lithium-ion batteries. *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*.

- [15] Galushkin, N. E., Yazvinskaya, N. N., & Galushkin, D. N. (2019). Mechanism of gases generation during lithium-ion batteries cycling. *Journal of The Electrochemical Society*.
- [16] Wang, H., Xu, H., Zhang, Z., Wang, Q., Jin, C., Wu, C., Xu, C., Hao, J., Sun, L., Du, Z., Li, Y., Sun, J., & Feng, X. (2022). Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway: A comparative study. *eTransportation*.
- [17] Wang, Y., Song, Z., Wang, H., Li, H., Zhang, Y., Li, C., Zhang, X., Feng, X., Lu, L., & Ouyang, M. (2023). Experimental research on flammability characteristics and ignition conditions of hybrid mixture emissions venting from a large format thermal failure lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*.
- [18] Chang, W., Li, G., Sun, H., Zhang, X., Li, Z., Pan, C. (2024). Explosion characteristics of lithium-ion batteries vent gases containing dimethyl carbonate at elevated temperatures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- [19] Karamangil, M. I., Sürmen, A., & Tekin, M. (2023). Elektrikli araçlarda batarya yangınlarına genel bakış. *Mühendislikte Yakıtlar, Yangın ve Yanma Dergisi*.
- [20] Yuan, S., Chang, C., Yan, S., Zhou, P., Qian, X., Yuan, M., Liu, K. (2021). A review of fire-extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fire. *Journal of Energy Chemistry*.
- [21] Ghijia, M., Burchb, I., Suendermannb, B., Gambleb, G., Novozhilova, V., Josepha, P., Moinuddina, K. (2021). Lithium-ion battery fire suppression using water mist systems. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*.
- [22] Meng, X., Li, S., Fu, W., Chen, Y., Duan, Q., & Wang, Q. (2022). Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires. *eTransportation*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fikret KIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, İstanbul Üniversitesi, Açık ve Uz. Eğit. Fak., İş Sağlığı ve Güvenliği
- **Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Güvenliği

MESLEKİ DENEYİM :

- 1995-2005 yılları arasında gemilerde Elektrik/ Makine Zabiti olarak çalıştı.
- 2005-2009 yılları arasında tersanelerde elektrik donatım sorumlusu olarak çalıştı.
- 2009-2025 yılları arasında Yangın ve gemi elektrik otomasyon konusunda kendi şirketinde faaliyet göstermektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kır F., Soyhan H. S. , (2024, 19-21, Sept.). Lityum İon Pillerin Islak Kimyasal Katkılı Su Sisi İle Söndürülmesi Üzerine İnceleme. *17 th International Combustion Symposiom – Proceeding Of INCOS*, Bursa, Turkey.
- Kır F., Soyhan H. S. , 2024. Termal Kaçak Yangın mı?, *Uluslararası Yakıtlar Yama ve Yangın Dergisi*.

DİĞER ESERLER:

- Kır F., Özdemir N. C. , Elektrik Kaynaklı Yangınlar Nedenleri ve Korunma Yöntemleri .*ISBN 978-605-68239-1-9, 2019 , Kocaeli , Turkey.*
- Kır F., Taşınabilir Yangın Söndürme Cihazları . *ISBN 978-605-70581-7-1,2023 , Alaska Yayınevi ,İstanbul , Turkey.*