

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

**LİTYUM İYON BATARYALARDA MEYDANA GELEN TERMAL
KAÇAK NEDENLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE GAZ SALIMININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül KIRDUDU

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2025

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

**LİTYUM İYON BATARYALARDA MEYDANA GELEN TERMAL
KAÇAK NEDENLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE GAZ SALIMININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül KIRDUDU

Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN

ŞUBAT 2025

Ayşegül KIRDUDU tarafından hazırlanan “Lityum İyon Bataryalarda Meydana Gelen Termal Kaçak Nedenlerinin Araştırılması ve Gaz Salımının İncelenmesi” adlı tez çalışması 25.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

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

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

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. İsmail ALTIN**
Karadeniz Teknik 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 İYON BATARYALARDA MEYDANA GELEN TERMAL KAÇAK NEDENLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE GAZ SALIMININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’ de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’ nin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’ nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(25/02/2025)

Ayşegül KIRDUDU





Eşime ve çocuklarım Mert ve Kuzey' e.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince yaptığımız tüm çalışmalarda desteklerini hiç esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN' a teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca destekleri ve yardımları için Sakarya Üniversitesi hocalarımdan Prof. Dr. Ali ÇORUH ve Doç. Dr. Murat TUNA hocama, KOBİTEM eğitmenlerinden Emel ZENGİN ve Hasan KOYUNLU' ya, değerli aileme ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Ayşegül KIRDUDU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	1
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Literatür Taraması	2
2. PİLLERİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.1. Kurşun Asit Piller (Pb-Acid).....	3
2.2. Nikel Çinko Piller (Ni-Zn)	3
2.3. Nikel Kadmiyum Piller (Ni-Cd).....	3
2.4. Nikel Metal Hidrit Piller (Ni-MH)	4
2.5. Zebra Piller	4
2.6. Çinko Hava (Zn-Air) Piller	4
2.7. Lityum Kobalt Oksit Piller (LCO)	4
2.8. Lityum Manganez Oksit Piller (LMO).....	5
2.9. Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Piller (NCA)	5
2.10. Lityum Nikel Manganez Kobalt (NMC)	5
2.11. Lityum Titanat Oksit Piller (LTO)	5
2.12. Lityum Demir Fosfat (LFP)	5
2.13. Lityum İyon Polimer Piller (LiPo)	6
2.14. Lityum Sülfür Piller (LiS)	6
2.15. Lityum Hava Piller (Li ₂ O ₂)	6
2.16. Lityum İyon Piller	9
3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ	15
3.1. Batarya Yönetim Sistemi	15
3.1.1.1. İzleme	16
3.1.1.2. Koruma.....	17
3.1.1.3. Hücre dengeleme ve şarj-deşarj yönetimi	17
3.1.1.4. Pasif dengeleme	17
3.1.1.5. Aktif dengeleme	18
3.1.1.6. Teşhis ve kestirim	18
3.2. Batarya Termal Yönetim Sistemi	19
3.2.1.1. Güvenlik havalandırması	19
3.2.1.2. Pozitif sıcaklık katsayısı.....	20

3.2.1.3. Akım kesme cihazı	20
3.2.1.4. Alev geciktirici ayırıcılar	21
4. TERMAL KAÇAK	23
4.1. Termal Kaçak Mekanizmasının Sebepleri.....	24
5. GAZ SALIMI.....	27
6. ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ.....	31
6.1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar (ICE)	31
6.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV).....	32
6.3. Tam Elektrikli Araçlar.....	34
7. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YANGIN RİSKLERİ.....	37
7.1. Hücre Yangınlarının Özellikleri	38
8. DENEYLER.....	41
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	89



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ATEX	: Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmak Üzere Tasarlanmış Ekipman ve Koruyucu Sistemler
BMS	: Batarya Yönetim Sistemi
BTMS	: Batarya Termal Yönetim Sistemi
CID	: Akım Kesme Cihazı
CoO₂	: Kobalt Oksit
DC	: Direkt Akım
DEC	: Dietil Karbonat
DMC	: Dimetil Karbonat
EC	: Etilen Karbonat
EMC	: Etil Metil Karbonat
EN	: Avrupa Standardı
EV	: Elektrikli Araç
FePO₄	: Demir Fosfat
FTIR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektrometre
GC	: Gaz Kromatografisi
HEA	: Hibrit Elektrikli Araçlar
HV	: Yüksek Gerilimli
ICE	: İçten Yanmalı Motorlar
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IECE	: Patlayıcı Ortamlar İçin Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IN METRO	: Ulusal Metroloji, Standardizasyon ve Endüstriyel Kalite Enstitüsü
KOBİTEM	: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Eğitim Merkezi
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
Li-air	: Lityum Hava
Li-ion	: Lityum İyon
LIB	: Lityum İyon Batarya
LTO	: Lityum Titanat

LiCoO₂	: Lityum Kobalt Oksit
LiFePO₄	: Lityum Demir Fosfat
LiMn	: Lityum Manganez
LMO	: Lityum Manganez Oksit
Li-NCM	: Lityum Nikel Kobalt Manganez
LiPo	: Lityum Polimer
LiS	: Lityum Sülfür
Mn₂O₄	: Manganez Oksit
Na-NiCl₂	: Sodyum Nikel Klorür
NCA	: Nikel Kobalt Alüminyum
Ni-Fe	: Nikel-Demir
Ni-Cd	: Nikel Kadmiyum
Ni-MH	: Nikel Metal Hidrit
Ni-Zn	: Nikel Çinko
NMC	: Lityum Nikel Mangan Kobalt
Pb-Acid	: Kurşun-Asit
PC	: Polipropilen Karbonat
PEO	: Polietilen Oksit
PTC	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı
SAÜ	: Sakarya Üniversitesi
SEI	: Katı-Elektrolit Ara Yüz Tabakası
SIL	: Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi
SOC	: Şarj Yüzdesi
SOH	: Bataryanın Sağlık Durumu
TEA	: Tamamen Elektrikli Araçlar
UKEX	: Potansiyel Olarak Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmak Üzere Ekipman ve Koruyucu Sistemler Yönetmeliği 2016
UL	: Underwriters Laboratuvarları A.Ş.
Zn-Air	: Çinko Hava

SİMGELER

ΔH	: Elektrokimyasal reaksiyon ısısı
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
A	: Amper
Ea	: Reaksiyon aktivasyonu için enerji (KJ/mol)
F	: Faraday sabit değeri 96,484.5 (C/mol)
I	: Akım (A)
k	: Termal İletkenlik
kw	: Kilowatt
Q	: Batarya içinde üretilen toplam ısı (J)
R	: İdeal gaz sabiti değeri
T	: Reaksiyon sırasında sıcaklık
V	: Volt
σ	: Stefan–Boltzmann Sabiti
Ω	: Ohm
mAh	: Miliamper saat



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Pillerin Teknik Özellikleri	6
Tablo 2.2. Pillerin Avantaj ve Dezavantajları	7
Tablo 3.1. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri	16
Tablo 3.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri	18
Tablo 5.1. TR Sırasındaki Havalandırma Gazı Türlerinin Bileşimleri	28
Tablo 6.1. Araç Çeşitleri	31
Tablo 8.1. Deneylerin gerçekleştirildiği ortam.....	42
Tablo 8.2. Deneyde kullanılan ekipmanın teknik özellikleri	43
Tablo 8.3. Deneysel Çalışma Koşulları	43
Tablo 8.4. Deney 1. 2800 mAh. % 80 SOC pil	44
Tablo 8.5. Deney 1 verileri.....	44
Tablo 8.6. Deney 2. 8 adet seri bağlı boş pilin aleve maruz bırakılması.....	44
Tablo 8.7. Deney 2 verileri.....	45
Tablo 8.8. Deney 3. Kese tipi lityum iyon pili itfaiyeci baltası ile delme.....	45
Tablo 8.9. Deney 3 verileri.....	45
Tablo 8.10. Deney 4. İki pilin aleve maruz bırakılması	46
Tablo 8.11. Deney 4 verileri.....	46
Tablo 8.12. Deney 5. Dört pilin lpg alevine maruz bırakılması	46
Tablo 8.13. Deney 5 verileri.....	47
Tablo 8.14. Deney 6. Çivi ile darbe	47
Tablo 8.15. Deney 6 verileri.....	47
Tablo 8.16. Deney 7. Kimyasala Maruziyet.....	48
Tablo 8.17. Deney 7 verileri.....	48
Tablo 8.18. Deney 8. Yüksekten Düşme	48
Tablo 8.19. Deney 8 verileri.....	49
Tablo 8.20. Deney 9. Pilin üzerine ağırlık düşmesi	49
Tablo 8.21. Deney 9 verileri.....	49
Tablo 8.22. Deney 10. Pilin Delinmesi	50
Tablo 8.23. Deney 10 verileri.....	50
Tablo 8.24. Deney 11. Pilin Delinmesi	50
Tablo 8.25. Deney 11 verileri.....	51
Tablo 8.26. Deney 12. Pilin Delinmesi	51
Tablo 8.27. Deney 12 verileri.....	52
Tablo 8.28. Deney 13. Pilin Delinmesi	52
Tablo 8.29. Deney 13 verileri.....	52
Tablo 8.30. Deney 14. Pilin Delinmesi	53
Tablo 8.31. Deney 14 verileri.....	53
Tablo 8.32. Deney 15. Pilin Delinmesi	54
Tablo 8.33. Deney 15 verileri.....	54
Tablo 8.34. Deney 16. Pilin Delinmesi	55

Tablo 8.35. Deney 16 verileri	55
Tablo 8.36. Deney 17. Pilin Delinmesi	56
Tablo 8.37. Deney 17 verileri	56
Tablo 8.38. Deney 18. Pilin Delinmesi	57
Tablo 8.39. Deney 18 verileri	57
Tablo 8.40. Deney 19. Pilin Delinmesi	58
Tablo 8.41. Deney 19 verileri	58
Tablo 8.42. Deney 20. Pilin Delinmesi	59
Tablo 8.43. Deney 20 verileri	59
Tablo 8.44. Deney 21. Pilin Delinmesi	60
Tablo 8.45. Deney 21 verileri	60
Tablo 8.46. Deney 22. Pilin Delinmesi	61
Tablo 8.47. Deney 22 verileri	61
Tablo 8.48. Deney 23. Pilin Delinmesi	62
Tablo 8.49. Deney 23 verileri	62
Tablo 8.50. Deney 24. Pilin Delinmesi	63
Tablo 8.51. Deney 24 verileri	63
Tablo 8.53. Deney 25. Pilin Delinmesi	63
Tablo 8.54. Deney 25 verileri	64
Tablo 8.55. Deney 26. Pilin Delinmesi	64
Tablo 8.56. Deney 26 verileri	65
Tablo 8.57. Deney 27. Pilin Delinmesi	65
Tablo 8.58. Deney 27 verileri	66
Tablo 8.59. Deney 28. Pilin Delinmesi	66
Tablo 8.60. Deney 28 verileri	67
Tablo 8.61. Deney 29. Pilin Delinmesi	67
Tablo 8.62. Deney 29 verileri	68
Tablo 8.63. Deney 30. Pilin Delinmesi	68
Tablo 8.64. Deney 30 verileri	69
Tablo 8.65. 2800 mAh. deneyleri	69
Tablo 8.66. 2400 mAh. % 70 SOC seviyelerinde pillerin gaz salımı	71
Tablo 8.67. 3600 mAh. % 80 SOC seviyesindeki pillerin gaz salımı	72
Tablo 8.68. 4800 mAh % 60 doluluk oranında pillerde gaz salımı	73
Tablo 9.1. Çalışmadan Elde Edilen Bulgular	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Pil Çeşitleri	3
Şekil 2.2. Lityum İyon Pillerin İç Yapısı ve Çalışma Prensibi	9
Şekil 2.3. Bir Lityum İyon Hücresinin Çalışma Şeması	10
Şekil 2.4. Lityum İyon Bataryalarda Çalışma Sıcaklıkları	11
Şekil 3.1. Batarya Yönetim Sistemi.....	15
Şekil 3.2. Batarya Yönetim Sisteminin Çalışma Prensibi.....	16
Şekil 3.3. Hücre Dengeleme Yöntemleri	17
Şekil 3.4. Batarya Alev Geciktirici Teknolojisi.....	21
Şekil 4.1. Lityum İyon Bataryalarda Termal Kaçak Süreci.....	23
Şekil 4.2. Termal Kaçağın Yaşanmasında Mekanik, Elektriksel ve Termal Etki	24
Şekil 6.1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar	31
Şekil 6.2. Hibrit Elektrikli Araç Yapısı	32
Şekil 6.3. Seri Hibrit Elektrikli Araç Yapısı	33
Şekil 6.4. Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı	33
Şekil 6.5. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı.....	34
Şekil 6.6. Kompleks Hibrit Elektrikli Araç Yapısı	34
Şekil 6.7. Tam Elektrikli Araç Yapısı.....	34
Şekil 6.8. Yakıt Pilli Elektrikli Araç Yapısı	35
Şekil 6.9. Menzil Genişletici Elektrikli Araç Yapısı	35
Şekil 7.1. Lityum İyon Hücre Yangınlarına Yol Açan Domino Etkisi.....	38
Şekil 7.2. Isıtılan Hücresinin Maksimum Sıcaklığı 650 °C.....	39
Şekil 7.3. Gaz Çıkışının ve Hücre Hacmi Artışının Etkileri.....	39
Şekil 7.4. Hücreler Soğudukça Kaydedilen Azalma.....	40
Şekil 8.1. 4800 mAh. % 60 SOC Gaz Salımı-Alevlenme-Sıcaklık Grafiği	74
Şekil 9.1. Sıcaklık-Zaman-SOC Grafiği	77



LİTYUM İYON BATARYALARDA MEYDANA GELEN TERMAL KAÇAK NEDENLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE GAZ SALIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Enerji yoğunluğu fazla olan lityum iyon bataryalar (LIB) çevre ve yakıt maliyeti vb. avantajlarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve küresel ısınma ile mücadele amacıyla elektrikli araçlar (EV) oldukça tercih edilmektedir. Lityum iyon bataryaların elektrikli araçlarda tercih edilmesi ile birlikte dikkat edilmesi gereken bazı güvenlik durumları ortaya çıkmıştır. Bataryaların hücrelerinde meydana gelebilecek ısı artışı, darbe etkisi, aşırı şarj ve deşarj, sıcaklık değişimleri, jet alevi veya radyan ısıya maruz kalma vb. faktörlere bağlı olarak termal kaçak (TR) oluşabilmekte, termal kaçak sonucu yangın ve patlamalar meydana gelebilmektedir. Elektrikli araçlarda arızalar olabileceği gibi günlük kullanımda insan kaynaklı yanlış kullanımlar sonucu da bazı problemler olabilmektedir. Bu problemler termal kaçak oluşturabilmektedir. Oluşan bu termal kaçak mekanik, elektriksel ve termal etki olarak sınıflandırılmaktadır. Tezin amacı bataryalarda meydana gelen gaz salımlarını, batarya yönetim sistemini, batarya termal yönetim sistemini ve tüm bu sistemlerin çalışma prensibini, çalışma mekanizmasını ve termal kaçak oluşum mekanizmasını parametrik olarak incelemektir. Konuyla ilgili literatür araştırması yapılmış olup yapılan literatür araştırması sonrası tez yazım aşamaları planlanmıştır. 18650 tipi cell boyutu lityum iyon pillerin kullanıldığı tez çalışmasında pilin dış etkenlerden alabileceği darbeler sonrası oluşabilecek termal kaçak durumu, gaz salımları ve sıcaklık değişimleri gözlemlenmektedir. % 0-60-70-80 SOC (pil doluluk oranı) seviyesinde 2400-2800-3600-4800 mAh. güçlerinde lityum iyon piller bir çivi vasıtasıyla delinerek sonuçları gözlemlenmiştir. H₂ (hidrojen), VOC (uçucu organik bileşikler), HCl (hidrojen klorür), % LEL (alt patlama sınırı) ve CO₂ (karbondioksit) salımını algılayan sensörlerin yer aldığı bu çalışmada sıcaklık değişimlerini gözlemlmek için termal kamera kullanılmaktadır. % 0 ve % 80 SOC seviyelerinde bazıları 2800 mAh. gücünde ve farklı türlerde 9 pil çeşitli dış etkenlere maruz bırakılarak gözlemlenmiştir. TR (termal kaçak) meydana gelme durumu pillerin SOC seviyesine göre değişiklik göstermektedir. % 60 SOC seviyesinde 4800 mAh. gücünde 9 ayrı pil delinerek verileri kaydedilmiştir. Bu pillerden hiçbirinde alevlenme gözlemlenmemiştir. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 177 °C olarak kaydedilirken gaz salımı 1-29 saniye aralığında gerçekleşmiştir. % 70 SOC seviyesinde 2400 mAh. gücünde 7 ayrı pil delinerek gözlemlenmiştir. Gaz salımı 2-18 sn. aralığında gerçekleşmiştir. Gazların salımı sensörler vasıtasıyla kaydedilmiştir. Pillerden 5 tanesi alev alırken 2 tanesinde alevlenme gözlemlenmemiştir. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 290 °C olarak kaydedilmiştir. % 80 SOC seviyesinde 3600 mAh. gücünde 8 ayrı pil delinerek gözlemlenmiştir. Gaz salımı 3-23 sn. aralığında gerçekleşmiştir. 7 pil alev alırken 1 tanesinde alevlenme olmamıştır. Ulaşılan max. sıcaklık 265 °C olarak kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde en düşük gaz salımı süresi 1. saniyede gerçekleşirken en yüksek pil sıcaklığı ise 325 °C olarak kaydedilmiştir. En yüksek sıcaklığın 325 °C olarak kaydedildiği bu pil 2800 mAh. gücünde ve % 80 SOC

seviyesindedir. 1. saniyede gaz salımına başlayan pillerden birinin sıcaklığı 177 °C diğerinin sıcaklığı 110 °C olarak gözlemlenmiştir ancak bu pillerde alevlenme olmamıştır. Diğer en düşük gaz salımı başlangıcı 3. saniyede gerçekleşmiştir. Bu pilin ulaştığı sıcaklık 262 °C olarak kaydedilirken pil 24. saniyede alev almıştır. Gaz salımı 7. saniyede başlarken pillerden biri 24. saniyede diğeri ise 29. saniyede patlama reaksiyonu göstermiştir. Gerçekleştirilen deney verileri literatür ile karşılaştırılarak lisansüstü tezi tamamlanmıştır. Lityum iyon batarya yangınlarının çıkmasını engelleyebilecek, termal kaçak yayılımını azaltacak veya durduracak etkenleri tespit edebilmek, oluşabilecek kayıp ve hasarı en aza indirerek elektrikli araçlarda güvenliğin artmasını sağlamak amacıyla büyük öneme sahiptir. Pillerin SOC seviyesi, pil kimyası, darbe yeri ve sayısı vb. birçok faktör termal kaçak sürecini etkilemektedir.



INVESTIGATION OF THERMAL RUNNING CAUSES IN LITHIUM-ION BATTERIES AND INVESTIGATION OF GAS RELEASE

SUMMARY

Lithium-ion batteries (LIB) are preferred due to their advantages and are used intensively in many areas including electric vehicles (EV). The main reason for the demand for these batteries with high energy density is that they are advantageous in terms of environment and fuel cost. Some safety problems can be experienced in lithium-ion batteries with high energy density, low weight, fast charging feature and low memory effect. Thermal runaway fires can occur as a result of external factors. In some extreme conditions, a large amount of chemical energy stored in a limited area can suddenly escape and turn into heat. It has been observed by researchers that fire accidents are usually triggered by various abuses (thermal, mechanical and electrical abuse) such as overheating, nail penetration, crushing, overcharging and discharging. The typical thermal runaway process occurs in the form of the breakdown of the solid electrolyte interface layer, the reaction of the electrode material with the electrolyte and the decomposition of the electrolyte. As a result of these exothermic reactions, the temperature of the battery can increase and a vicious cycle can occur that will lead to accidents such as fire etc. At the same time, flammable and toxic gas products released during the reaction process can cause sudden pressure increases, causing the battery to swell, create jet flames or even explode. Therefore, it is very important to detect thermal runaway formation in a timely manner. Since gas release occurs before smoke and fire are observed, detection of thermal runaway gases in LIBs can detect the fault at an early stage and prevent spreading. Overcharge and discharge times are an issue that must be taken into consideration due to the chemistry of these batteries. Because temperature ranges are important for LIBs. In cases where the battery temperature is high, the battery ages rapidly, while long discharge times shorten the cycle life. These situations are important for lithium-ion battery users and battery safety. Lithium-ion batteries come together to form batteries, and batteries come together to form cells. When the internal temperature of the cells reaches the range of 90 °C to 120 °C, decomposition may begin and the solid electrolyte interface layer initiates an exothermic reaction. The hydrocarbon electrolyte can decompose above 200 °C. Thermal runaway can start when the separator ruptures due to impact or puncture. Overcharging outside the specified charging specifications can cause dendrites to form on the coating or anode surface of the lithium-ion battery. These dendrites can eventually penetrate the separator and come into contact with the electrodes, causing a short circuit between the electrodes. Internal short circuits can start due to damage to the battery separator due to high charging current density, low temperature conditions, failure of the cathode and anode active materials, and precipitation of the electrolyte material, etc., while external short circuits can start due to high temperatures. Battery management systems are incorporated into batteries to ensure safe operation and management of batteries. The safety features of lithium-ion batteries depend on the physical shape of the cell (geometry, materials), its physical condition (state of charge, aging effects), how it is stressed (low or high temperature,

overcharge or overdischarge, heating), and preventive measures against thermal runaway (internal safety devices, cooling, limitation). Thermal runaway can be caused by a fault or by human misuse in daily use. The effects that may occur as a result of improper use can be divided into three groups. These are mechanical effects, electrical effects and thermal effects. In addition, heat release rate (HRR) is an important parameter for assessing the fire risk of the battery and electric vehicle. Lithium salts in the electrolyte of lithium-ion batteries can produce HCl during thermal runaway. CO release may occur due to compounds that cannot be fully burned. If the ideal combustion process is achieved, CO₂ release may begin. Organic solvents used in the battery content can turn into organic compounds. In line with this information, it is important to be able to monitor the gases that may be released during the thermal runaway process through sensors. Early detection of gases can increase the safety of the battery. Thesis writing stages were planned after the literature research. In the thesis study where lithium-ion batteries with a cell size of 18650 were used, thermal runaway, gas emissions and temperature changes that may occur after the impacts that the battery may receive from external factors were observed. Lithium-ion batteries with a capacity of 2400-2800-3600-4800 mAh at 0-60-70-80% charge rates were pierced with a nail and the results were observed. In this study, a thermal camera is used to observe the temperature changes of the LIB, which contains sensors that detect CO₂ (carbon dioxide), O₂ (oxygen), HCl (hydrogen chloride), CO (carbon monoxide), H₂ (hydrogen) and C₂H₄ (ethylene) emissions. It is of great importance to be able to determine the factors that can prevent lithium-ion battery fires, reduce or stop the spread of thermal runaways, minimize the loss and damage that may occur and increase safety in electric vehicles. Lithium salts in the electrolyte of lithium-ion batteries can produce HCl during thermal runaway. CO emissions may occur due to compounds that cannot be fully burned. If the ideal combustion process is provided, CO₂ emissions may begin. Organic solvents used in the battery content can turn into organic compounds. In line with this information, it is important to be able to monitor the gases that may be released during the thermal runaway process via sensors. Early detection of gases can increase battery safety. Therefore, safe management of batteries is very important to reduce the risk of fire and explosion. The charging rates of batteries are closely related to the thermal runaway process. When batteries are above an average of 60-70% SOC levels and the battery temperature starts to exceed 90 °C, the risk factor is high. In the experiments conducted, lithium-ion batteries with 2400-2800-3600-4800 mAh power and 18650 cell sizes at 0-60-70-80% SOC levels were pierced with a nail and the results were observed. 30 different batteries were pierced under the same environmental conditions. The onset of thermal runaway and gas emissions that may occur in the batteries were examined. It is known that fire occurs when flammable gases contained in lithium-ion batteries are released due to the impact effect due to their chemistry. In this study, the release of 6 different gases was detected and examined with sensors. As a result of the information obtained from the puncture of many batteries, it was observed that when thermal runaway started, gas emission started before the batteries caught fire. The ppm values reached by HCl, CO₂, O₂, CO, H₂, C₂H₄ and VOCs were recorded. Temperature measurements of the batteries that caught fire were made with a thermal camera. After the highest temperature reached was recorded, the batteries were observed for 20-30 minutes. Batteries whose temperatures started to drop were collected in a separate area and new battery drilling was started. 9 batteries with different characteristics, some with a power of 2800 mAh, were exposed to various external factors and observed at 0% SOC level. 9 batteries, each with a power of 4800 mAh and a level of 60% SOC, were punctured separately

and their data was recorded. No flame was observed in any of these batteries. The highest temperature reached by the batteries was 177 °C. Gas emission occurred in the range of 1-29 seconds. At 70% SOC level, 7 batteries with 2400 mAh. power were individually punctured and observed. Gas release occurred between 2-18 seconds. 5 types of gas release were recorded by the sensors. While 5 batteries caught fire, no flame was observed in 2 of them. The highest temperature reached by the batteries was recorded as 290 °C. At 80% SOC level, 8 batteries with 3600 mAh. power were individually punctured and observed. Gas release occurred between 3-23 seconds. While 7 batteries caught fire, no flame was observed in 1 of them. The highest temperature reached was recorded as 265 °C. It is envisaged that LIB fires can be prevented through early detection of the released gases and improvement studies to be carried out in the battery packs before the fires break out. A postgraduate thesis study was completed by comparing the experimental data with the literature. Impact angle, battery charge level, exposure of the internal structure of the battery to oxygen, puncture occurrence in one or two notes, etc. Many factors such as affect the thermal runaway process. The postgraduate thesis was completed by comparing the experimental data with the literature. 9 batteries, some of which were 2800 mAh. and different types, were observed by exposing them to various external factors at 0% and 80% SOC levels. TR formation varies according to the SOC level of the batteries. At 60% SOC level, 9 separate batteries with 4800 mAh. were pierced and their data was recorded. No flame was observed in any of these batteries. The maximum temperature reached by the batteries was recorded as 177 °C. Gas release occurred in the range of 1-29 seconds. At 70% SOC level, 7 separate batteries with 2400 mAh. were pierced and observed. Gas release occurred in the range of 2-18 seconds. The release of gases was recorded by sensors. While 5 of the batteries caught fire, 2 did not. The maximum temperature reached by the batteries was recorded as 290 °C. 8 separate batteries with a capacity of 3600 mAh. at 80% SOC level were observed by piercing. Gas release occurred in the range of 3-23 sec. While 7 batteries caught fire, 1 did not catch fire. The maximum temperature reached was recorded as 265 °C. Being able to determine the factors that can prevent lithium-ion battery fires, reduce or stop the spread of thermal runaway, is of great importance in order to minimize the possible losses and damages and increase the safety in electric vehicles. Many factors such as the angle of impact on the batteries, the SOC level of the battery, the contact of the battery chemistry with the air, the location and number of impacts, etc. affect the thermal runaway process. In the experiments conducted, the lowest gas release period occurred in 1 second, while the highest battery temperature was recorded as 325 °C. One of the batteries that started releasing gas at the 1st second was observed to have a temperature of 177 °C and the other at 110 °C, but no flame occurred in these batteries. The other lowest gas release started at the 3rd second. The temperature reached by this battery was recorded as 262 °C, and the battery caught fire at the 24th second. The battery with the highest temperature recorded as 325 °C has a power of 2800 mAh and an SOC level of 80%. While gas release started at the 7th second, one of the batteries showed an explosion reaction at the 22nd second, and the other at the 29th second. There was no flare-up in batteries at 0% level. There was no flare-up in batteries at 60% level. Only HCl release was observed in these batteries. The highest ppm value of H₂ in batteries at 70% level was observed as 349. The highest ppm value of H₂ in batteries at 80% level was recorded as 227 ppm.



1. GİRİŞ

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan lityum iyon bataryaların (LIB) talep görmelerinin başında çevresel faktörü ve yakıt maliyeti açısından avantajlı olması gelmektedir [1]. LIB' ler bu avantajlarından dolayı pil teknolojisini kullanan birçok alanda ve özellikle elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2,3]. Önemli bir güç kaynağı olan LIB' lerin avantajlarının yanında yangın riski gibi güvenlik problemleri de bulunmaktadır [4,5]. Bazı aşırı koşullarda, sınırlı alanda depolanan büyük miktardaki kimyasal enerji aniden dışarı çıkarak ısıya dönüşebilir [6]. Yangın kazalarının genellikle aşırı ısınma [7], çivi penetrasyonu [8], ezilme [9], aşırı şarj ve deşarj [10] gibi çeşitli kötüye kullanımlar (termal, mekanik ve elektriksel kötüye kullanım) sonucu tetiklendiği gözlemlenmiştir [11]. Tipik termal kaçak süreci, katı elektrolit ara yüzey (SEI) katmanının parçalanması, elektrot malzemesinin elektrolitle reaksiyonu [12] ve elektrolitin ayrışması şeklinde gerçekleşmektedir [13]. Bu ekzotermal reaksiyonlar neticesinde pilin sıcaklığı yükselerek geri dönüşü olmayan kazalara yol açacak bir kısır döngü oluşturabilir. Aynı zamanda reaksiyon sürecinde açığa çıkan yanıcı ve zehirli gaz ürünleri, basınçta keskin bir artışa neden olarak pilin şişmesine [14], jet alevleri oluşturmaya hatta patlamasına neden olabilir [15]. Bu nedenle termal kaçak oluşumunun zamanında tespit edilmesi çok önemlidir. Gaz salımı duman ve yangının gözlemlenmesinden daha erken gerçekleştiği için LIB' deki termal kaçak gazlarının tespiti, arızanın erken aşamasında fark edilerek yayılmasını önleyebilir [16,17]. Yapılacak çalışmalar sonucu erken uyarı sistemleri geliştirilerek yangın önleme mekanizmalarının devreye girmesi kayıpların azaltılabilmesi adına önem arz etmektedir.

1.1. Tezin Kapsamı

LIB' lerde oluşabilecek termal kaçak sonucu meydana gelen gaz salımının deneysel olarak incelenmesi, verilerin elde edilmesi ve literatür ile karşılaştırma yapılması planlanan tez çalışmasında LIB' lerin güvenlik, performans ve çevresel etkiler açısından daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla teorik ve deneysel bir analiz sunmayı hedefler.

1.2. Tezin Amacı

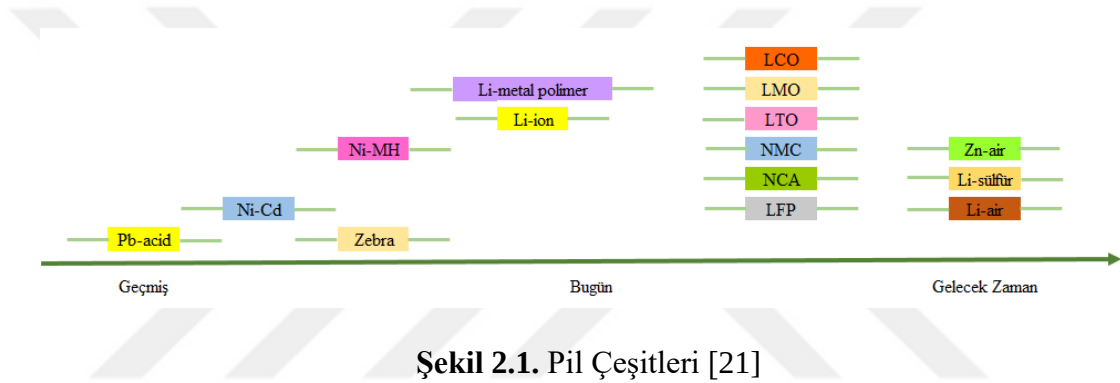
LIB güvenliği, verimliliği ve performansını etkileyen gaz salımı olgusunun nedenlerini, etkilerini ve çözümlerini anlamak ve açıklamak önemlidir. Tez çalışmasının amacı gaz salımına neden olan kimyasal reaksiyonları ve çevresel faktörleri analiz etmek, gaz salımının batarya güvenliği, yangın riski, patlama gibi olumsuz etkiler üzerindeki potansiyel etkilerini incelemektir. Gaz salımını tespit edebilmek için kullanılabilecek yöntem ve teknolojilerin geliştirilmesi, bu süreçlerin izlenebilirliğinin sağlanması ve bu doğrultuda iyileştirme çalışmaları yapılabilmesi amacını taşımaktadır.

1.3. Literatür Taraması

LIB' lerde gaz salımı konusundaki mevcut bilgileri toplamak ve analizini gerçekleştirmek amacıyla literatür taraması gerçekleştirilmektedir. Literatürde yer alan gaz algılama teknolojileri, modelleme ve simülasyonlar ile ilgili yapılan araştırmalar, bataryaların güvenliğini arttırmaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Bu araştırmalar, gaz salımının batarya performansı, güvenliği ve çevresel etkiler açısından önemini vurgulamakta ve daha güvenli verimli batarya teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

2. PİLLERİN SINIFLANDIRILMASI

Piller enerji depolayan ve bu depolama işlemini kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren birimlerdir [18]. Çeşitli şekillerde (AC, DC vb.) birbirine bağlanan piller pil gruplarını oluşturmaktadır [19]. Batarya olarak adlandırılan bu gruplar da bir araya gelerek hücreleri oluşturmaktadır. Bir batarya bir adet hücreden oluşabileceği gibi on binlerce hücreden de oluşabilmektedir. Piller sınıflandırılırken şarj edilebilen ve edilemeyen piller olarak adlandırılırlar [20]. LIB' ler şarj edilen piller sınıfındadır. Pil çeşitleri Şekil 2.1' de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Pil Çeşitleri [21]

2.1. Kurşun Asit Piller (Pb-Acid)

En eski ve yaygın olarak kullanılan şarj edilebilir batarya teknolojilerinden biridir. Sağlam, dayanıklı, özgül gücü yüksek ve maliyeti düşük olan bu pillerin ağırlığının fazla, enerji yoğunluğunun düşük ve yaşam ömrünün kısa olması dezavantajıdır.

2.2. Nikel Çinko Piller (Ni-Zn)

Yüksek enerji yoğunluğu, çevre dostu özellikleri, hızlı şarj edilebilme ve düşük maliyet avantajları arasındadır. Genellikle soğuk koşullara karşı dayanıklılığı olan bu pillerin çevrim ömrünün kısa olması nedeniyle elektrikli araçlarda kullanımına pek rastlanmamaktadır.

2.3. Nikel Kadmiyum Piller (Ni-Cd)

Dayanıklılıkları sebebiyle yüksek akım kapasite gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Uzun ömürlü olmaları avantaj iken çevresel etkileri, uzun şarj süreleri,

hafıza etkisi, düşük enerji yoğunluğu ve kullanım zorlukları dezavantajlı olduğu noktalarıdır.

2.4. Nikel Metal Hidrit Piller (Ni-MH)

Modern batarya teknolojilerinin öncülerinden biri olan bu piller kurşun, kadmiyum veya kobalt gibi toksik ve çevreye zarar veren malzemeler içermezler. Lityum iyon piller kadar yüksek enerji yoğunluğuna sahip değildirler. Yüksek güç çıkışı ve düşük iç direnç sahip olduklarından dolayı yüksek akım gerektiren uygulamalarda tercih edilebilirler. Dayanıklı ve güvenlik özellikleri yüksek olan bu pillerin maliyet, kendi kendine deşarj ve hafıza etkisinin olması dezavantajları arasında yer almaktadır.

2.5. Zebra Piller

İçeriğinde soydum-nikel klorür (Na-NiCl_2) bulunan bu piller yüksek sıcaklıkta çalışırlar. Elektrot malzemeleri sodyum ve nikel klorürdür. Katot olarak sodyum, anot olarak nikel klorür kullanılmaktadır. Diğer pillere kıyasla maliyeti düşüktür ve çevre dostu olarak bilinirler. Güç yoğunluğu, özgül enerjisi ve çalışma sıcaklık aralığı yüksek olan bu pillerin özgül gücünün düşük olması dezavantajını oluşturmaktadır.

2.6. Çinko Hava (Zn-Air) Piller

Kimyasal enerji depolama sistemleri arasında yer alan ve havadaki oksijenle enerji üreten pillerdendir. Yüksek enerji yoğunluğu, çevre dostu, düşük maliyet, uzun ömür ve yüksek deşarj kapasitesi avantajlarını oluşturur. Çevresel koşullardan etkilenen bu pillerin düşük güç çıkışı, fazla ağır ve diğer pillere kıyasla sınırlı şarj edilebilir olmaları dezavantajını oluşturur. Genellikle düşük güç tüketimi gerektiren cihazlar için tercih edilmektedir.

2.7. Lityum Kobalt Oksit Piller (LCO)

Lityum iyon pillerin ilk geliştirilen ve en yaygın kullanılan türlerinden biridir. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj ve deşarj verimliliği, düşük şarj ve deşarj döngüsü avantajlı olduğu alanlardır. Ancak içeriğinde yer alan kobalt malzemesinden dolayı yüksek maliyet, çevresel etkiler, aşırı yüksek şarj hızı ve ısı karşısında oluşturabileceği kısa devre durumu dezavantajını oluşturmaktadır.

2.8. Lityum Manganez Oksit Piller (LMO)

Güvenlik özellikleri, yüksek akım sağlayabilen, çevre dostu ve daha uygun maliyetleriyle bilinen bu pillerin iç direnci düşüktür. Diğer lityum iyon pillerle kıyaslandığında daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler. Kobalt ve nikel gibi maliyetli malzemelere sahip olmadıklarından dolayı daha ekonomiktirler. Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum pillerle karıştırıldıklarında elektrikli araçlarda kullanılabilirler.

2.9. Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Piller (NCA)

Avantajları arasında enerji ve güç yoğunluğunun fazla olması yer alan bu piller dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir lityum iyon pil türüdür. Kobalt ve alüminyum gibi malzemelerin maliyet ve çevresel etkileri dezavantajlarını oluşturmaktadır.

2.10. Lityum Nikel Manganez Kobalt (NMC)

Yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür, çekiş özelliğinin fazla olması, güvenlik vb. özellikleri nedeniyle elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Maliyet ve çevresel etkileri dezavantajlarından bazılarıdır.

2.11. Lityum Titanat Oksit Piller (LTO)

Hızlı şarj, güvenlik ve uzun ömür ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilirler. Düşük enerji yoğunluğu nedeniyle daha düşük kapasite gereksinimlerine sahip uygulamalarda kullanılan bu pillerin güç yoğunluğu yüksektir ve düşük sıcaklıklarda da düşük performans gösterirler.

2.12. Lityum Demir Fosfat (LFP)

Diğer lityum iyon pillere kıyasla daha stabil ve güvenli bir yapıya sahiptirler. Uzun ömürlü, çevre dostu, düşük enerji yoğunluğuna sahip olan bu piller yüksek sıcaklık karşısında da iyi performans gösterirler. Maliyeti düşük olan bu pillerin güç yoğunluğunun fazla ve şarj süresinin kısa olmasından dolayı elektrikli araçlarda kullanımı tercih edilmektedir.

2.13. Lityum İyon Polimer Piller (LiPo)

Hafif ve esneklik açısından avantajlı olan bu pillerin özellikle ince ve hafif tasarımlar gerektiren cihazlarda kullanımı tercih edilmektedir. LIB'lerin aksine sıvı elektrolit yerine polimeri elektrolit olarak kullanan bu pillerin güvenliği ve elektriksel iletkenliği daha yüksektir. Düşük enerji yoğunluğu, ısı hassasiyeti, karmaşık şarj ve güvenlik gereksinimleri, yüksek maliyet ve kısa ömür dezavantajlı olduğu özellikleridir.

2.14. Lityum Sülfür Piller (LiS)

Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj kapasitesi, hafiflik, düşük maliyet ve çevre dostu özellikleri avantajları arasındadır. Kısa ömür, düşük verimlilik ve kapasite dezavantajlı olduğu noktalarıdır. Katot olarak sülfür kullanılan bu pillerde hücre gerilimi düşüktür.

2.15. Lityum Hava Piller (Li₂O₂)

Yüksek enerji yoğunluğu, çevre dostu bir teknoloji olması, hafiflik, düşük maliyet avantajlı olduğu noktalarıdır. Düşük döngüsel stabilite ve kısa ömür, düşük elektriksel iletkenlik dezavantajlarından bazılarıdır. Havadaki oksijeni kullanarak oluşturulan bu pillerin elektrikli araçlarda kullanılması ekonomik açıdan avantajlı olabilir. Gelecekte daha verimli, dayanıklı ve uzun ömürlü hale gelmesi için araştırmaların devam ettiği bilinmektedir.

Yukarıda bahsedilen pil çeşitlerinin özellikleri Tablo 2.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Pillerin Teknik Özellikleri [21]

Pil Türü	Formülü	Nominal Enerji Voltajı (volt)	Şarj Yoğunluğu (Wh/kg)	Şarj Kapasitesi (mAh./g.)	Çevrim Ömrü	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Lityum Kobalt Oksit	LiCoO ₂	3.7	150-200	150-200	300-500	0, +60
Lityum Mangan Oksit	LiMn ₂ O ₄	3.7	100-120	100-150	500-1000	0, +50
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum	LiNiCoAlO ₂	3.6-3.7	200 +	150-200	800-2000	-20, +60
Lityum Nikel Mangan Kobalt	LiNiMnCoO ₂	3.6-3.7	150-200	150-200	1000-2500	-20, +60
Lityum titanat oksit	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	2.4-2.5	90-120	175	3000-7000	-30, +65
Lityum demir fosfat	LiFePO ₄	3.2-3.3	90-120	150-170	2000-5000	-20, +60
Lityum iyon polimer	LiPo	3.7	150-200	500-10000	300-500	-20, +70

Tablo 2.1. (Devamı). Pillerin Teknik Özellikleri

Lityum sülfür	Li-S	2.1-2.3	500	1000-2000	300-500	-60, +60
Lityum hava	Li-Air	2.0-2.5	500-1000	1000	100-200	0, +60
Lityum iyon	Li-Ion	3.6-3.7	150-200	50000-100000	500-1000	-20, +65
Kurşun Asit	PbO ₂	2.0	30-50	100	300-500	-15, +50
Nikel Kadmiyum	Ni-Cd	1.2	40-60	600-1000	500-1000	-20, +50
Nikel Metal Hidrit	NiMh	1.2	60-120	600-3000	500-1000	-20, +60
Zebra	NaNiCl ₂	2.58	150-200	30000-150000	2000	+245, +350
Çinko-Hava	ZnO ₂	1.4-1.6	300-400	500-1500	500-1000	-10, +55

Tablo 2.2. Pillerin Avantaj ve Dezavantajları

PİL ADI	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Kurşun Asit (Pb-Acid)	Maliyeti düşüktür. Özgül gücü yüksektir. Sağlamlık ve dayanıklılığı yüksektir.	Bakım maliyeti yüksektir. Yaşam ömrü kısadır. Özgül enerjisi düşüktür. Geri dönüşüm maliyeti yüksektir. Ağırlığı fazladır.
Nikel Çinko (Ni-Zn)	Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Çevre dostudur. Hızlı şarj özelliği vardır. Maliyeti düşüktür.	Soğuk karşısında dayanıklıdır. Ömrü kısadır.
Nikel Kadmiyum (Ni-Cd)	Uzun ömürlüdür.	Pahalıdır. Zehirlidir. Çevresel etkisi vardır. Hafıza etkisi vardır. Şarj süresi uzundur. Enerji yoğunluğu düşüktür.
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	Enerji yoğunluğu yüksektir. Güvenlidir. Uzun ömürlüdür. Çevre dostudur. Güç çıkışı yüksektir.	Fiyatı yüksektir. Kendi kendine deşarjı yüksektir. Hafıza etkisi vardır. Düşük enerji yoğunluğuna sahiptir.
Zebra	Çalışma sıcaklık aralığı geniştir. Özgül enerjisi yüksektir. Güç yoğunluğu fazladır. Maliyeti düşüktür. Çevre dostudur.	Özgül gücü düşüktür.
Çinko-Hava (Zn-Air)	Özgül enerjisi yüksektir. Hacimsel enerji yoğunluğu yüksektir. Uzun ömürlüdür. Maliyeti düşüktür. Yüksek deşarj oranına sahiptir.	Nominal voltağı düşüktür. Çevrim ömrü kısadır. Ağırlığı fazladır.
Lityum Kobalt Oksit (LCO)	Enerji yoğunluğu yüksektir. Nominal voltağı yüksektir. Yüksek şarj ve deşarj verimliliğine sahiptir. Düşük şarj ve deşarj döngüsüne sahiptir.	Güvenlik özellikleri düşüktür. Maliyeti yüksektir. Yaşam ömrü kısadır. Çevresel etkisi vardır. Aşırı yüksek şarj hızına sahiptir.

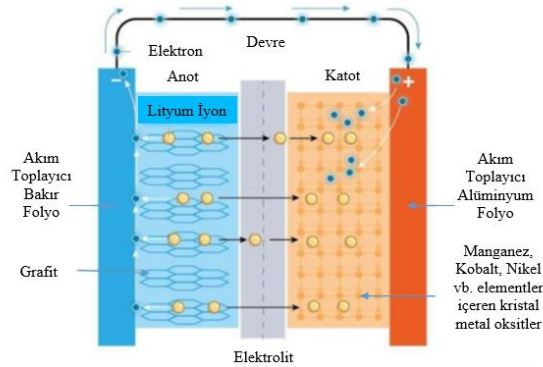
Tablo 2.3. (Devamı). Pillerin Avantaj ve Dezavantajları

Lityum	Güvenlik özellikleri yüksektir.	Çevrim ömrü düşüktür.
Manganez	Yüksek akım sağlar.	Düşük enerji yoğunluğuna sahiptir.
Oksit (LMO)	Çevre dostudur. Nominal voltajı yüksektir. Maliyeti düşüktür.	
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	Özgül enerjisi yüksektir. Özgül gücü yüksektir.	Çevrim ömrü düşüktür. Güvenlik özellikleri düşüktür. Maliyeti yüksektir. Çevresel etkisi vardır. Kararlılık oranı düşüktür. Maliyeti yüksektir. Çevresel etkisi vardır.
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NCM)	Özgül enerjisi yüksektir. Özgül gücü yüksektir. Verimliliği yüksektir. Güvenlik özellikleri yüksektir. Uzun ömürlüdür.	
Lityum Titanat Oksit (LTO)	Özgül gücü yüksektir. Çevrim ömrü yüksektir. Yüksek güvenliğe sahiptir. Hızlı şarj özelliği vardır.	Özgül enerjisi düşüktür. Hacimsel enerji yoğunluğu düşüktür. Maliyeti yüksektir. Düşük sıcaklıklarda düşük performans gösterir. Özgül enerjisi düşüktür.
Lityum Demir Fosfat (LFP)	Çevrim ömrü yüksektir. Özgül gücü yüksektir. Maliyeti düşüktür. Uzun ömürlüdür. Çevre dostudur. Şarj süresi kısadır.	
Lityum İyon Polimer (LiPo)	Hafiftir. Esnektir. Güvenlik özellikleri yüksektir. Elektriksel iletkenliği yüksektir.	Daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Isı hassasiyeti vardır. Karmaşık şarj ve güvenlik gereksinimlerine sahiptir. Maliyeti yüksektir. Ömrü kısadır. Geri dönüşüm zorlukları mevcuttur.
Lityum Sülfür (Li-S)	Özgül enerjisi yüksektir. Hacimsel enerji yoğunluğu yüksektir. Çalışma sıcaklık aralığı geniştir. Maliyeti düşüktür. Çevre dostudur.	Nominal voltajı düşüktür. Kendi kendine deşarj oranı yüksektir. Kısa ömürlüdür. Düşük verimlilik ve kapasiteye sahiptir.
Lityum Hava (Li-Air)	Teorik özgül enerjisi yüksektir. Çevre dostudur. Hafiftir. Maliyeti düşüktür.	Çevrim ömrü düşüktür. Güvenlik özellikleri düşüktür. Elektriksel iletkenliği düşüktür.
Lityum-İyon (Li-ion)	Hacimsel enerji yoğunluğu yüksektir. Özgül enerjisi yüksektir. Özgül gücü yüksektir. Nominal voltajı yüksektir. Uzun ömürlüdür. Hızlı şarj özelliği mevcuttur. Düşük hafıza etkisine sahiptir. Hafif ve kompakt bir yapıdadır.	Isı ve aşırı şarj sorunları mevcuttur. Depolama koşulları önemlidir.

Elektrikli araçlarda kullanımı tercih edilen, enerji yoğunluğu yüksek, ağırlığı düşük, hızlı şarj özelliğine sahip, çevre dostu ve hafıza etkisi düşük olan lityum iyon piller bu tez çalışmasında incelenmekte olup özellikleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.16. Lityum İyon Piller

Kullanımı en çok tercih edilen pillerdir. Çünkü yüksek enerji ve güç yoğunluğuna, düşük ağırlığa ve hızlı şarj özelliğine sahip olan bu piller hafif, ucuz ve toksik olmayan özelliktedir [22]. Katot, anot, ayırıcı ve elektrolit bulunan bu pillerde anot ve katot malzemeleri alüminyum ve bakır folyo akım toplayıcıları üzerine biriktirilir. Her pil paketinin özellikleri açısından avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [23]. Elektrolit yansıma iyonlarının elektrotları arasında hareketi sağlarken, ayırıcı iki elektrot arasındaki kısa devreyi önleyen ancak iyon transferine izin veren anot ve katot içeriğini sağlar. İnterkalasyon işlemi sırasında iyonlar anottan hareket ederek katot kristallerinin tabakaları arasında bulunan boşluklara girer. Şarj süreleri sonrasında iyonlar pilin pozitif yönünde katottan hareket eder ve anoda girer. İlk şarj sırasında, birleştirilmiş yansıma iyonları hemen yansıtmanın çözücüsü ile tepkimeye girer. Bu işlem sırasında Katı-Elektrolit Ara Yüzey (SEI) tabakası üzerinde bir katman oluşur. SEI' nin istikrarı, lityum iyon pillerin güvenliği ve yapısı için kullanılan bir faktördür.

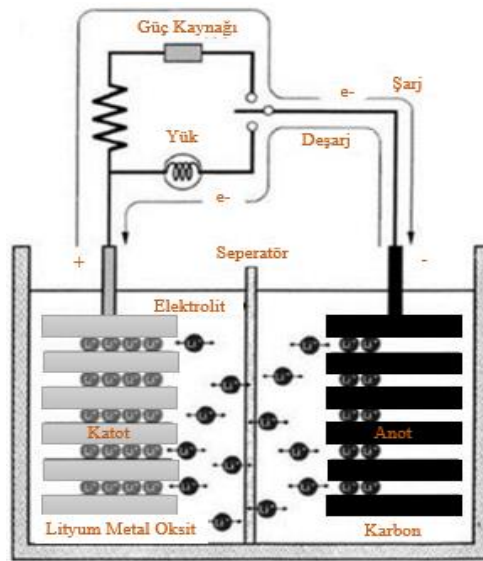


Şekil 2.2. Lityum İyon Pillerin İç Yapısı ve Çalışma Prensibi [24]

Lityum iyon bataryaların adı katot grubu tarafından belirlenir. Yüksek nikel oranı kullanılması katot malzemesinin özelliklerini olumlu yönde etkilerken termal kararlılık açısından olumsuz etkiler. Anotları için en çok tercih edilen malzeme grafitir. Lityum titanat ve silikon gibi diğer malzemeler, enerji ve güç tüketimini azaltan özellikte ve daha düşük negatif voltajlarda olduğundan, hızlı şarj cihazları ve enerji tüketim değerinin daha az önemli olduğu cihazlarda tercih edilmektedir [25].

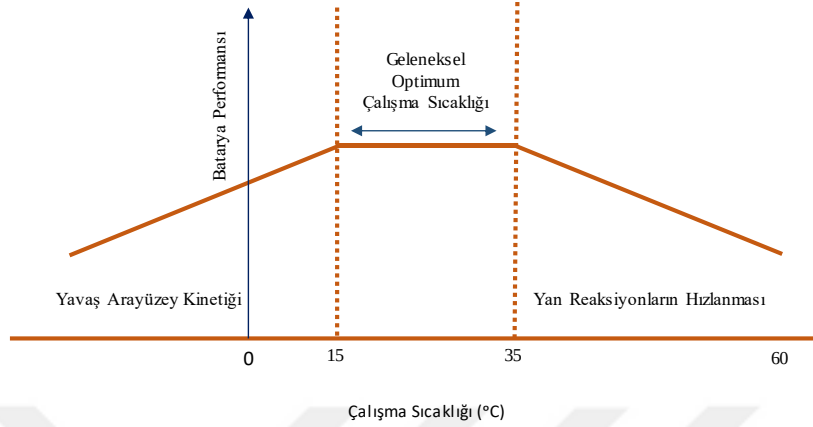
Yeni anot malzemeleri geliştirilirken ve ticarileştirilmeden önce; kapasite, iletkenlik, hacim, dendrit üretimi ve SEI tabakalarının stabilitesi gibi özellikler dikkate alınmalıdır [26].

Lityum iyon bataryaların güvenliğini arttırmak için araştırmacılar anot ve katot arasındaki lityum iyon geçişini ve kimyasal reaksiyonu kesebilecek bir termal kapatma ayırıcı tasarlamışlardır. Darbe akımı teknolojisi [27], faz değiştiren malzemeler [28], alev geciktirici faz değiştiren malzeme ile birleştirilmiş aerojel keçe [29,30], batarya yönetim sistemi (BYS) ve batarya termal yönetim sistemi (BTYS) [31] bu tasarımlardan bazılarıdır. Güvenlik havalandırması, pozitif sıcaklık katsayısı (PTC) cihazı, termik sigortalar ve diğer devre kesiciler lityum iyon bataryaların yangından korunması için tasarlanmıştır. Bu cihazlar bataryaların güvenliği için kullanılırken diğer taraftan bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bulundurdukları inert ve elektrokimyasal inaktif bileşenler pil modüllerinin yükünü arttırmaktadır. Elektrolit, ayırıcı ve elektrotlar arasındaki hücreleri doldurur. Elektrolit içindeki organik çözücüler lityum metali veya lityumlu karbon anotları ile reaksiyona girer. Anot ve katot seperatörle birbirinden ayrılmıştır. Ayırıcı, elektrotlar arasında yayılan iyonların yayılmasına izin verirken iki elektrot arasında oluşan kısa devreleri dışarı atar. Ayırıcı polietilen (PE), polipropilen (PP) veya polietilen ve polipropilen laminatları gibi mikro gözenekli poliolefin filmlerden yapılır. Poliolefinler düşük erime noktası ve aşırı sıcaklık durumu karşısında gözenekli yapıda olmasından kaynaklı hücreleri kapatmak için termal bir sigorta olarak kullanılırlar [32].



Şekil 2.3. Bir Lityum İyon Hücresinin Çalışma Şeması [33]

Sıcaklık aralıkları LIB' ler için önemlidir. Pil sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda pil hızlı yaşlanırken uzun deşarj süreleri çevrim ömürlerini kısaltır. Aşırı şarj ve deşarj durumu LIB' lerin kimyası gereği önemlidir.



Şekil 2.4. Lityum İyon Bataryalarda Çalışma Sıcaklıkları

Lityum iyon bataryalar kese, prizmatik ve silindirik şekilde olabilirler. Tez çalışmasında 18650 cell boyutu silindirik lityum iyon pil modeli kullanılmaktadır. LIB' lerde dış etkenlerden kaynaklı pil sıcaklığında artış olabilmekte ve bu artışla beraber termal kaçak süreci başlayabilmektedir. Artan sıcaklık nedeniyle pilin içindeki seperatör (poliolefin) eriyebilir ve kısa devre oluşabilir [34]. Kontrolsüz iç ısı artışı, termal kaçağın temeli olan zincirleme kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanabilir. Termal kaçak sırasında üretilen ısı esas olarak kimyasal reaksiyonlardan ve kütle transferinden kaynaklanır. Toplam ısıyı Bernardi denklemi' ne göre hesaplamak için denklem (2.1) formüle edilebilir. Termal kaçak başladıktan sonra ya hücre ya da güvenlik valfi patlayarak zehirli gazlar salınmaktadır. Reaksiyonlar sırasında açığa çıkan oksijen, elektrolit ve seperatörlerin yangına karışmasına neden olur. Elektrolit ve seperatörün toplam ağırlığı düşüktür. Ancak yangın sırasında ısı salım oranının (HRR) yaklaşık % 80' i bu maddelerin yanmasından kaynaklanır [35]. Termal kaçağın başlaması ile birlikte sıcaklık 1000 °C' nin üzerine çıkabilir, yanıcı ve zehirli gazlar salınabilir [36].

$$Q = q_{rev} + q_{irev} + q_{de} \quad (2.1.)$$

Q_{de}: Termal kaçak oluşumu sırasında malzeme deformasyonundan gelen ısıdır.

q_{de} denklem (2)' deki "Hatchard formülü" ile hesaplanabilir:

$$q_{de} = v\Delta H_C n A e \left(\frac{-Ea}{RT} \right) \quad (2.2.)$$

V : Batarya hacmi (m³)

ΔH : Elektrokimyasal reaksiyon ısısı (KJ/mol)

C : Reaksiyon içindeki maddelerin konsantrasyonu (mol/L)

n : Sırası

A : Arrhenius denkleminde ön-eksponansiyel

Ea : Reaksiyon aktivasyonu için enerji (KJ/mol)

R : İdeal gaz sabiti değeri

T : Reaksiyondaki sıcaklık

Reaksiyon ısısı qrev denklemdeki gibi hesaplanabilir:

$$q_{rev} = \frac{Q}{F \times 3600 \times I} \quad (2.3.)$$

Q : Batarya içinde üretilen toplam ısı (J)

F : Faraday sabit değeri 96,484.5 (C/mol)

I : Akım (A)

Tersinmez ısı qrev için hesaplama formülü denklem (4)' te formüle edilmiştir:

$$q_{irev} = Q_p (\text{potansiyel ısı üzeri}) + Q_j (\text{joule ısı}) \quad (2.4.)$$

Aşırı potansiyel ısı için hesaplama formülü denklem (5)' te formüle edilmiştir:

$$Q_p = I^2 R_p = I^2 (R_0 + R_1 + R_2) \quad (2.5.)$$

I : Akım (A)

Rp : Polerizasyon iç direnç (Ω)

R0 : Ohmik polarizasyon iç direnç (Ω)

R1 : Konsantrasyon polarizasyon iç direnç (Ω)

R2 : İç direncin elektrokimyasal polarizasyonu (Ω)

Joule ısısı için hesaplama formülü denklem (6)' da formüle edilmiştir:

$$Q_J = I^2 R_\Omega \quad (2.6.)$$

I : Akım (A)

$R\Omega$: Bataryanın iç direnci (Ω)

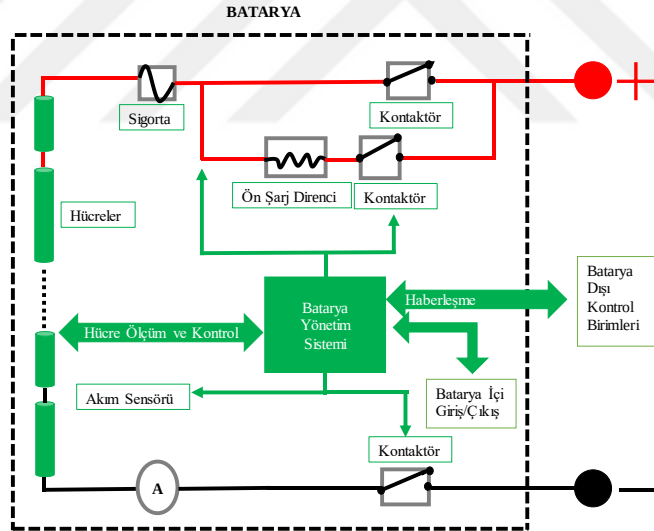




3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ

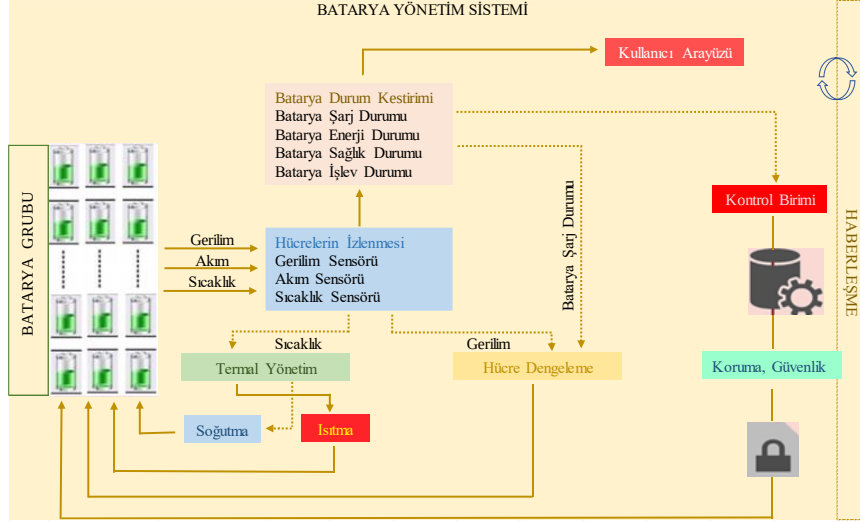
3.1. Batarya Yönetim Sistemi

Yüksek hücre sayısına sahip olan batarya yönetim sistemi bataryanın güvenli ve istenildiği şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Otomotivde kullanılan bataryaların en önemli bileşeni batarya yönetim sistemidir. Karmaşık yapıya sahip olan bataryaların batarya yönetim sistemi ve batarya termal yönetim sistemi (BTYS) için hücreler ile birlikte birçok güvenlik sistemi de bulunmaktadır. Elektriksel bağlantı parçaları, mekanik bağlantı parçaları, güvenlik ve termal koşullandırma elemanları bu güvenlik sistemlerinden bazılarıdır. Sistem birçok elektronik birim ve yazılımlardan oluşur. Bu karmaşık yapının yönetimi batarya yönetim sistemi tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 3.1. Batarya Yönetim Sistemi

Batarya yönetim sisteminin görevi bataryanın güvenli ve tam performans ile kullanımını sağlamaktır. Bataryanın güvenlik kurallarına uymasını sağlayan sistemdir. Bataryalar batarya yönetim sistemi tarafından iyi yönetildikçe yüksek performans gösterirler. BYS' nin bataryayı güvenli çalıştırması dışında güç (şarj/deşarj) ve bilgi aktarımlarını da gerçekleştirmesi gerekir.



Şekil 3.2. Batarya Yönetim Sisteminin Çalışma Prensibi

3.1.1. Görevleri

Elektrikli araçlarda bulunan batarya yönetim sistemleri birçok görevi yerine getirir. Gün geçtikçe batarya yönetim sistemleri karmaşık bir hale gelmekte olup gerçekleştirdiği görevler artmaktadır. Bir batarya yönetim sisteminin görevi ihtiyaca göre çok farklı türde ve sayıda olabilmektedir.

Tablo 3.1. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

İzleme	Koruma	Şarj ve Deşarj Yönetimi	Teşhis ve Kestirim	Veri Yönetme
Paket Gerilimi	Gerilim Sınırları	Şarj Kontrolü	Kapasite Durumu	Sayısal Haberleşme
Paket Akımı	Akım Sınırları	Deşarj Kontrolü	Sağlık Durumu	Telemetri
Hücre Gerilimleri	Kısa Devre	Dengeleme	Fonksiyon Durumu	Kayıt Tutma
Sıcaklıklar	Sıcaklık Sınırları	Ön Şarj	İç Direnç	-
İnterlock	İzolasyon	-	Kullanılabilir Güç ve Kalan Ömür	-

3.1.1.1. İzleme

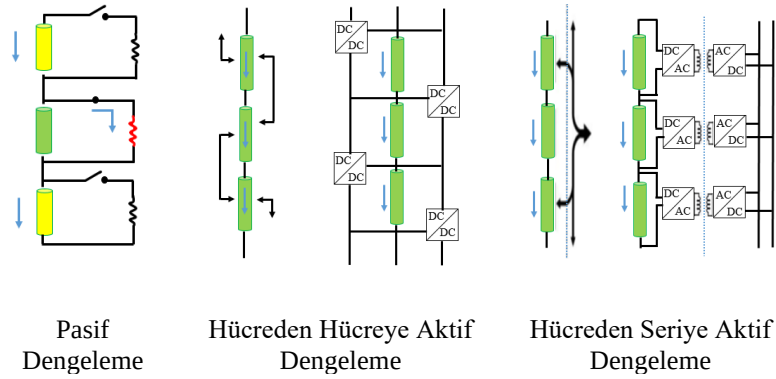
En temel görevlerinden biri bataryayı izleme görevidir. BYS ölçümler yaparak diğer görevlerini yürütebilir. Batarya içerisinde hücre, ortam ve soğutma gazı sıcaklığı, hücrelerin ayrı ayrı ve toplam gerilimleri, akım, batarya paketinin izolasyon direnci, ortamın nemi, konnektörlerin ve kapakların konumu vb. ölçümleri yapabilmektedir. Bütün hücrelerin gerilimlerini yüksek doğrulukla ölçerek bu hücreleri şarj ve deşarj işlemleri sırasında güvenli çalışma alanında tutabilir. Bataryanın kapasite hesabı için akımın doğru ölçülmesi önemlidir.

3.1.1.2. Koruma

BYS bataryayı yöneterek doğru kullanılmasını sağlamaktadır. Ortam sıcaklığının değişmesi, aşırı akım çekilmesi, batarya kapağının açılması vb. durumlar sonucunda yaşanabilecek olumsuzlukları engellemek için BYS bataryayı yükten ayırarak koruma görevini yerine getirir.

3.1.1.3. Hücre dengeleme ve şarj-deşarj yönetimi

Şarjdeşarj durumunun değişkenliği söz konusu olduğunda hücre dengeleme işlemi gerçekleşir. Bu sayede hücreler arasında değişkenlik olsa bile kullanılamayacak kapasite kullanılarak dengeleme sağlanır. Bu dengeleme işlemi pasif, hücreden hücreye aktif veya hücreden seriye aktif dengeleme şeklinde olabilir. Araç motorları çalıştığı zamandeşarj işlemi gerçekleşir. Elektrik motoruna bağlı olan batarya çıkışları motor sürücüyeye bağlıdır. Bu işlemler batarya yönetim sisteminin yönetimi altında gerçekleşir. Batarya yönetim sistemi şarj esnasında şarj cihazı ile haberleşerek gerekli şarj akımını dengeler. Deşarj sırasında da anlık olarak çekilebilecek akımı motor sürücüyeye gönderir. Bu durumlar karşısında akım ve gerilim istenmeyen değerler alırsa batarya yönetim sistemi koruma işlevini yerine getirir. Koruma amacıyla gerçekleşen bu hücre dengeleme işleminin çeşitleri Şekil 3.3' te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Hücre Dengeleme Yöntemleri

3.1.1.4. Pasif dengeleme

Seri bağlı hücrelerden oluşan bir batarya paketinde bir hücrenin kapasitesi yaşlanmaya başladıysa ve bu nedenle kapasitesi azaldıysa, şarj esnasında kapasitesi sağlam olan hücrelere de yaşlı hücrenin kapasitesi kadar enerji depolanabilir. Kapasite bozulması bir pilin yaşlanma davranışının başlıca nedenini oluşturur [37]. Yaşlı hücrenin kapasitesi dolduğunda ve maksimum şarj gerilimine ulaştığında enerjiyi depolayabilmek için sağlıklı hücrelerde bulunan boşluklar kullanılır. Ancak bu

noktadan sonra şarj işlemine devam edilememektedir. Çünkü hücre zarar görmüştür ve yaşlı hücrenin gerilimi üst sınırlara ulaşmıştır. Böyle bir durumda sağlıklı hücrelerdeki boşlukları doldurmak için yaşlı hücrelerdeki enerjiyi boşaltmak gerekir. Bunun için hücrede var olan enerji harcanmalıdır. Pasif dengeleme olarak adlandırılan bu dengeleme işleminde enerji direnç üzerinde harcanır. Her hücre için bir dengeleme direnci olabilir ya da hücreler sırayla büyük bir dengeleme direncine bağlanabilir. Depolanmış elektrik enerjisi direnç ile dengeleme yapılırken ısı olarak açığa çıkar.

3.1.1.5. Aktif dengeleme

Şarj işlemi esnasında boş kalan kapasiteler doldurulur. Boş kapasitelerin doldurulması için enerji hücreden pakete veya hücreden hücreye transfer edilir. Bu şekilde her iki durum için de dengeleme sağlanmış olur. Deşarj sırasında önce yaşlı hücre boşalmış olur. Bu durumda geriliminin daha da düşmesini engellemek için diğer hücrelerden yaşlı hücreye enerji aktarılır. Aktif dengeleme işleminin tercih edilmesinin nedenlerinden biri enerjinin harcanmaması ve deşarj sırasında da dengelemenin gerçekleştirilebilmesidir. Tablo 3.2.' de aktif dengeleme yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir.

Tablo 3.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri [38]

Hücre Yönlendirmesi	Hücreden Hücreye	Hücreden Pakete	Paketten Hücreye	Hücreden Pakete Hücreye	Paketten Hücreye
Tam Manevra	Anahtarlı Kondansatör	Şönt İndüktör	Gerilim Çarpanı	Paylaşılan Yöntemler	Dağıtılmış Yöntemler
Şönt Direnci	Çift Kademeli Anahtarlama Kondansatörü	Yükseltme Manevrası	Tam Köprü Dönüştürücü	PWM Kontrollü Dönüştürücü	Çift Yönlü Çoklu Transformatörler
Şönt Transistör	Tam Dönüştürücü	Çoklu Transformatör	Çoklu Transformatör	Tek Anahtarlı Kondansatör	Çift Yönlü Çoklu Dönüşüm
-	PWM Kontrollü Dönüştürücü	İkincil Sargılı Transformatör	İkincil Sargılı Transformatör	Tek Anahtarlı İndüktör	Çift Yönlü Anahtarlı Transformatör
-	Yarı Rezonans/ Rezonans Dönüştürücü	Anahtarlı Transformatör	Anahtarlı Transformatör	-	-

3.1.1.6. Teşhis ve kestirim

BYS sıcaklık, akım, gerilim ve zaman parametrelerinden yaptığı ölçümlerle diğer değerleri tahmin eder veya hesaplar. Batarya kapasitesinin belirlenmesi bu durumlardan biridir. Şarj durumu (SOC) bataryanın doluluk oranını ifade eder ancak bu direkt ölçülebilecek bir değer değildir. Yapılan diğer ölçümlerden yola çıkarak ortalama bir değer belirlenebilir. Bataryaların kapasiteleri kullanım şekli, çevrim

sayısı, maruz kaldığı sıcaklık vb. etkilere dolaylı olarak azalabilmektedir. Bu durum bataryanın sağlık durumu (SOH) olarak adlandırılır.

3.2. Batarya Termal Yönetim Sistemi

LIB'ler 15 °C - 40 °C sıcaklık aralığında verimli çalışmaktadır. Bu sıcaklık değerleri dışında bataryaların performansı ve ömrü olumsuz yönde etkilenebilir. Bu riskler nedeniyle lityum iyon bataryaların hücrelerine çok sayıda güvenlik mekanizması yerleştirilmiştir. BTYS büyük pil paketlerine güvenlik koruması sağlar [39]. Lityum iyon pillerin şarj ve deşarjı sırasında oluşan ısı düzgün yönetilemezse performans bozulmasına ve güvenlik risklerine yol açabilir. Pil performansının korunabilmesi için termal yönetim kritik öneme sahiptir. Pil sıcaklığının 20 °C ile 45 °C arasında tutulması termal yönetimin görevidir. BTYS pillerin bu sıcaklık aralığında çalışmasını sağlayarak hem bireysel hücrelerde hem de tüm pil takımında tutarlı sıcaklık dağılımını desteklemektir [40]. Sıvı soğutma olarak tanımlanan bu işlemin amacı sıcaklığı daha verimli bir şekilde yönlendirmek ve aynı pompalama gücüyle ideal bir sıcaklık dağılımı elde etmektir [41,42]. Doğrudan sıvı soğutma, hücreleri veya pil takımını bir sıvı ortamına daldırırken, dolaylı sıvı soğutma, soğutma sıvısını pil takımı ile bir ısı emici arasında dolaştırmaktadır. Akışkan akış hızı, akışkan sıcaklığı, akış kanalı düzeni ve soğutma ortamı gibi parametreler bu soğutma sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde etkiler. [43].

3.2.1. Görevleri

Batarya termal yönetim sistemi bataryalarda sıcaklık arttığında ısı dağılımını gerçekleştirmek veya sıcaklık çok düştüğünde ısı artışını sağlamak üzere bataryanın çalışma sıcaklığını kontrol eder. Batarya çalışma sıcaklığının modüle edilmesi için pasif, aktif veya hibrit ısı transferi çözümleri kullanılmaktadır. Güvenlik havalandırması, pozitif sıcaklık katsayısı (PTC), akım kesme cihazı (CID) ve alev geciktirici ayırıcılar (retardant) bunlardan bazılarıdır.

3.2.1.1. Güvenlik havalandırması

Bataryaların aşırı ısınmasını önlemek için batarya paketindeki hava akışını düzenler. Bu havalandırma sistemi sıcaklık yükseldiğinde fazla ısının dışarıya atılmasını sağlayarak bataryaların güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Elektrolit oksidasyonu

ve oluşan gazların hücre kutusunu patlatabilecek tehlikeli basınçlara ulaşmasını önlemek için basınç tahliyesini gerçekleştirir.

3.2.1.2. Pozitif sıcaklık katsayısı

Batarya hücrelerinin içindeki direnç ile sıcaklık arasındaki bağlantıyı ifade eder. Batarya hücresinin sıcaklığı arttıkça iç direncin de artacağını belirten bir özelliktir. Bataryalarda sıcaklık arttıkça daha fazla enerji tüketileceğinden bataryanın verimliliği azalır. Bu nedenle bir hücre aşırı ısınırse akım sınırlayıcı görevi görerek harici bir kısa devreye bağlı yüksek akımı önler.

3.2.1.3. Akım kesme cihazı

Hücrelerden bir tanesini izole etmek için hücre içinde mekanik bir anahtar gibi davranır. İç basınç çok artarsa elektrik terminalleri, gözenekli ayırıcılar, hücrenin aşırı ısınması durumunda elektrolit boyunca tüm iyonik difüzyonu kapatacak ve dahili kısa devreleri azaltacak şekilde tasarlanmıştır. Tek bir hücrenin arızalanması çevredeki hücreleri termal kaçağa doğru tetiklemek için yeterli ısıyı üreterek yayılmaya yol açabilir. Tek bir hücrenin enerji salımı kontrol altına alınsa da serbest bırakılan ısı bir paketteki komşu hücrelerin sıcaklıklarını yükseltirse, ısınmaya başlayan hücrelerin ardışık olarak yangına ve paketin tamamen yok olmasına yol açması muhtemel hale gelir [44]. Bu nedenle hücre bileşenlerine ek olarak paket düzeyinde güvenlik önlemlerinin tasarlanması gereklidir. Lityum iyon bataryaların güvenliği tasarlanırken, termal kaçak olayının diğer hücrelere çeşitli yayılma metotlarını incelemek faydalı olacaktır [45,46]. Tek bir hücrenin termal kaçak sırasında açık havada 700 °C' ye ulaştığı ve iletim (ya doğrudan temas halindeki hücreler yoluyla ya da harici akım toplayıcıları aracılığıyla) konveksiyon (hava akımı) ve radyasyon (ışınım) yoluyla önemli ısı transferlerine yol açtığı bilinmektedir. Ek olarak buharlaşmış elektrolitin dışarı atılması ve yanması daha büyük miktarda ısı oluşumuna neden olabilir [47]. Lityum iyon bataryaların deneysel termal kaçak testleriyle ilgili literatür raporları kalorimetrik testlerden [48,49], hücre elektrokimyasal ve termal özelliklerini kullanan modellemelere, çeşitli kötüye kullanım koşullarında hücre performansını tahmin etmek veya deneysel sonuçları doğrulamak için çeşitli araştırma deneylerinden oluşmaktadır [50]. Deneysel çalışmalar genellikle sıcaklık, voltaj ve yayılma davranışında tekrarlanamayan ayrıntılarla sonuç vermiştir. Bununla birlikte dolu bir pil paketindeki termal kaçak verileri çok daha az gözlemlenmiştir [51]. 18650' lik küçük paketler halinde ve prizmatik hücreleri yaralayarak yapılan bazı testler, sıcaklık

verileri ve test sonrası incelemeler daha düşük hücre sıcaklıkları, hücreler arasında daha büyük boşluklar için hücreler arasında şişen veya ısıyı iletme bariyer malzemelerinin kullanılmasıyla daha az yayılma davranışını göstermiştir [52,53].

3.2.1.4. Alev geciktirici ayırıcılar

Pilin en yanıcı bileşeni olan elektrolit, pilin alev geciktirici dönüşümünde önemli bir yer tutmaktadır. Elektrolitlere alev geciktiriciler eklenerek pillerin alev geciktiriciliği etkili bir şekilde iyileştirilebilir. Ayırıcılar anot ve katodu izole etmeye yarar. Eğer anot ve katod iyi izole edilemezse pilde kısa devre gerçekleşebilir ve yanma veya patlamalara neden olabilir. Pil kabuğu dış havayı izole etmek ve pilin iç yapısını korumak için kullanılır. Kabuk malzemeleri iyi mekanik özelliklere sahip olduğunda akü bir darbe aldığı anda elektrolit sızıntısını önleyebilir. Böylece yangın, patlama vb. güvenlik kazaları etkili bir şekilde önlenir. Pil kabuk malzemelerinin ısı direnci ve ısı dağılımı da batarya güvenliği için önemlidir. Pil paketine alev geciktirici bileşenlerin eklenmesi, pilin performansını olumsuz etkileyebilir, pil ömrünü ve pil kapasitesini azaltabilir. Alev geciktirici bileşenlerin çoğu çevreye zararlı bileşenler içerdiğinden pillerin üretim ve geri dönüşüm süreci çevre kirliliğine sebebiyet verebilir.

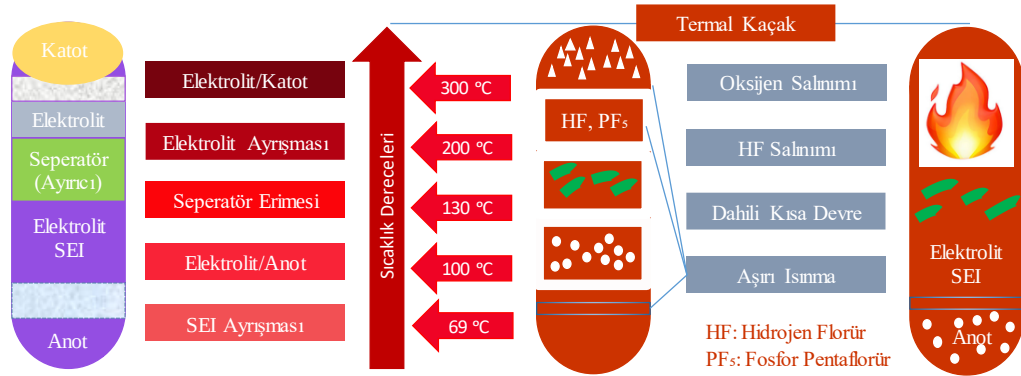


Şekil 3.4. Batarya Alev Geciktirici Teknolojisi [54]



4. TERMAL KAÇAK

Hücrelerin iç sıcaklığı 90 °C ile 120 °C aralığına ulaştığında ayrışma başlayabilir ve katı elektrolit arayüz tabakası ekzotermik bir reaksiyon başlatır. Hidrokarbon elektrolit 200 °C' nin üzerinde bozunabilir [55]. Termal kaçak dahili ve harici kısa devre olarak gruplandırılan lityum iyon pil kısa devresinden başlar. Çoğu durumda dahili kısa devre süreci, çarpma ve delinme nedeniyle ayırıcının yırtılmasından başlayabilir. Belirlenen şarj özelliklerinin dışında yapılan aşırı şarj, lityum iyon pil üzerindeki kaplamaya veya anot yüzeyinde bir dendrit oluşumuna neden olabilir. Oluşan bu dendrit zamanla seperatöre nüfuz ederek elektrotlarla temas edebilir ve elektrotlar arasında kısa devreye ve termal kaçaklara neden olabilir. Yüksek şarj akımı yoğunluğu, düşük sıcaklık koşullarında ayırıcının çökmesinden kaynaklanan pil ayırıcı hasarı, katot ve anot aktif maddelerin arızalanması ve elektrolit malzemenin çökmesi vb. nedenlerden dolayı dahili kısa devre süreci başlayabilirken, harici kısa devre yüksek sıcaklıktan dolayı başlar.



Şekil 4.1. Lityum İyon Bataryalarda Termal Kaçak Süreci

LIB' lerin termal kaçak sırasında reaksiyon adımları [56]

Sıcaklık

Reaksiyon

<90 °C

Yanlış kullanım koşullarından birinin gerçekleşmesi.

90 °C – 120 °C

Lityum tuzu LiPF_6 ve SEI filmi çözülür ve ısıyı $120\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar artırır.

$120\text{ }^\circ\text{C} - 150\text{ }^\circ\text{C}$

Son derece reaktif LiC_6 ekzotermal bir reaksiyon başlatır. Elektrolitlerin çözülmesi PF_5 oluşturur ve bu durum organik çözücülerin çözülmesini aktive eder.

$150\text{ }^\circ\text{C} - 200\text{ }^\circ\text{C}$

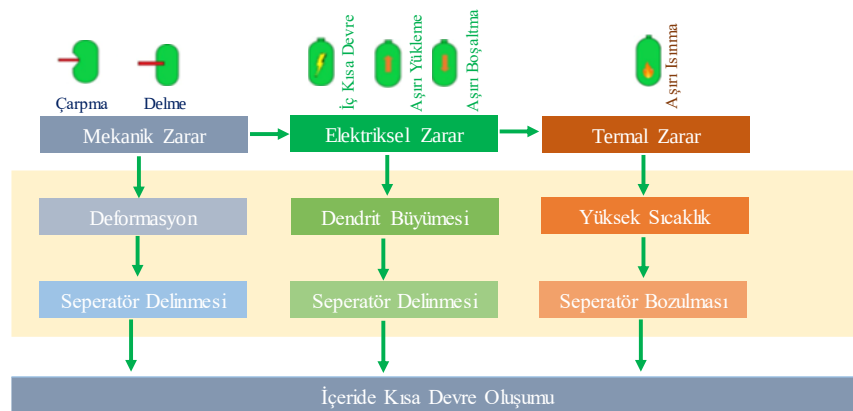
Poliolefin ayırıcı erir, kısa devreye neden olur ve ısı salımını hızlandırır.

$200\text{ }^\circ\text{C} - 300\text{ }^\circ\text{C}$

Katot malzemeleri yayılır ve oksijen salar, elektrolitlerle büyük bir oksidasyon reaksiyonu gerçekleşir. Büyük miktarda ısı ve hidrokarbon gazları salınır. Yanıcı gaz karışımı $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yanar.

4.1. Termal Kaçak Mekanizmasının Sebepleri

Bir lityum iyon bataryanın güvenlik özellikleri hücrenin fiziksel şekline (geometri, malzemeler) ve durumuna (şarj durumu, yaşlanma etkileri), nasıl zorlandığına (düşük veya yüksek sıcaklık, aşırı şarj veya aşırı deşarj, ısıtma) ve termal kaçak oluşumuna karşı önleyici tedbirlere (yerleşik güvenlik cihazları, soğutma, hapsetme) bağlıdır [57]. Termal kaçak bataryanın aşırı ısınması ve sıcaklığın kontrolsüz bir şekilde artması durumudur ve bu durum bataryaların güvenliğini ve verimliliğini olumsuz etkiler. Termal kaçak ya bir arızadan ya da günlük kullanımda insan kaynaklı yanlış kullanım durumundan kaynaklanabilir. Yanlış kullanım sonucu ortaya çıkabilecek etkiler mekanik etki, elektriksel etki ve termal etki olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir. Bu etkilerin gelişim süreci Şekil 4.2' şeklinde gösterilmektedir [58].



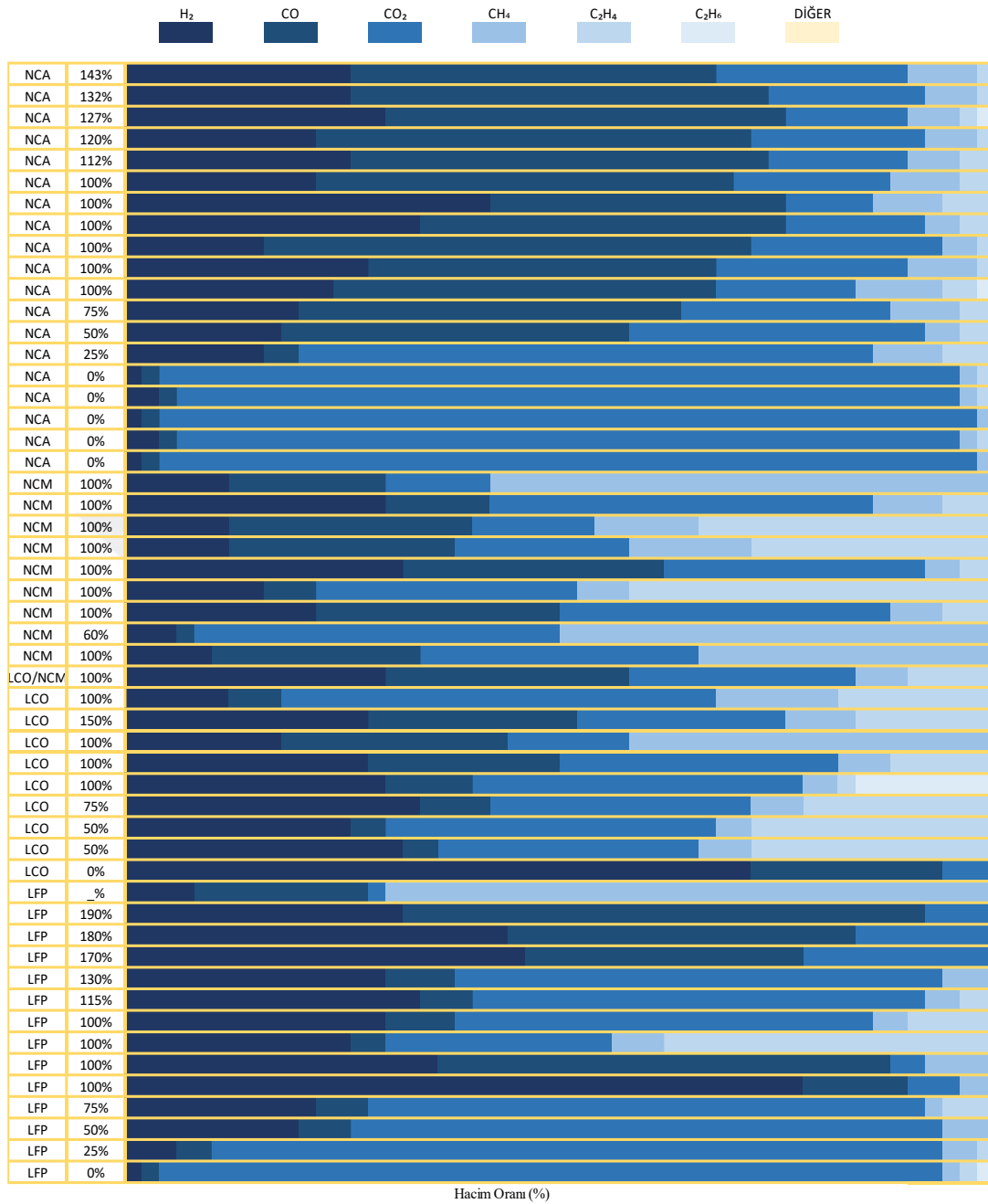
Şekil 4.2. Termal Kaçağın Yaşanmasında Mekanik, Elektriksel ve Termal Etki [59]

Bataryalar aşırı şarj edildiğinde içindeki kimyasal reaksiyonlar hızlanabilir ve fazla ısı üretebilir. Aşırı deşarj da bataryanın iç yapısını zayıflatıp yüksek ısı üretimine neden açabilir. Batarya hücreleri arasında veya hücrelerin dış bağlantılarında meydana gelen kısa devreler yüksek akıma neden olarak aşırı ısı üretimine yol açabilir. Bu durum bataryanın iç yapısını bozarak termal kaçak riskini arttırabilir. Bataryalarda kullanılan elektrolit malzemelerinin kalitesi, üretim kaynaklı hatalar veya hücrelerin yerleştirilmesindeki dengesizlikler termal kaçak riskinin artmasına neden olabilir. Bataryalar aşırı sıcak ortamlarda çalıştırıldığında kimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşebilir ve bu durum karşısında batarya aşırı ısınabilir. Çevresel sıcaklıklar da bataryanın iç sıcaklığını doğrudan etkiler. Eğer batarya yönetim sisteminde bir arıza meydana gelirse hücreler arasındaki denge bozulabilir. Bu durum hücrelerin aşırı ısınmasına neden olarak termal kaçak riski oluşturabilir. Batarya hücresine gelebilecek darbe, çarpma veya delinme gibi fiziksel hasarlar bataryanın iç yapısının bozulmasına, kısa devreye veya kimyasal reaksiyonların kontrolden çıkmasına neden olabilir. Bataryalar zamanla kapasitesini kaybeder, iç yapısı bozulabilir ve verimliliği düşebilir. Bu durum sonucunda da hücreler fazla ısı üretmeye meyilli hale gelerek termal kaçak olasılığını arttırabilir. Hücreler arasında performans farkları oluşursa bazı hücreler fazla ısınarak termal kaçak riskini arttırır. Termal kaçak genellikle zincirleme bir olay sonucu ortaya çıkarak ciddi güvenlik tehlikelerine yol açar. Bu nedenle bataryaların doğru şekilde şarj edilmesi, uygun sıcaklık aralıklarında tutulması ve düzgün bir şekilde yönetilmesi çok önemlidir.



5. GAZ SALIMI

LIB'lerin yaşam döngüsü boyunca, çeşitli temel süreçler sırasında gazlar üretilir. Başlangıçta pil oluşumu sırasında elektrolit, gaz üretiminin eşlik ettiği bir işlem olan SEI'yi oluşturmak için tüketilir [60,61]. Pil yaşlandıkça SEI büyümesi, katot malzemelerinin faz dönüşümü ve elektrolit ayrışması nedeniyle daha fazla gaz üretimi meydana gelebilir [62]. LIB'nin TR durumunda, dahili kimyasallar birbirleriyle reaksiyona girerek gaz üretecek ve bu da bataryanın iç basıncını arttırarak emniyet valfinin tasarım basıncını aşmasına neden olacaktır [63]. Böylece emniyet valfi açılacak ve akünün içindeki gaz çevreye salınacaktır. Bu işlem akustik bir sinyal üretir. Bu nedenle gaz sinyallerinin algılanması, pil yaşlanma mekanizmaları, pil malzemelerini iyileştirme ve pil güvenliği için önemlidir. LIB'lerin TR'si ile ilgili araştırmalar, iç kimyasal reaksiyon tarafından üretilen gaza odaklanmıştır [64]. Araştırmacılar LIB arızalarına yönelik gaz uyarısının fizibilitesini tartışmışlar. Araştırmalarında akustik sinyallere dayalı bir pil arıza alarmı ve lokalizasyon yöntemi önermektedir [65]. Enerji depolama bölmesine monte edilen akustik sensörler ile arızalı bataryanın havalandırılmalı akustik sinyalini yakalamak ve arızalı hücrenin konumunu elde etmek için çalışmalar gerçekleştirilmiş. Kimyasal reaksiyonlardan üretilen gazların miktarı ve bileşenleri önemli olduğu için üretilen gazların bileşenlerini gaz analizörleri [66], gaz kromatografisi (GC) [67,68], Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometre (FTIR) [69] vb. gaz sensörleri kullanarak belirlemeye çalışmışlardır [70,71]. Kapalı bir alanda yapılan bu testlere ek olarak bazı ölçümler egzoz davlumbazı altında yapılmış ve üretilen gazlar egzoz kanalı tarafından çıkarılarak analiz edilmiş [72]. Gaz bileşenlerinin konsantrasyonu bu yöntemle ilgili sahadaki gaz sensörüyle belirlenebilirken, üretilen toplam gaz miktarı ölçülemez. Tablo 5.1' de yer alan kötüye kullanım testlerinden çıkan analiz sonuçlarına göre ana gaz bileşenlerinin H₂, CO, CO₂ ve VOC olduğu görülmektedir [73]. CO₂ üretimi, salınan gazın ana bileşenlerinden biri olan pilin TR'si sırasındaki şiddetli oksidasyon süreciyle ilgilidir ve düşük maliyetli sensörler kullanılarak doğru izleme de yapılabilir [74].

Tablo 5.1. TR Sırasındaki Havalandırma Gazı Türlerinin Bileşimleri

TR sırasında salınan gazların önemli bileşeni olan VOC' ler esas olarak elektrolitin buharlaşmasından kaynaklanır [75]. VOC' ler sensörler vasıtasıyla tespit edilebilir. H₂, CO, CH_x ve VOC' leri tespit etmek için kimyasal dirençli sensör elemanını kullanmışlardır [76]. Havalandırılan VOC' lerin tespit edilmesiyle erken uyarı olarak pil güvenliğini arttırabilmek mümkün olabilir. Lityum esaslı pillerin termal kaçaklarının erken uyarısını gerçekleştirmek için gaz algılama sensörlerini kullanmak teorik olarak mümkündür. Yapılan literatür araştırması lityum iyon pillerin iç kimyasal reaksiyonlarından, ısıtma işlemi sırasında CO₂, O₂, C₂H₄, C₄H₁₀,

POF₃, C₂H₅F, PF₅, H₂ vb. çeşitli gazların yayıldığını göstermektedir [77]. Araştırmacılar metalik lityumun polimer bağlayıcılar ile reaksiyonundan üretilen hidrojen gazının yakalanmasına dayanan yeni bir hassas tespit yöntemi geliştirmişler. Önerilen yöntem, çok erken güvenlik uyarıları için eser miktardaki Li-metal oluşumunu mikron ölçeğine kadar tespit ederek pil güvenliğini arttırmaya yardımcı olabilir. Şu anda TR uyarısı için karakteristik gazların kullanılmasındaki zorluklar esas olarak sensör seçimine odaklanmaktadır. Yukarıda tespit edilen gazlar arasında bir bataryanın bozulmasını ifade eden en önemli gazın CO₂ olduğu bilinmektedir. Çünkü diğer gazlar bataryanın normal çalışma süresinde de salınabilmektedir. Bu nedenle deneysel tespit amacıyla kullanılacak CO ve H₂ gaz sensörlerinin yanında bu tez çalışmasında özellikle ortamdaki CO₂ gazını tespit eden gaz sensörleri kullanılmaktadır. CO₂ gazının tespit edilmesindeki en büyük problem gazın nötr olmasıdır. Bu nedenle CO₂ gazını elektron etkileşimli sensörler ile tespit edilememektedir. Bazı şirketler yangından korunma amaçlı gaz algılama yönünde ilgili ürünler üretmişlerdir. Termal kaçak tespiti için Dağılmayan Kızılötesi (NDIR) CO₂ sensörü dikkat çekici bulunmuştur. Bu sensörler lityum pil, elektrikli araçlar, enerji depolama pil takımı ve istasyonu için yaygın olarak kullanılır. CO₂, CO, H₂, duman, sıcaklık vb. değişimini zamanında algılar. NDIR CO₂ sensörünün aşırı şarj kaynaklı gaz algılama olayından sonra 11 saniyede 10.000 ppm' ye ulaşarak hızlı bir tepki gösterdiği deneysel olarak tespit edilmiştir.

Lityum iyon bataryalarda gaz salımı batarya güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bataryalar aşırı şarj, aşırı deşarj, fiziksel hasar veya yaşlanma gibi durumlarda gaz salımı gerçekleşebilir. Bu gazlar genellikle bataryaların içindeki elektrolitlerin bozulması sonucu ortaya çıkar ve bataryaların şişmesine, patlamasına ya da yangınların çıkmasına yol açabilir. Literatürde lityum iyon bataryalarda gaz salımı ile ilgili yapılmış birçok deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda bataryaların çeşitli koşullar altında gaz salımının tespiti ve analiz edilmesi hedeflenmiştir. Aşağıda bu alandaki bazı önemli çalışmalar yer almaktadır.

Bu çalışma lityum iyon bataryaların kötüye kullanım koşullarına (aşırı şarj, sıcaklık etkisi, kısa devre vb.) maruz kaldığında saldırdığı gazları incelemiştir. Bataryaların aşırı şarj ve kısa devre gibi koşullar altında hangi gazlar saldırdığına dair kapsamlı veriler sunulmuştur [78].

Bu makale, termal kaçak sırasında lityum iyon bataryaların saldığı gazların türlerini ve miktarlarını incelemiştir. Termal kaçak bataryanın aşırı ısınması sonucu meydana geldiği ve bu koşulda çıkan gazların kimyasal bileşimleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir [79].

Bu çalışmada, lityum iyon bataryaların elektrolitlerinin termal bozunması sonucunda salınan gazların kimyasal bileşenleri incelenmiştir. Gaz salımının bataryaların güvenliğini nasıl etkileyebileceği üzerine önemli bilgiler yer almaktadır [80].

Bu makale aşırı şarj ve aşırı deşarj koşullarında lityum iyon bataryaların saldığı gazları incelemiştir. Araştırmada gazların tehlike oluşturma ve batarya yönetim sistemlerinin rolü üzerinde durulmuştur [81].

Bu çalışma lityum iyon bataryaların aşırı şarj halinde gaz salımı yaparken ortaya çıkan termal davranışları incelemiştir. Aşırı şarj sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve bu reaksiyonların bataryaların iç yapısına etkisi araştırılmıştır [82].

Bu literatür örnekleri lityum iyon bataryalarda gaz salımını anlamak ve batarya güvenliğini arttırmak adına yapılan önemli çalışmalara örnekler sunmaktadır. Bu araştırmalar, batarya güvenliğinin sağlanması için gereken tasarım ve güvenlik önlemleri konusunda bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

6. ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ

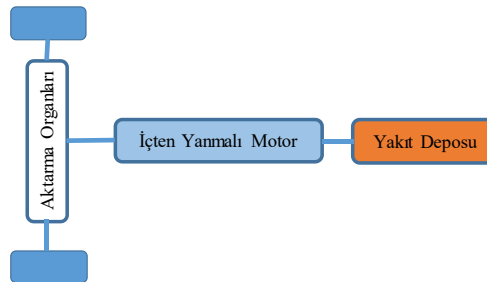
EV' lar aracın ilerleyebilmesi için tamamen elektrik enerjisini kullanır. Sistem elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştürerek çalışır. Dolayısıyla elektrikli araçlarda bataryalar, elektrik motorları ve güç elektroniği bulunur. Bu sistemler bir araya gelerek farklı türlerde araçlar üretilmektedir. Bataryalar ve elektrik motorları elektrikli araçların performansını doğrudan etkileyen unsurlardır. Hız, menzil, şarj süresi, araçların bakımı, maliyetleri vb. unsurlar batarya ve elektrik motorlarının özellikleri ile ilgilidir.

Tablo 6.1. Araç Çeşitleri

ARAÇ ÇEŞİTLERİ		
İçten Yanmalı Motorlu Araçlar	Hibrit Elektrikli Araçlar	Tam Elektrikli Araçlar
	Mikro Hibrit Hafif Hibrit Plug-in Hibrit Seri Hibrit Paralel Hibrit Seri-Paralel Hibrit Kompleks Hibrit	Yakıt Pili Menzil Genişletici

6.1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar (ICE)

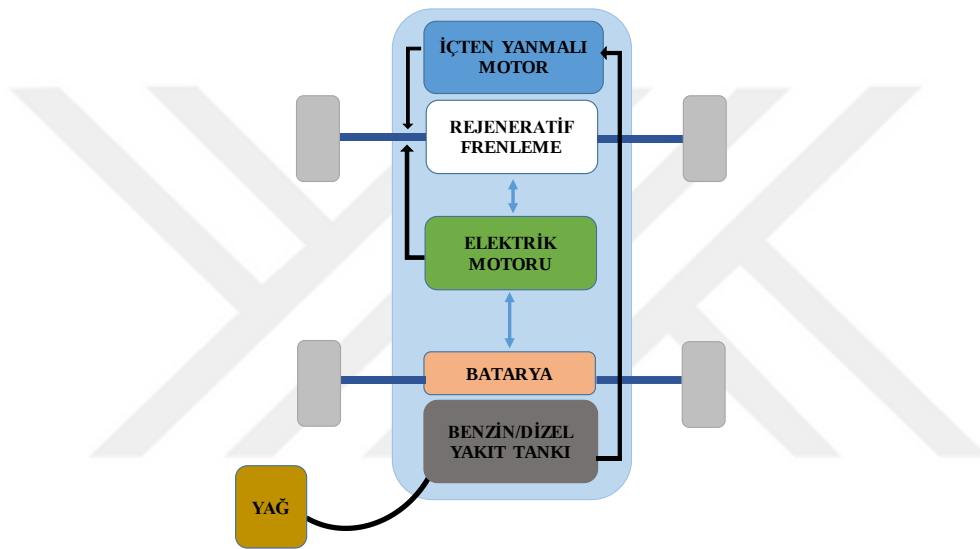
İçten yanmalı motorlar ile tanımlanır. Benzinli, dizel, lpg ve doğalgaz motorlar örnek verilebilir.



Şekil 6.1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar

6.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV)

Farklı enerji kaynakları ile çalışabilen araçlardır. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru bulunur. Elektrik ve benzin kombinasyonunu kullanarak güç elde eder. Aracı elektrikli sürüş ile hareket ettirme özelliğine sahip olan bu araçlarda bulunan elektrik motoru daha büyüktür. Prizden elektrik alarak şarj edilmeleri mümkün değildir. Sadece rejeneratif frenleme veya içten yanmalı motor enerjisi ile yüksek voltaj aküsü doldurulur. Elektrikli sürüş menzili kısadır [83]. Fosil yakıttan gelen fazla kimyasal enerjiyi yanmalı motor aracılığıyla elektrik enerjisine aktarabilir ve bunları pil takımına depolayabilirler [84].



Şekil 6.2. Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

6.2.1. Mikro hibrit araçlar (Micro hybrid vehicle)

Bu araçlar normal içten yanmalı motora ve start stop sistemi gibi yakıt tasarrufu sağlayan ek sistemlere sahiptir. Örnek olarak rejeneratif frenleme verilebilir.

6.2.2. Hafif hibrit araçlar (Mild hybrid vehicle)

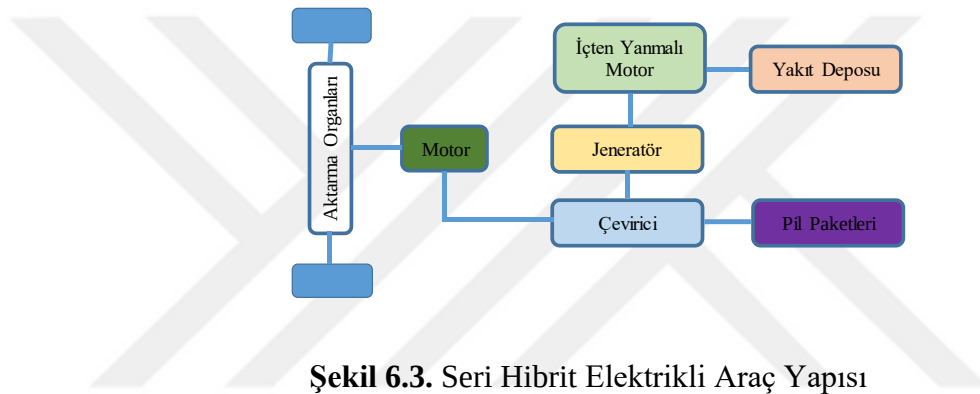
İçten yanmalı motora ve bu motora destek olarak çalışabilecek bir elektrik motoruna sahiptir. Standart elektrik motorundan daha yüksek kw değerine sahip olan bu elektrik motoru aracı tek başına yürütme yeteneğine sahip değildir. Sadece içten yanmalı motora destek olarak yakıt tasarrufu sağlar. Elektrik motoru bataryayı rejeneratif frenleme ile şarj etmeye çalışır. Bu sayede yakıt tasarrufu yapılmaya çalışılır.

6.2.3. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV)

Şarj edilebilen hibrit elektrikli araçlardır. HEV'lerden farkı şarj edilebilir olmasıdır. Ev ya da wall box prizi ile şarj edilebilirler. Elektrik sürüş menzili, HEV' den daha yüksektir. Plug-in hibrit araç elektrik gücünü doğrudan şebekeden de şarj edebilir. Böylece kullanıcılar depoda yakıt olduğu sürece herhangi bir zamanda şarj kaynağı olarak veya bir şarj istasyonunu kullanma seçeneğine sahiptir [85].

6.2.4. Seri hibrit elektrikli araçlar

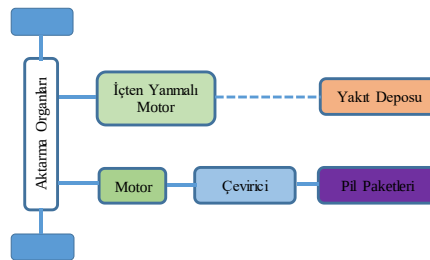
İçten yanmalı motordan alınan gücü elektrik enerjisine dönüştürerek ilerleyen araçlardır.



Şekil 6.3. Seri Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

6.2.5. Paralel hibrit elektrikli araçlar

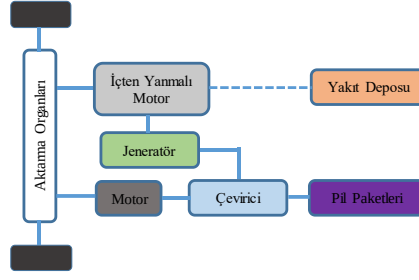
Elektrik motoru ve içten yanmalı motor tarafından sağlanan güçle hareket eden araçlardır.



Şekil 6.4. Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

6.2.6. Seri-paralel hibrit elektrikli araçlar

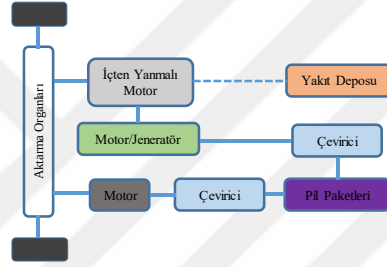
Aracın gücünü arttıran ve yakıt tasarrufu sağlayan araçlardır. Sadece yakıtla veya sadece elektrikle ya da her ikisini bir arada kullanarak çalışabilirler. İçten yanmalı motoru içerisinde yer alan bataryayı şarj edebilir.



Şekil 6.5. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

6.2.7. Kompleks hibrit elektrikli araçlar

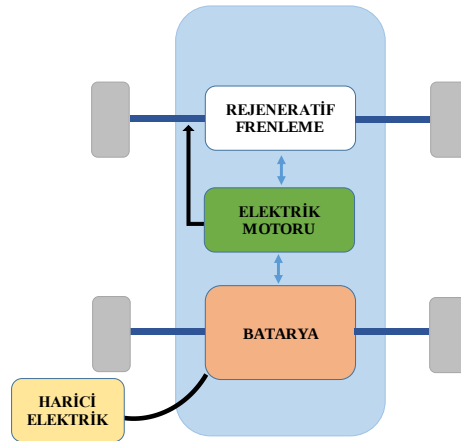
Yapısında içten yanmalı motorlar, elektrikli motorlar ve şarj edilebilen ya da şarj edilemeyen bataryaların bulunduğu araçlardır.



Şekil 6.6. Kompleks Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

6.3. Tam Elektrikli Araçlar

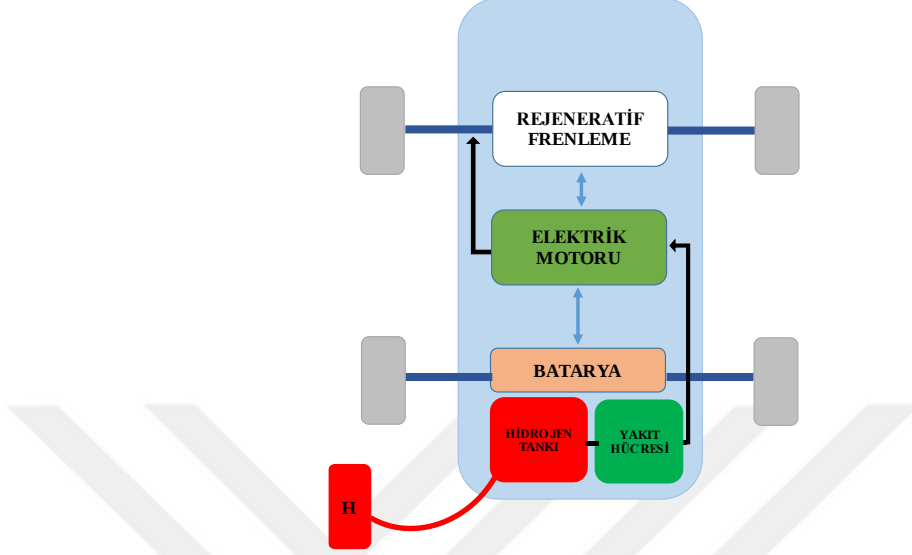
Pil paketlerinden elektrik enerjisi elde eden araçlardır. Bu araçların hareketi elektrik motorundan sağlanmaktadır. Pil paketleri boşaldığında tekrar doldurularak kullanılırlar [86]. Bu araçların çalışma prensibinde güç, elektrik motoru için direkt akım (DC) pilden alternatif akım (AC)' a dönüştürülür.



Şekil 6.7. Tam Elektrikli Araç Yapısı

6.3.1. Yakıt pilli elektrikli araçlar

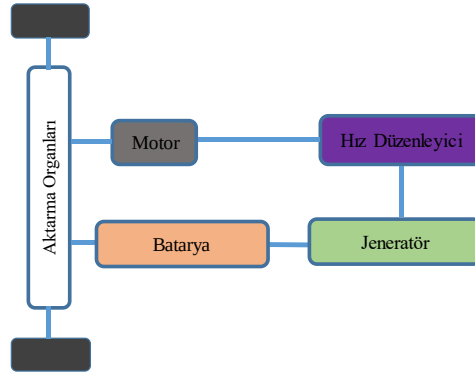
Yakıt hücresi, hidrojen depolama tankı, elektrik motoru, dönüştürücü ve denetleyicili pil bılınan araçlardır [87].



Şekil 6.8. Yakıt Pili Elektrikli Araç Yapısı

6.3.2. Menzil genişletici elektrikli araçlar (RXBEV)

Menzil genişletici elektrikli araçlar sadece elektrikle çalışır. Yüksek voltaj aküsü tamamen deşarj olduğunda aracın yolda kalmasını engellemek için bir içten yanmalı motor bulunur.



Şekil 6.9. Menzil Genişletici Elektrikli Araç Yapısı



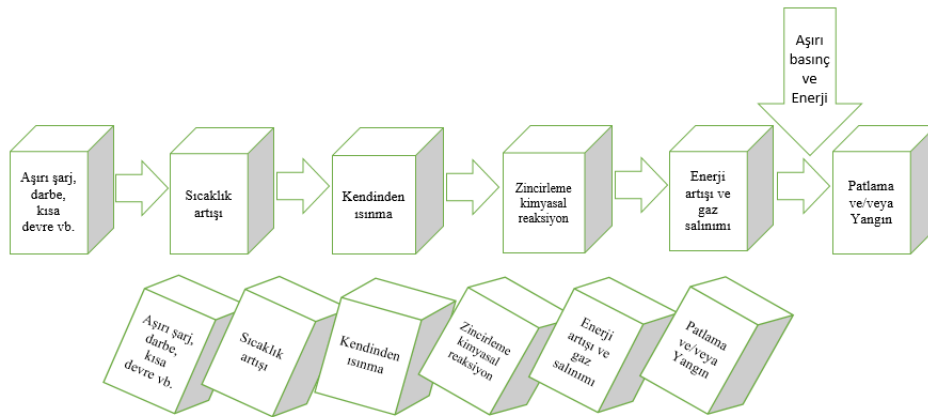
7. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YANGIN RİSKLERİ

LIB'lerin ana bileşenleri arasında paslanmaz veya alüminyum kabuk, plastik poşet, sıvı elektrolit, anot malzemesi, katot malzemesi, ayırıcı, bağlayıcı ve bakır (Cu) folyo bulunur ve bunların yangınları karmaşık yangınlardır. [88]. LIB'ler kendi kendine ısınarak bir termal kaçağa neden olabilir. Bu durum yüksek ısı ve zehirli gaz salımına ve özel güvenlik riskleri oluşturabilecek özel bir yanma davranışına yol açabilir. Ekzotermik termal kaçak reaksiyonları akü sıcaklığını artırır. Daha sonra yoğunlaşmış maddeden gazlara faz geçişi meydana gelir. Üretilen gaz karışımı çeşitli hidrokarbonlardan oluşabilir. Bu yanıcı gazların tutuşması, daha önce tartışılanlara benzer yangın veya patlama senaryolarına yol açabilir [89]. Isı salım oranı (HRR), batarya ve elektrikli aracın yangın tehlikesinin değerlendirilmesi için önemli bir parametredir. Bir aküyü yakmanın HRR' si, bir aracın bir bütün olarak ateşlenip ateşlenemeyeceğini araştırmak için uygulanabilir. Böylece aracın tamamının yanması sırasındaki yangın ortamı tahmin edilebilir. Elektrikli araçların yakılmasındaki HRR, tünellerin veya otoparkların yangın ortamını tahmin etmek için kullanılabilir [90]. Yapılan bazı testler incelendiğinde LIB paketinin yanmaya başlamasının genellikle 25-40 dakika sürdüğü tespit edilmiş. Tek bir LIB için bu süre 2-11 dakikaya düşebilir [91]. Literatüre göre testler sırasında ölçülmesi gereken birkaç ana parametre vardır. Bunlar voltaj, akım ve sıcaklıktır. Hücrelerin yüzey sıcaklığı ölçüm cihazı kullanılarak ölçülecektir. Sıcaklık, hücre sıcaklığını en yakından yansıtan bir yerde ölçülmelidir. IEC 62660-2 [92]' ye göre kullanılan voltmetrelerin direnci en az 1 MX=V olacaktır. Wang ve ark. LIB'lerin risk değerlendirmesinin ayrıntılı bir incelemesini yaptılar [93]. Temel olarak riskleri çeşitli pil kötüye kullanım testlerine göre değerlendirdiler [94]. Bu geçmiş çalışmalar batarya yangın riski hakkında bazı temel bilgiler sağlamıştır [95]. Bu bilgiler LIB'lerin termal güvenliğinin tasarımını desteklemiş olsa da [96] büyük ölçekli pillerin yangın dinamikleri hakkında hala pek çok bilinmeyen mevcuttur [97]. EV yangınlarının termal tehlikesi [98], geleneksel araç yangınları ile karşılaştırılabilir [99]. Hibrit elektrikli araçlar, ciddi bir çarpışmadan sonra aynı yangın riskine sahip olabilir [100]. Artan EV sayısı ile birlikte, LIB'ler ve EV'lerle ilgili yangınların yaşanması endişesi de artmaktadır [101]. Avrupa' da LIB'lerin yalnızca % 5 kadar azı geri dönüştürülmektedir [102]. Pil atıkları ekolojimizi kirletebilir.

Pillerin imha edilmesi sırasında hiç şüphesiz potansiyel yangın riskleri vardır. Bu risk, dikkate alınan LIB' nin SOC' si ve kapasitesi ile bağlantılıdır. Bu nedenle, pillerin toplanması ve EV' lerin atılması sırasında yangın riskinin artması muhtemeldir [103,104].

7.1. Hücre Yangınlarının Özellikleri

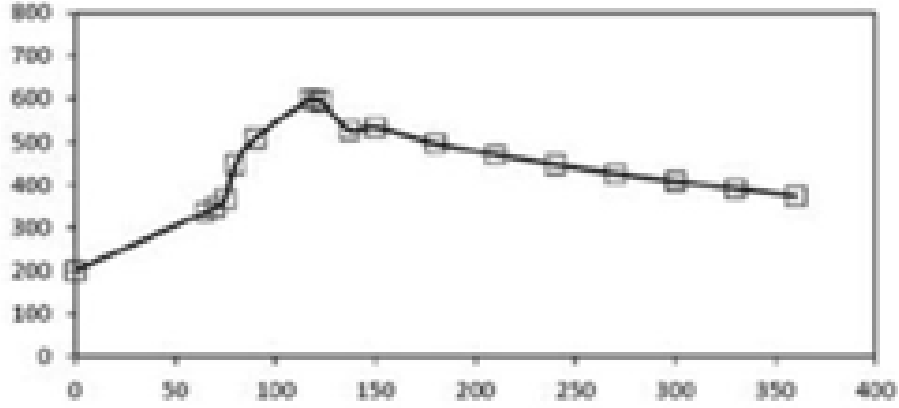
Tanıma göre yangın, kontrolsüz bir yanma sürecinin sonucudur. Bu süreci başlatmanın ve sürdürmenin koşulu yanma tetrahedronudur. Bu tanım aynı zamanda lityum iyon hücrelerinin yangınını karakterize etmek için de uygundur. Ana yakıt hücre elektrolitidir. Elektrolit çözeltisi bir organik çözücü ve bir inorganik tuz içerir. Normal kullanım koşullarında hücre, hava erişimi olmayan, yangın veya patlama olasılığını ortadan kaldıran kapalı bir sistemdir. Ancak uygunsuz kullanım (acil durumlar dahil) termal kaçak riskini artırır. Yapılan testler, bir hücrede kontrolsüz bir termal reaksiyon meydana geldiğinde yüklü elektrotun kararsız bir malzeme haline geldiğini doğrulamaktadır. Batarya olarak adlandırılabilen sistemin kapalı hacminde sıcaklık artmakta, bu da kendi kendine ısınmaya yol açmaktadır. Bu olay kimyasal reaksiyonların oluşmasını ve sıcaklığın daha da artmasını kolaylaştırır. Üretilen ısı kayıplarından daha büyük olduğunda süreç geri döndürülemez hale gelir ve yukarıda açıklanan termal kaçak olgusu meydana gelir.



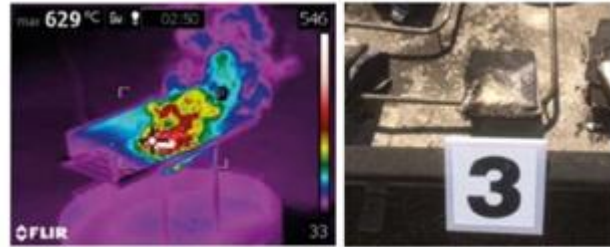
Şekil 7.1. Lityum İyon Hücre Yangınlarına Yol Açan Domino Etkisi [105]

Sonuç olarak, pilin yanıcı bileşenleri ve yakınındaki diğer bileşenler tutuşur. İç kısmı çoğunlukla plastik malzemelerle kaplanmış bir biner araçta, yangının yayılma süresi kısadır ve kayda değer dinamiklerle karakterize edilir. İtalya' da bir grup bilim insanı tek bir lityum iyon hücresi ve bir dizi birbirine bağlı hücre üzerinde testler gerçekleştirdiler. Testler EIG C020 lityum iyon hücreleri kullanılarak 48 hücreden

oluşan bir paket üzerinde gerçekleştirilerek yaklaşık 7,5 kW' a maruz bırakıldı. Hücreler % 50 SOC seviyesindeydi. Açıklanan testte, hücre açığa çıktı. LPG alevi 2 dakikada yaklaşık 650 °C sıcaklığa ulaştı. Brülör kapatıldıktan sonra hücre sıcaklığı yaklaşık 6 dakika içinde 400 °C' ye ulaştı. Testler sırasında hücreden gaz sızıntısı ve bunların tutuşması ile hücrenin şişme etkisi gözlemlendi. Gaz çıkışının ve hücre hacmindeki artışın etkileri Şekil 7.2.' de gösterilmektedir.

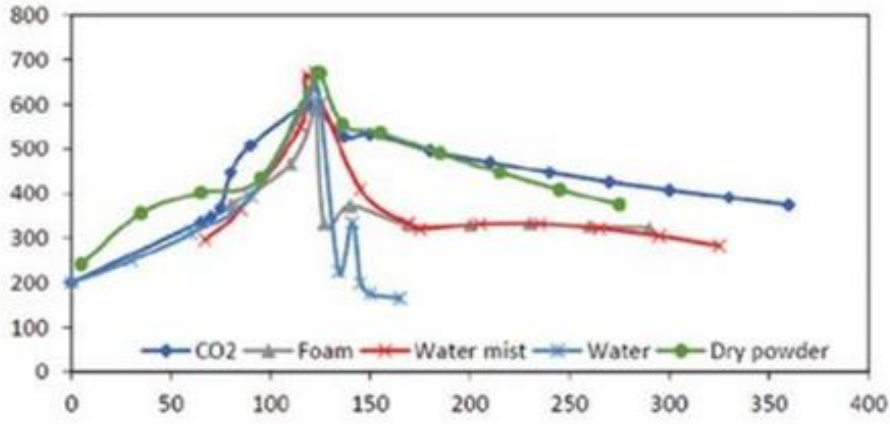


Şekil 7.2. Isıtılan Hücresinin Maksimum Sıcaklığı 650 °C



Şekil 7.3. Gaz Çıkışının ve Hücre Hacmi Artışının Etkileri

Çok hücreli paket, hücreler arasında uygun mesafe sağlanarak (aralarındaki ısı alışverişi en aza indirilmiştir) kontrolsüz termal yayılma olasılığını azaltacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda tek bir hücrenin kontrolsüz yanma sürecinin, doğrudan temas, sıcak gaz patlaması, alev çarpması gibi çeşitli eylemler yoluyla yanma mekanizmasının bitişik hücrelere kontrolsüz bir şekilde aktarılmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Dahili batarya sisteminde ulaşılan maksimum sıcaklık yaklaşık 700 °C ve alev yüksekliği 2 metreye kadar olmuştur. Tek tek hücrelerin söndürme (soğutma) testlerinin sonuçları Şekil 7.4.' de gösterilmektedir. Test edilen çeşitli maddeler arasında su ve köpüğün en etkili olduğu sonucuna varılmış. Çünkü hücreyi soğutarak yangının kısa sürede (<20 sn) söndüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 7.4. Hücreler Soğudukça Kaydedilen Azalma

Yukarıdaki grafik, suyun doğru bir şekilde uygulanmasının hücre sıcaklığını düşürmeye başladığını göstermektedir. Köpük kullanıldığında da benzer bir etki gözlemlenebilir. Böyle bir durumda köpük, suyu belirli bir yerde tutarak akümülatör yüzeyinden akmasını engeller ve bu da LIB’ deki ısının toplanmasına katkıda bulunur. Depolama tesisleri için, örneğin enerji veya işleme amaçlı piller için lityum teknolojisiyle yapılmış teknik çözümler geliştirmeyi amaçlayan araştırmalara önem verilmesi gerekir. Yangından Korunma Araştırma Vakfı’ nın 2019 yılında hazırladığı raporda bu tür çalışmaların sonuçları sunulmaktadır [106].

8. DENEYLER

Yapılan bir çalışmada farklı sistemlere sahip dört çeşit LIB' nın yüzey sıcaklığı, voltaj değişimi, kütle kaybı ve gaz üretim karakteristik parametreleri incelenmiş, pillerinin termal kaçak sürecinde CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄ ve diğer gazlar ürettiği ortaya konulmuştur [107]. Başka bir çalışmada, 18650 tipi lityum iyon pilin (% 98 Li (Ni_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}) O₂+% 2 LiMn₂O₄/grafit) farklı şarj durumlarında (SOC: % 100, % 50) gaz üretim dinamikleri kalorimetre ve standart bir gaz geçirmez kutu kullanılarak araştırılmış ve gaz üretim sürecinin dört aşamaya ayrıldığı ancak her aşamanın veri güvenilirliğinin değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [108]. Teknolojik gelişmelere öncülük eden lityum iyon bataryalar, taşınabilir enerji depolama sistemlerinin en önemli bileşeni olarak kullanılmaktadır. Mekanik, elektriksel veya termal zararlar ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilir. Pil sıcaklığının artmasıyla birlikte başlayan termal kaçak süreci erken fark edilmezse yangın veya patlamalarla karşılaşılabilir. Bu nedenle salınan gazların erken tespiti pil güvenliği için önemlidir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylere ait veriler aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 8.1. Deneylerin gerçekleştirildiği ortam



Sensörlerin yerleşim yeri



Deney alanı



Deney alanı



Deney alanı



Deney kabini



Gaz algılama ünitesi



Sensör



Sensörler



Sensörler



Kontrol Paneli



Termal kamera



Termal kamera



Pil



Şarj cihazı



Mikrometre

Tablo 8.2. Deneyde kullanılan ekipmanın teknik özellikleri

SENSÖRLER	TERMAL KAMERA
ATEX/IECEX/UKEX/UL/IN METRO ve SIL2/SIL3 sertifikalarına sahip sabit gaz dedektörleri	Doğrudan Sıcaklık Ölçümü (DTM)
Exproof	Üç Modlu Hassasiyet
IEC EN 60079-29-1 standardına uygun olarak ölçüm yapan	Uygulamaya özel belirli renk modları

Tablo 8.3. Deneyisel Çalışma Koşulları

No	Tarih	Saat	Yer	Pil türü	Sayı (adet)	Fiziksel Boyutu (mm)	Elektriksel Güç (mAh)	Ağırlık (g)	SOC (%)	Sıcaklık (°C)	Hasar şekli
1	8.11.2023	10.00	KOBİTEM	Li-İyon	1	18650	2800	34	80	24	Isıtma
2	8.11.2023	10:30	KOBİTEM	Li-İyon	8	18650	2800	34	0	24	Isıtma (LPG) @ 460 °C
3	8.11.2023	11.00	KOBİTEM	Li-İyon (kese tipi)	1	727	2800	34	0	24	Delme (balta)
4	8.11.2023	12.00	KOBİTEM	Li-İyon	2	18650	2800	34	80	24	Isıtma (LPG) @ 460 °C
5	8.11.2023	14.00	KOBİTEM	Li-İyon	4	18650	2800	34	80	24	Isıtma (LPG) @ 350 °C
6	8.11.2023	14.30	KOBİTEM	Li-İyon	1	18650	2800	34	80	24	Delme (6 cm' lik çivi)
7	8.11.2023	15.00	KOBİTEM	Li-İyon	1	18650	2800	34	80	24	Kimyasal etki (HCl ve NaClO)
8	8.11.2023	15.30	KOBİTEM	Li-İyon	1	18650	2800	34	80	24	Yüksekten düşme (3,6 ve 9m' den 15 tekrar)
9	8.11.2023	16.30	KOBİTEM	Li-İyon	1	18650	2800	34	80	24	Ağırlık düşürme (3 kg; 1m' den 15 tekrar)
10	7.12.2024	14.36	SAÜ	Li-İyon	1	18650	2400	34	70	12	Delme (6 cm' lik çivi)
11	7.12.2024	15:10	SAÜ	Li-İyon	1	18650	2400	34	70	12	Delme (6 cm' lik çivi)
12	7.12.2024	15:45	SAÜ	Li-İyon	1	18650	2400	34	70	9	Delme (6 cm' lik çivi)
13	7.12.2024	16:15	SAÜ	Li-İyon	1	18650	2400	34	70	9	Delme (6 cm' lik çivi)
14	10.12.2024	10:47	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	14	Delme (6 cm' lik çivi)
15	10.12.2024	11:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	14	Delme (6 cm' lik çivi)
16	10.12.2024	11:50	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	14	Delme (6 cm' lik çivi)
17	10.12.2024	12:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	14	Delme (6 cm' lik çivi)
18	10.12.2024	13:00	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	14	Delme (6 cm' lik çivi)
19	10.12.2024	15:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	9	Delme (6 cm' lik çivi)
20	10.12.2024	16:00	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	9	Delme (6 cm' lik çivi)
21	10.12.2024	16:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	3600	34	80	9	Delme (6 cm' lik çivi)
22	10.12.2024	16:40	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	9	Delme (6 cm' lik çivi)
23	10.12.2024	17:00	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	9	Delme (6 cm' lik çivi)
24	10.12.2024	17:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	9	Delme (6 cm' lik çivi)
25	10.12.2024	17:40	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	9	Delme (6 cm' lik çivi)
26	10.12.2024	18:00	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	8	Delme (6 cm' lik çivi)
27	10.12.2024	18:20	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	8	Delme (6 cm' lik çivi)
28	10.12.2024	18:40	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	7	Delme (6 cm' lik çivi)
29	10.12.2024	18:55	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	7	Delme (6 cm' lik çivi)
30	10.12.2024	19:10	SAÜ	Li-İyon	1	18650	4800	34	60	7	Delme (6 cm' lik çivi)

Tablo 8.4. Deney 1. 2800 mAh. % 80 SOC pil

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 10:00
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: Cell boyutunda 2800 mAh. gücünde 34 gr. ağırlığında % 80 doluluk oranında tek bir 18650 lityum iyon pil, yukarıda bahsedilen ortam koşullarında, etrafı kapalı ön kısmı açık bırakılan bir yakma odası içerisinde 460 °C sıcaklığa maruz bırakıldı. Alev kaynağı pilin üzerine tutularak ısıtılan pilde başlangıçtan 2 dakika 33 saniye sonra termal kaçak meydana geldi ve sonrasında pilin patladığı gözlemlendi.

Tablo 8.5. Deney 1 verileri

		
Mikrometre değeri	% 80 doluluk oranında pil	Pilin patlama anı

Tablo 8.6. Deney 2. 8 adet seri bağlı boş pilin aleve maruz bırakılması

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil (8 adet)
Elektriksel gücü	: 2800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 0
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 10:30
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 8 adet 18650 % 0 SOC cell boyutu lityum iyon pil 460 °C lik lpg alevine maruz bırakıldı. 3 dk. 12. saniyede pillerde termal kaçak gözlemlendi ancak bir patlama gerçekleşmedi.

Tablo 8.7. Deney 2 verileri

		
Alev teması	3. dk. 11. saniye	13 dk. 12 saniye
		
22. dk. 8. saniye	22. dk. 20 sn.	Deney sonu

Tablo 8.8. Deney 3. Kese tipi lityum iyon pili itfaiyeci baltası ile delme

Pil türü	: Kese tipi lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 0
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 11:00
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 1 adet % 0 SOC seviyesinde kese tipi lityum iyon pil itfaiyeci baltası ile delindi. Pilde bir alevlenme gözlemlenmedi.

Tablo 8.9. Deney 3 verileri

		
Deneyde kullanılan pil	Delme anı	Alevlenme olmadı

Tablo 8.10. Deney 4. İki pilin alev maruz bırakılması

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 12:20
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 2 adet % 80 SOC seviyesi cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 460°C' lik lpg alevine maruz bırakıldı. Bir pilde 23. saniyede termal kaçak gözlemlendi ve 25. saniyede pil patladı. Pilin patlama anındaki sıcaklığı 293 °C kaydedildi. İkinci pil 27. saniyede patladı ve 247 °C sıcaklık ölçüldü.

Tablo 8.11. Deney 4 verileri

Deneyde kullanılan piller

İlk pilin patlama anı

İkinci pilin patlama anı

Tablo 8.12. Deney 5. Dört pilin lpg alevine maruz bırakılması

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil (4 adet)
Elektriksel gücü	: 2800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 14:00
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 4 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 350 °C' lik lpg alevine maruz bırakıldı. 48. saniyede pillerden birinde termal kaçak meydana geldi ve pil patladı. İkinci pil 53. saniyede, üçüncü pil 55. saniyede ve dördüncü pil 56. saniyede patladı.

Tablo 8.13. Deney 5 verileri

		
Deneyde kullanılan piller	Alev teması	İlk pilin patlama anı
		
İkinci pilin patlama anı	Üçüncü pilin patlama anı	Dördüncü pilin patlama anı

Tablo 8.14. Deney 6. Çivi ile darbe

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 14:30
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 8 cm.' lik bir çivi ile delindi. Pil 4 dk. 20 sn. gözlemlenerek termal kaçak yaşanmadığı kaydedildi. Gözlemlenen süre içerisinde herhangi bir sıcaklık değişimi olmadı. En yüksek sıcaklık 62 °C olarak kaydedildi.

Tablo 8.15. Deney 6 verileri

		
Pilin delinme anı	Pilin delinme anına ait termal kamera görüntüsü	Delinen pilin termal kamera görüntüsü

Tablo 8.16. Deney 7. Kimyasala Maruziyet

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 15:00
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 500 ml hidrojen klorürün (tuz ruhu) bulunduğu bir kap içerisine bırakıldı. İlk bırakılma anından 8 dk. sonra hareketlenme gözlemlendi. 12 dk. 55 sn. sonra termal kaçak gözlemlendi ancak alevlenme gözlemlenmedi. İkinci olarak 250 ml hidrojen klorür ve 250 ml sodyum hipokloritten (çamaşır suyu) oluşturulan 500 ml çözelti içerisine % 80 doluluk oranında başka bir pil bırakılarak tepkileri gözlemlendi. İlk pil ile benzer kimyasal tepkimeler meydana geldi ancak bir alevlenme gözlemlenmedi.

Tablo 8.17. Deney 7 verileri

		
Başlangıç anı	500 ml HCl	250 ml HCl

Tablo 8.18. Deney 8. Yüksekten Düşme

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 15:30
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil ilk önce 3 metre, sonra 6 metre daha sonra da 9 metre yükseklikten 5' er kez düşürülmüştür. Sonuç olarak lityum iyon pilde aldığı basınç sonrası ezik ve yaralanmalar gözlemlenmiş ancak herhangi bir termal kaçak durumu gözlemlenmemiştir.

Tablo 8.19. Deney 8 verileri

	
Yükseklik kulesi	Deneyde kullanılan pil

Tablo 8.20. Deney 9. Pilin üzerine ağırlık düşmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2800 mAh
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 24 °C
Tarih	: 08.11.2023
Saat	: 16:30
Yer	: KOBİTEM

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pilin üzerine 3 kg' lık ağırlık 15 kez 1 metre yükseklikten bırakılmıştır. Sonuç itibariyle pilde ezilmeler meydana gelmiş ancak bir termal kaçak durumu gözlenmemiştir.

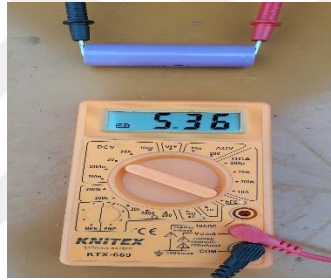
Tablo 8.21. Deney 9 verileri

	
Deneyde kullanılan pil	Pilin son hali

Tablo 8.22. Deney 10. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2400 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 70
Hava sıcaklığı	: 12 °C
Tarih	: 07.12.2024
Saat	: 14:36
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 70 SOC 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 2 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından H₂ 25 ppm, VOC' ler 49 ppm, HCl 15 ppm ve LEL % 6 olarak kaydedilmiştir. 16. saniyede pil alev aldı. Pil sıcaklığı 248 °C olarak kaydedildi.

Tablo 8.23. Deney 10 verileri

Delinen pil

Mikrometre değeri

Sensör verileri

Tablo 8.24. Deney 11. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2400 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 70
Hava sıcaklığı	: 12 °C
Tarih	: 07.12.2024
Saat	: 15:10
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 70 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 3 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HC % 3 LEL, H₂ 253 ppm, VOC' ler 38 ppm ve HCl 3,7 ppm olarak kaydedilmiştir. 16. saniyede pil alev aldı. Pil sıcaklığı 268 °C olarak kaydedildi.

Tablo 8.25. Deney 11 verileri

		
Delinen pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
Sensör verileri 3. saniye	Sensör verileri 49. saniye	Sensör verileri 52. saniye

Tablo 8.26. Deney 12. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2400 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 70
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 7.12.2024
Saat	: 15:45
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 70 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 7 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 0,8 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 78 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.27. Deney 12 verileri

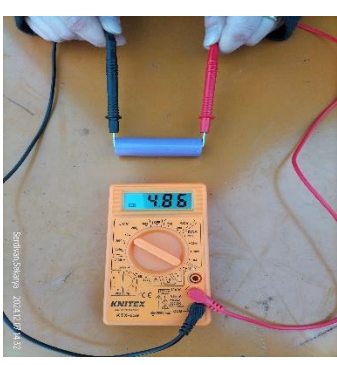
		
Delinen pil	Mikrometre değeri	Sensör Verileri

Tablo 8.28. Deney 13. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 2400 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 70
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 7.12.2024
Saat	: 16:15
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 70 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 7 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 13 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 84 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.29. Deney 13 verileri

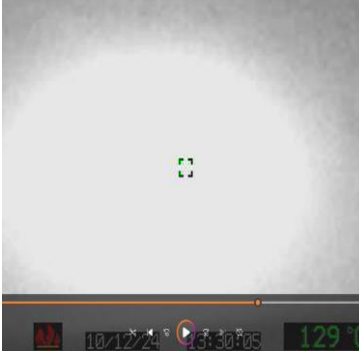
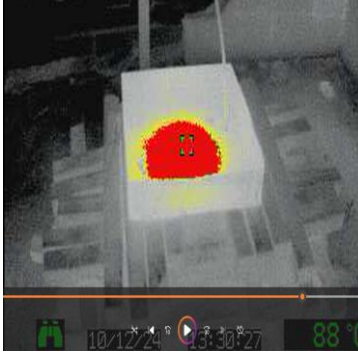
		
Delinen pil	Mikrometre ile ölçülen değeri	Sensör Verileri

Tablo 8.30. Deney 14. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 14 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 10:47
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 20. saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından H₂ 14 ppm, VOC 1,7 ve HCl 2,2 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 160 °C olarak kaydedildi. Pil 44. saniyede alev aldı.

Tablo 8.31. Deney 14 verileri

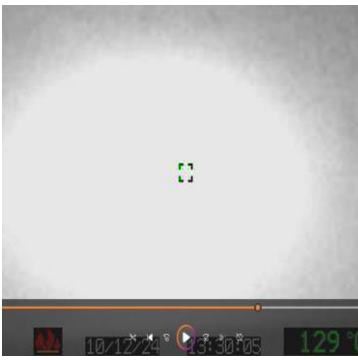
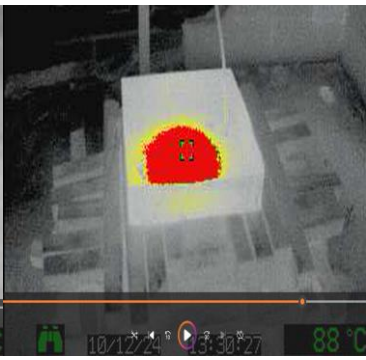
		
Delinen pil	Mikrometre ile ölçülen değeri	Pilde gaz salımı
		
44. saniyede alev aldı	Termal kamera görüntüsü	Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.32. Deney 15. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 14 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 11:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 23 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından H₂ 124 ppm, VOC 1,2 ppm ve HCl 2,4 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 256 °C olarak kaydedildi. Pil 57. saniyede alev aldı.

Tablo 8.33. Deney 15 verileri

		
Delinen pil	Mikrometre ile ölçülen değeri	23. saniye gaz salımı
		
57. saniyede alev aldı	Termal kamera görüntüsü	Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.34. Deney 16. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 14 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 11:50
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 7 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 2,9 ve HCl 3,1 ppm olarak kaydedildi. olarak kaydedildi. Pil 181. saniyede alev aldı. Pil sıcaklığı 265 °C olarak kaydedildi.

Tablo 8.35. Deney 16 verileri

Delinen pil

Mikrometre değeri

Termal kamera



7. saniye gaz salımı

181. saniyede alev aldı

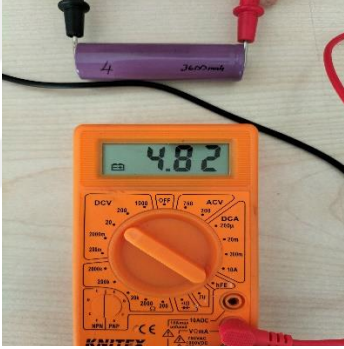
Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.36. Deney 17. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 14 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 12:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 17 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından H₂ 224 ppm, VOC 3,2 ppm ve HCl 2,1 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 158 °C olarak kaydedildi. Pil 34. saniyede alev aldı.

Tablo 8.37. Deney 17 verileri

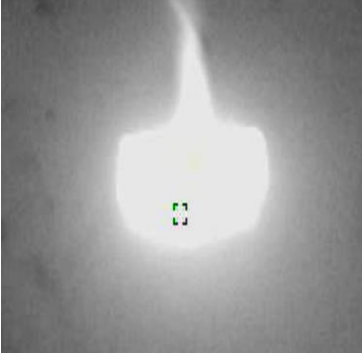
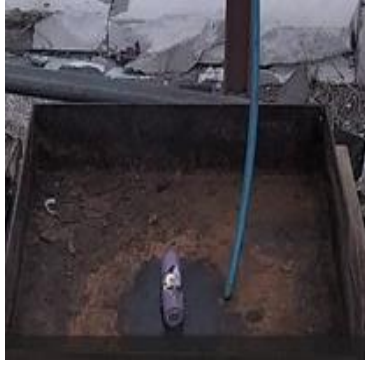
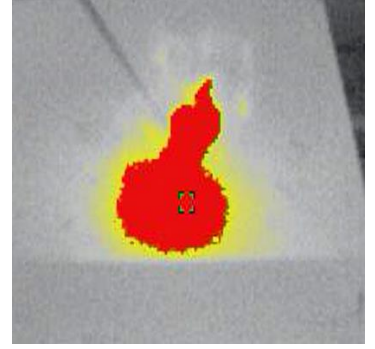
		
Delinen pil	Mikrometre değeri	Termal kamera
		
34. saniyede alev aldı	37. saniye	Pilin sıcaklığı 158 °C

Tablo 8.38. Deney 18. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 14 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 13:00
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 7 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından ortak 28 ppm, VOC 14 ppm ve HCl 3,2 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 192 °C olarak kaydedildi. Pil 34. saniyede alev aldı.

Tablo 8.39. Deney 18 verileri

		
Delinen pil	Mikrometre değeri	7. saniye gaz salımı
		
34. saniyede alev aldı	53. saniye	Pilin sıcaklığı 158 °C

Tablo 8.40. Deney 19. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 15:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 3 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından ortak 36 ppm, H₂ 211 ppm, VOC 19 ppm ve HCl 1,1 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 262 °C olarak kaydedildi. Pil 24. saniyede alev aldı.

Tablo 8.41. Deney 19 verileri

		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
262 °C termal kamera	24. saniye	58. saniye

Tablo 8.42. Deney 20. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 16:00
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 3 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 1,4 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 112 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.43. Deney 20 verileri

		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
Pilin delinme anı	3. saniye gaz salımı	12. saniye termal kamera

Tablo 8.44. Deney 21. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 3600 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 80
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 16:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 80 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 18 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 11 ppm, H₂ 227 ppm ve HCl 2,9 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 178 °C olarak kaydedildi. Pil 120. saniyede alev aldı.

Tablo 8.45. Deney 21 verileri

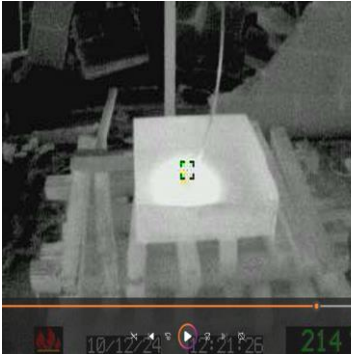
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
18. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Pilin son hali

Tablo 8.46. Deney 22. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 16:40
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 29 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 1,3 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 266 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.47. Deney 22 verileri

		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
Gaz salımı	241 °C	266 °C

Tablo 8.48. Deney 23. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 17:00
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 15 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 1,7 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 88 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.49. Deney 23 verileri

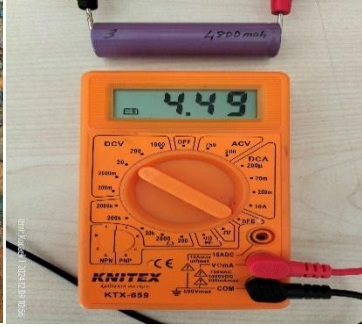
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
15. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.50. Deney 24. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 17:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 31 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 0,3 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 39 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.51. Deney 24 verileri

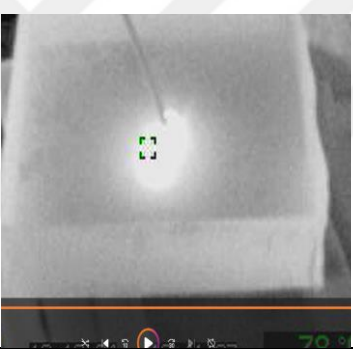
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
31. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Pilin son hali

Tablo 8.52. Deney 25. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 9 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 17:40
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 16 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 0,1 ppm ve HCl 0,4 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 89 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.53. Deney 25 verileri

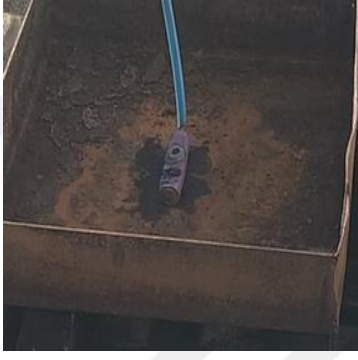
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
16. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Pilin son hali

Tablo 8.54. Deney 26. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 8 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 18:00
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 7 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 1,1 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 88 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.55. Deney 26 verileri

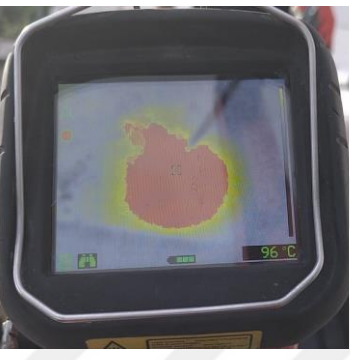
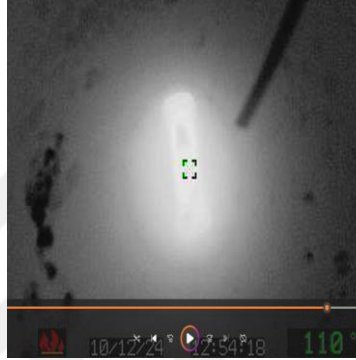
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
7. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Pilin son hali

Tablo 8.56. Deney 27. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 8 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 18:20
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 1 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından VOC 0,9 ppm ve HCl 1,0 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 110 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.57. Deney 27 verileri

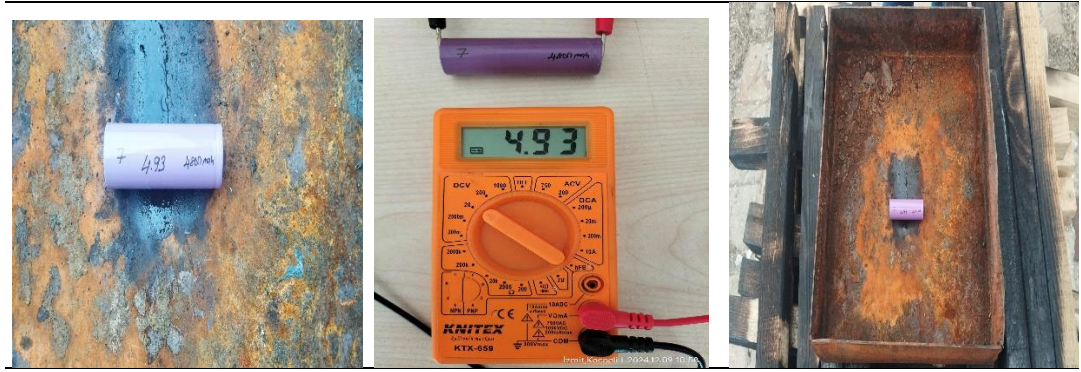
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
1. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.58. Deney 28. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 7 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 18:40
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 6 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 0,4 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 108 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

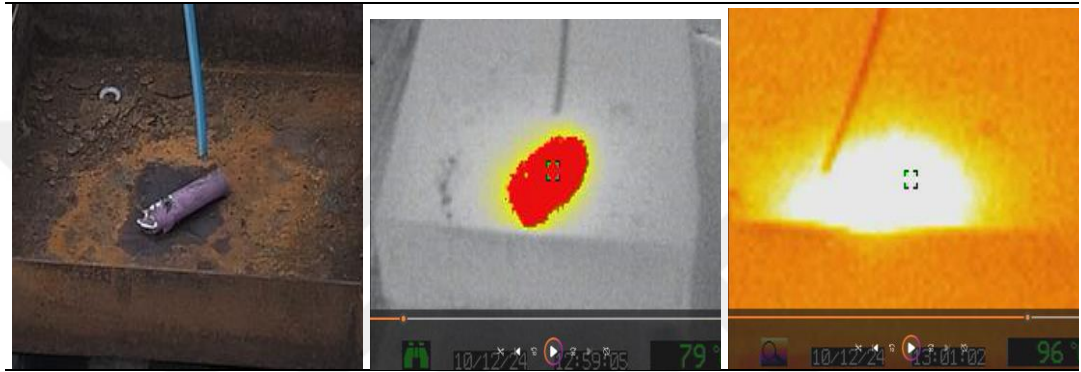
Tablo 8.59. Deney 28 verileri



Delinen Pil

Mikrometre değeri

Deney ortamı



6. saniye gaz salımı

Termal kamera görüntüsü

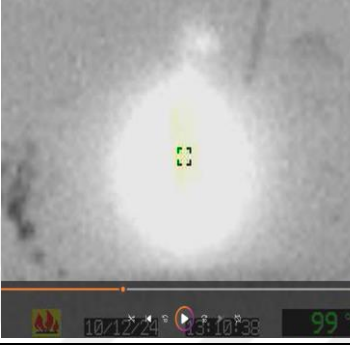
Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.60. Deney 29. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 7 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 18:55
Yer	: SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 2 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 2,2 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 99 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

Tablo 8.61. Deney 29 verileri

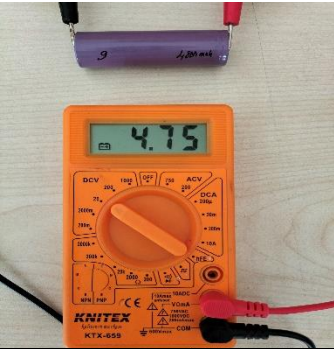
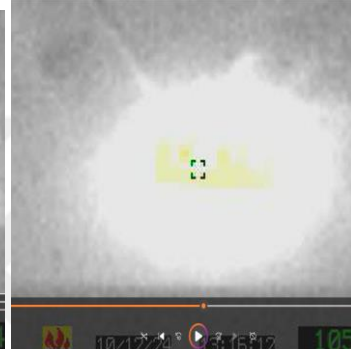
		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
2. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Pilin son hali

Tablo 8.62. Deney 30. Pilin Delinmesi

Pil türü	: Cell boyutu 18650 lityum iyon pil
Elektriksel gücü	: 4800 mAh.
Ağırlık	: 34 gr.
SOC	: % 60
Hava sıcaklığı	: 7 °C
Tarih	: 10.12.2024
Saat	: 19:10
Yer	: SAÜ Bilimleri Enstitüsü Araştırma Merkezi

Deneyin yapılışı: 1 adet % 60 SOC cell boyutunda 18650 lityum iyon pil 6 cm. uzunluğunda bir çivi ile delindi. Pil delindikten 1 saniye sonra gaz salımı başladı. Sensörler tarafından HCl 0,8 ppm olarak kaydedildi. Pil sıcaklığı 177 °C olarak kaydedildi. Pilde alevlenme olmadı.

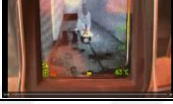
Tablo 8.63. Deney 30 verileri

		
Delinen Pil	Mikrometre değeri	Deney ortamı
		
1. saniye gaz salımı	Termal kamera görüntüsü	Termal kamera görüntüsü

Tablo 8.64. 2800 mAh. deneyleri

Deney 1 2800 mAh. % 80 SOC			
	Mikrometre değeri	Isıtılan pil	Pilin patlama anı
Deney 2 2800 mAh. % 80 SOC			
	22. dk. 8. saniye	22. dk. 20 sn.	Deney sonu
Deney 3 2800 mAh. % 0 SOC			
	Deneyde kullanılan pil	Delme anı	Alevlenme olmadı

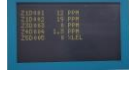
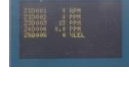
Tablo 8.64. (Devamı) 2800 mAh. deneyleri

Deney 4 2800 mAh. % 80 SOC			
	Deneyde kullanılan piller	İlk pilin patlama anı	İkinci pilin patlama anı
			
Deney 5 2800 mAh. % 80 SOC			
	Deneyde kullanılan piller	İlk pilin patlama anı 48. saniye	İkinci pilin patlama anı 53. saniye
			
Deney 6 2800 mAh. % 80 SOC			
	Pilin delinme anı	Pilin delinme anına ait termal kamera görüntüsü	Delinen pilin termal kamera görüntüsü
			
Deney 7 2800 mAh. % 80 SOC	Başlangıç anı	500 ml HCl	250 ml HCl
			Alevlenme olmadı
	Yükseklik kulesi	Deneyde kullanılan pil	Alevlenme olmadı
Deney 9 2800 mAh. % 80 SOC			Alevlenme olmadı
	Deneyde kullanılan pil	Pilin son hali	Alevlenme olmadı

% 0 ve % 80 SOC seviyelerinde 2800 mAh. gücünde 9 ayrı pil çeşitli dış etkenlere maruz bırakılarak verileri kaydedilmiştir. Deneylere başlanmadan önce mikrometre ile pillerin mAh. değerleri ölçülmüştür. Deneyleri kaydetmek için kamera, sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için termal kamera, pilleri delmek için çivi ve çekiç, yüksekten düşme deneyi için yükseklik kulesi, pile darbe için ağırlık, kimyasala maruziyet için kimyasalların yer aldığı deney ortamında yapılan tüm işlemler kaydedilmiştir. Tablo 8.64.' te bu deneylere ait bilgiler yer almaktadır. Bu grup

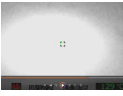
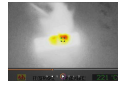
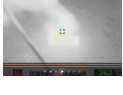
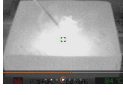
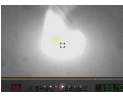
deneylerde kullanılan pillerin 4 tanesinde alevlenme meydana gelmiştir. Her bir pil için ayrı bir deney dosyası oluşturulmuştur. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 325 °C olarak kaydedilmiştir.

Tablo 8.65. 2400 mAh. % 70 SOC seviyelerinde pillerin gaz salımı

2400 mAh. 18650 % 70 SOC Pil Deneyleri	Kullanılan pil (% 70 SOC)	Nominal Kapasite (mAh.)	Deney ortamı	Çıkan gazlar
Deney 1				
Deney 2				
Deney 3				
Deney 4				

% 70 SOC seviyelerinde 2400 mAh. gücünde 4 ayrı pil delinerek verileri kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce mikrometre ile mAh. değerleri ölçülmüştür. Yeni olan pillerin şarjları ortalama % 70 SOC seviyelerine kadar doldurulmuştur. Deneyleri kaydetmek için kamera, sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için termal kamera, pilleri delmek için çivi ve çekiç, gaz analizlerini yapmak için sensörlerin yer aldığı deney ortamında yapılan tüm işlemler kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce numaralandırılarak fotoğrafları çekilip mAh. kapasiteleri kaydedilmiştir. 6 cm uzunluğunda çivi ile delinen pillerde termal kaçak başlangıcı gözlemlenmiştir. Her bir pil için gaz salımı farklı sürelerde başlamıştır. Tablo 8.65.' te bu deneylere ait bilgiler yer almaktadır. Bu grup deneylerde kullanılan pillerin 3 tanesinde alevlenme meydana gelmiştir. Sensörler vasıtasıyla algılanan gazlara ait ppm değerleri kontrol panelinden takip edilmiştir. Sonrasında yazılım sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına alınan verilerden tablolar hazırlanmıştır. Her bir pil için ayrı bir deney dosyası oluşturulmuştur. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 290 °C olurken gaz salımı piller delindikten 1-19 saniye aralığında gerçekleşmiştir.

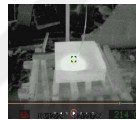
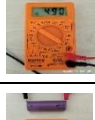
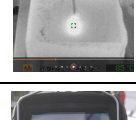
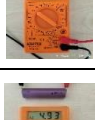
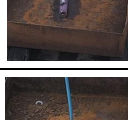
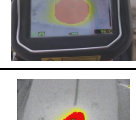
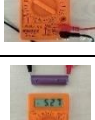
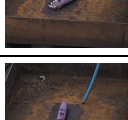
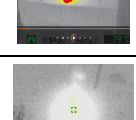
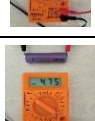
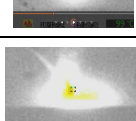
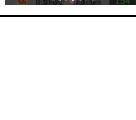
Tablo 8.66. 3600 mAh. % 80 SOC seviyesindeki pillerin gaz salımı

3600 mAh. 18650 % 80 SOC PİL Deneyleri	Kullanılan pil (% 80 SOC)	Nominal Kapasite (mAh.)	Deney ortamı	Termal kamera görüntüsü	Gaz salımı başlangıcı (saniye)	Alevlenme (saniye)	Ulaşılan max. sıcaklık (°C)
Deney 1					20.	44.	160
Deney 2					23.	57.	256
Deney 3					7.	181.	265
Deney 4					17.	34.	158
Deney 5					7.	34	192
Deney 6					3.	24.	262
Deney 7					3.	Yok	112
Deney 8					18.	120.	178

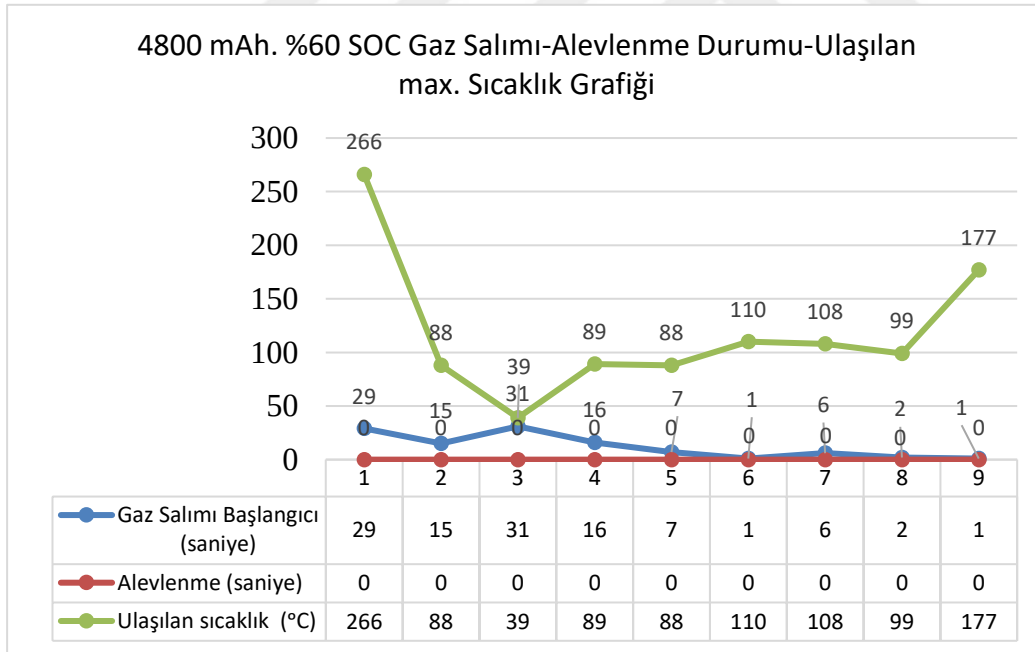
% 80 SOC seviyelerinde 3600 mAh. gücünde 8 ayrı pil delinerek verileri kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce mikrometre ile mAh değerleri ölçülmüştür. Yeni olan pillerin şarjları ortalama % 80 SOC seviyelerine kadar doldurulmuştur. Deneyleri kaydetmek için kamera, sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için termal kamera, pilleri delmek için çivi ve çekiç, gaz analizlerini yapmak için sensörlerin yer aldığı deney ortamında yapılan tüm işlemler kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce numaralandırılarak fotoğrafları çekilip mAh. kapasiteleri kaydedilmiştir. 6 cm

uzunluğunda çivi ile delinen pillerde termal kaçak başlangıcı gözlemlenmiştir. Her bir pil için gaz salımı farklı sürelerde başlamıştır. Tablo 8.6.' da bu deneylere ait bilgiler yer almaktadır. Bu grup deneylerde kullanılan pillerin 7 tanesinde alevlenme meydana gelmiştir. Sensörler vasıtasıyla algılanan gazlara ait ppm değerleri kontrol panelinden takip edilmiştir. Sonrasında yazılım sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına alınan verilerden tablolar hazırlanmıştır. Her bir pil için ayrı bir deney dosyası oluşturulmuştur. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 265 °C olurken gaz salımı piller delindikten 3-23 saniye aralığında gerçekleşmiştir.

Tablo 8.67. 4800 mAh % 60 doluluk oranında pillerde gaz salımı

4800 mAh. % 60 SOC Pil Deneyleri	Kullanılan pil (% 60 SOC)	Nominal Kapasite (mAh.)	Deney ortamı	Termal kamera görüntüsü	Gaz Salımı Başlangıcı (saniye)	Alevlenme (saniye)	Ulaşılan sıcaklık (°C)
Deney 1					29	Yok	266
Deney 2					15	Yok	88
Deney 3					31	Yok	39
Deney 4					16	Yok	89
Deney 5					7	Yok	88
Deney 6					1	Yok	110
Deney 7					6	Yok	108
Deney 8					2	Yok	99
Deney 9					1	Yok	177

% 60 SOC seviyelerinde 4800 mAh. gücünde 9 ayrı pil delinerek verileri kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce mikrometre ile mAh değerleri ölçülmüştür. Yeni olan pillerin şarjları ortalama % 60 SOC seviyelerine kadar doldurulmuştur. Deneyleri kaydetmek için kamera, sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için termal kamera, pilleri delmek için çivi ve çekiç, gaz analizlerini yapmak için sensörlerin yer aldığı deney ortamında yapılan tüm işlemler kaydedilmiştir. Piller delinmeden önce numaralandırılarak fotoğrafları çekilip mAh. kapasiteleri kaydedilmiştir. 6 cm uzunluğunda çivi ile delinen pillerde termal kaçak başlangıcı gözlemlenmiştir. Her bir pil için gaz salımı farklı sürelerde başlamıştır. Tablo 8.67.' de bu deneylere ait bilgiler yer almaktadır. Bu grup deneylerde kullanılan pillerin hiçbirinde alevlenme gözlemlenmemiştir. Sensörler vasıtasıyla algılanan gazlara ait ppm değerleri kontrol panelinden takip edilmiştir. Sonrasında yazılım sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına alınan verilerden tablolar hazırlanmıştır. Her bir pil için ayrı bir deney dosyası oluşturulmuştur. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 266 °C olurken gaz salımı piller delindikten 1-29 saniye aralığında gerçekleşmiştir.



Şekil 8.1. 4800 mAh. % 60 SOC Gaz Salımı-Alevlenme-Sıcaklık Grafiği

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Lityum iyon pillerin elektrolitinde bulunan lityum tuzları termal kaçak sırasında HCl üretebilmektedir. Tam olarak yanamayan bileşikler nedeniyle CO salımı gerçekleşebilmekte ancak ideal yanma süreci gerçekleştiği takdirde CO₂ çıkışı başlayabilmektedir. Pil içeriğinde kullanılan organik çözücüler organik bileşiklere dönüşebilir. Bu bilgiler doğrultusunda termal kaçak sürecinde salım gösterebilme ihtimali olan gazları erken tespit edebilmek pil güvenliği açısından önemlidir. Bu nedenle yangın ve patlama riskini azaltabilmek için pillerin güvenli yönetimi oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada LIB'lerin çeşitli durumlar sonucunda oluşturabilecekleri gaz salımları incelenmiştir. Yapılan deneysel analizler LIB'lerin darbe sonucu ve alev maruziyeti gibi durumlar karşısında belirli oranlarda gaz salımı gerçekleştirdiğini göstermektedir. Özellikle darbe sonucu ve ısı artışı kaynaklı gaz salımının arttığı ve LIB'lerin güvenliğini tehdit edebilecek potansiyel tepkimelerin gerçekleşebileceği gözlemlenmiştir. Çalışma, LIB'lerin kullanım güvenliği açısından gaz salımı potansiyelinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gaz salımının darbe, ısı artışı vb. termal, elektriksel veya mekanik arızalar ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda bataryaların güvenli kullanımı için hem batarya yönetim sistemleri hem de güvenlik önlemlerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılması gerektiği söylenebilir. Erken tespit mekanizmalarıyla yapılabilecek iyileştirme çalışmaları pil güvenliğini arttırabilir. Pillerin doluluk oranları termal kaçak süreciyle yakından ilgilidir. Piller ortalama % 60-70 SOC seviyelerindeyken ve pil sıcaklığı 90 °C'nin üzerine çıkmaya başladığında risk faktörü artmaktadır. Yapılan deneylerde % 0-60-70-80 SOC seviyelerinde 2400-2800-3600-4800 mAh. gücünde 18650 cell boyutu lityum iyon piller bir çivi yardımıyla delinerek sonuçları gözlemlendi. Darbenin geldiği yer, pilin doluluk oranı, pil kimyasının havayla teması, darbe açısı, yeri ve sayısı vb. birçok faktörün termal kaçak sürecini etkilediği gözlemlendi. Bu tez çalışmasında 30 ayrı pil belirli ortam koşullarında delinerek termal kaçak başlangıcı ve sensörler vasıtasıyla 5 farklı gazın salımı incelendi. TR süreci başladığında piller alev almadan belirli bir süre önce gaz salımının başladığı gözlemlendi. H₂, VOC, HCl, CO' in ulaştığı ppm değerleri ve % LEL

aralıkları gözlemlenmiştir. Pillerde oluşan sıcaklık değişimleri termal kamera ile takip edildi. Ulaşılan en yüksek sıcaklık kaydedildikten sonra piller 20-30 dk. aralığında gözlemlendi. Sıcaklığı düşmeye başlayan piller ayrı bir alanda toplanarak yeni pil delme işlemine geçildi.

% 0 ve % 80 SOC seviyesinde bazıları 2800 mAh. gücünde ve farklı özelliklerde 9 pil çeşitli dış etkenlere maruz bırakılarak gözlemlenmiştir. Gaz salımı 7-24 sn. aralığında gerçekleşmiştir. Ulaşılan en yüksek sıcaklık 325 °C olarak kaydedilmiştir.

% 60 SOC seviyesinde 4800 mAh. gücünde 9 ayrı pil tek tek delinerek verileri kaydedilmiştir. Bu pillerden hiçbirinde alevlenme gözlemlenmemiştir. Pillerin ulaştığı max. Sıcaklık 177 °C olmuştur. Gaz salımı 1-29 saniye aralığında gerçekleşmiştir. Tablo 8.66.' da yer alan veriler elde edilmiştir.

% 70 SOC seviyesinde 2400 mAh. gücünde 4 pil ayrı ayrı delinerek gözlemlenmiştir. Gaz salımı 2-18 sn. aralığında gerçekleşmiştir. 5 çeşit gazın salımı sensörler vasıtasıyla kaydedilmiştir. Pillerden 3 tanesi alev alırken 1 tanesinde alevlenme gözlemlenmemiştir. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 290 °C olarak kaydedilmiştir. Verileri tablo 8.64' de gösterilmektedir.

% 80 SOC seviyesinde 3600 mAh. gücünde 8 pil ayrı ayrı delinerek gözlemlenmiştir. Gaz salımı 3-23 sn. aralığında gerçekleşmiştir. 7 pil alev alırken 1 tanesinde alevlenme olmamıştır. Ulaşılan max. sıcaklık 265 °C olarak kaydedilmiştir. Verileri tablo 8.65.' de yer almaktadır.

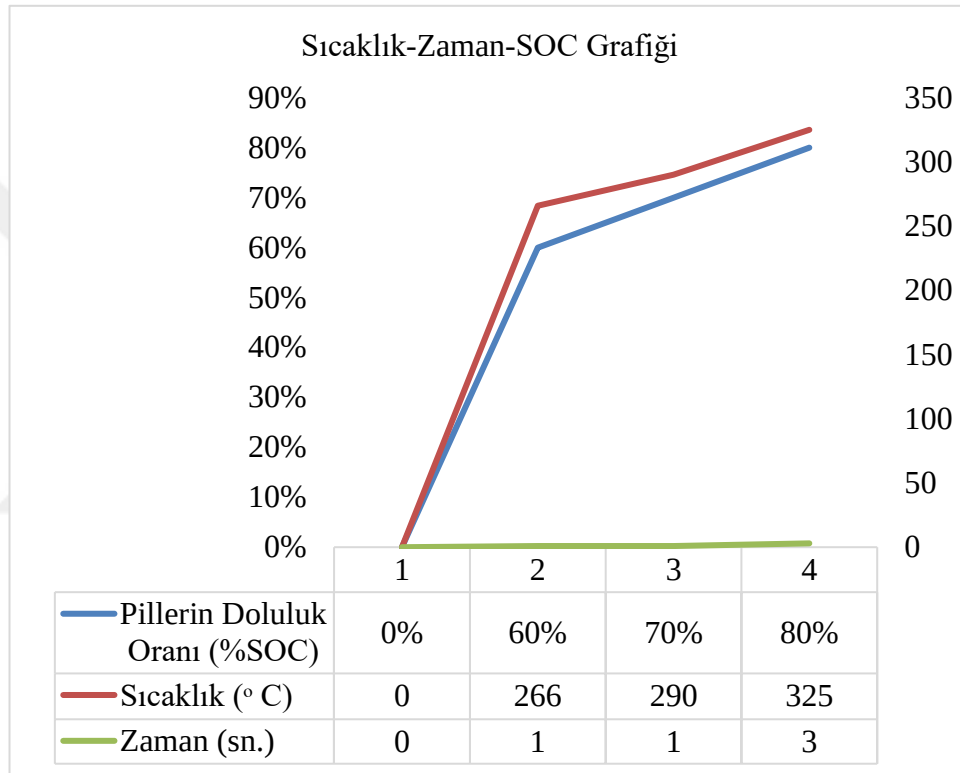
% 0 ve % 60 seviyesindeki pillerde alevlenme olmadı. Bu pillerde sadece HCl salımı gözlemlendi.

Gerçekleştirilen deneylerde HCl en yüksek 15 ppm, VOC 49 ppm, H₂ 253 ppm, CO 254 ppm ve HC % 6 LEL olarak kaydedilmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerde en düşük gaz salımı süresi 1. saniyede gerçekleşirken en yüksek pil sıcaklığı 325 °C olarak kaydedilmiştir. En yüksek sıcaklığın 325 °C olarak kaydedildiği pil 2800 mAh. gücünde, % 80 SOC seviyesindedir ve gaz salımı 7. saniyede başlamıştır. 1. saniyede gaz salımına başlayan pillerden birinin sıcaklığı 177 °C diğerinin sıcaklığı 110 °C olarak gözlemlenmiştir ancak bu pillerde alevlenme olmamıştır. Diğer en düşük gaz salımı başlangıcı 3. saniyede gerçekleşmiştir. Bu pilin ulaştığı sıcaklık 262 °C olarak kaydedilirken pil 24. saniyede alev almıştır.

Tablo 9.1. Çalışmadan Elde Edilen Bulgular

Pil SOC Seviyesi	mAh. Gücü	Gerçekleştirilen Deney Sayısı	Ulaşılan Max. Sıcaklık (°C)	Gaz Salım Süreleri (sn.)	Alevlenme Durumu	Deney Numarası	Ulaşılan En Yüksek Sıcaklık	En Düşük Gaz Salımı
% 0 ve % 80	2800	9	325	7-24	5 tanesi alev aldı	Deney 4 (Tablo8.64)	*	-
% 60	4800	9	177	1-29	Yok	Deney 6 ve 9 (Tablo 8.65)	-	*
% 70	2400	4	290	2-18	3 tanesi alev aldı	-	-	-
% 80	3600	8	265	3-23	7 tanesi alev aldı	-	-	-

**Şekil 9.1. Sıcaklık-Zaman-SOC Grafiği**

Lityum iyon bataryaların yapısında anot, katot, elektrolit, seperatör ve koruyucu malzemeler bulunmaktadır. Anotların yapısında karbon bazlı grafit kullanımı tercih edilmektedir. Katotların yapısı genellikle kobalt oksitten oluşmaktadır. Elektrolit lityum tuzlarından oluşmaktadır ve bu tuzlar çözücülerle karıştırılarak kullanılmaktadır. Çözücüler ise genellikle etilen karbonat ve dimetil karbonat olarak tercih edilen organik bileşiklerdir. Seperatör polietilen ve polipropilenden oluşmaktadır. Koruyucu malzeme olarak alüminyum veya bakır folyo kullanılmaktadır. LIB'lerin TR si esnasında CO₂, CO, NH₃, CH₄, H₂, HF, C₂H₆ vb. gazlar salındığı literatürde yer almaktadır. Elektrot materyali veya elektrolitlerin ayrışması sonucu

CO₂ salınabilmektedir. Karbonlu metallerin yavaş yanması veya oksitlenmesi sonucu CO salınabilmektedir. Lityum tuzları veya elektrolitteki bileşenlerin bozunması sonucu NH₃ salınabilir. Organik çözücüler veya elektrolit bileşenleri yanarken CH₄ salınabilir. Elektrot materyalindeki su ve organik bileşiklerin ayrışması sırasında H₂ salınabilir. Elektrolit bileşiklerinin parçalanması sonucu HF salınabilir. HF su ile temas ederse HCl üretebilir. Bazı kimyasal reaksiyonlar ve elektrolitin bozunması oksijen salımına neden olabilir. CO₂ ve HF' ün yanıcılık özelliği yoktur. CO, NH₃, CH₄ ve H₂ ise yanıcıdır. LIB içerisinde alevlenmeyi önleyebilmek için CO₂ veya N₂ yerleştirilmesi direkt olarak etkili olmasa da ortamdaki O₂' ni azaltabileceği için yangın yayılımını azaltmaya yardımcı olabilir. LIB' lerde TR başladığında pilin elektriksel bağlantılarının kesilmesi, sistemi otomatik olarak devre dışı bırakacak güvenlik sistemleri, pilin hem dış yüzeyinin soğutulması hem de soğutma sıvıları kullanılarak pil iç sıcaklığının düşürülmesi önemlidir. LIB' lerin TR sinde % LEL seviyesinin tespit edilmesi, salınan gazların patlama seviyesine ulaşmadan havalandırma yapılabilmesi veya gazların tahliye edilebilmesi için önemlidir. VOC' lerin tespit edilmesi erken tedbirleri alabilmek için önemlidir. HF zehirli, korozif ve reaktif, renksiz ve keskin kokulu bir gazdır. Su ile reaksiyona girerek aşındırıcı asit oluşturabilir. Yanıcı olmamasına rağmen bazı metallerle reaksiyon verebilir. Tüm bu bilgiler ve gerçekleştirilen deneyler doğrultusunda LIB yangınları karmaşık yangınlar olarak tanımlanabilir. Salınan gazlardan bazıları yanıcı özellikte olmadığı halde çeşitli karışımlar ve reaksiyonlar sonucu yanıcılık durumu ortaya çıkabilmektedir. Salınan gazların erken tespit edilmesi ile yangınlar meydana gelmeden batarya paketleri içerisinde gerçekleştirilecek iyileştirme çalışmaları ile LIB yangınlarının önlenebileceği öngörülmektedir. Bu tez çalışması LIB' lerin belirli çevresel koşullarda ve belirli sayıda gerçekleştirilen deneyler ile elde edilen verilerden oluşan bir araştırma çalışmasıdır. Gelecek araştırmalarda farklı batarya tipleri ve daha geniş çevresel koşulların etkileri incelenebilir. Bataryalarda gaz salımını azaltmaya yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi, güvenli kullanım, yangınlarının söndürülmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Sonuç olarak LIB gaz salımı davranışları batarya güvenliği açısından önemli bir konu olup, bu alandaki gelişmeler enerji depolama sistemlerindeki teknolojinin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Wada, M., (2009). Research and Development of Electric Vehicles for Clean Transportation. *Journal of Environmental Sciences*, 21(6), 745-749. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62335-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62335-9).
- [2] Gong, H., Du, T., Luo, W.B., Yang, D. & Zhou, L.F. (2020). The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries. *Frontiers Chem.*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.578044>.
- [3] Caetano, R. E., Camargos, P., Ribeiro, G. S., Santos, I. R., & Santos, P. H. J. (2022). Perspectives on Lithium Ion Battery Categories For Electric Vehicle Applications: A Review of State of the Art. *Int. J. Energy Res.*, 46(13), 19258–19268. <https://doi.org/10.1002/er.7993>.
- [4] Cao, Ş., Çen, M., Ouyang, D., Wang, J., Liu, J. & Wang, Z. (2019). Effects of Heat Treatment and SOC on Fire Behaviors of Lithium Ion Batteries Pack. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7864-9>.
- [5] Lee, J. T., Nitta, N., Yushin G., & Wu, F. (2015). Lithium Ion Battery Materials: Present and Future. *Materials Today*, 18, 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
- [6] Qian, Y.J., Tang, Z.G., Tao, C. F., Wang, C.F., Wang, C. M., Ye, Q.P., & Zhou, T.T. (2020). *Sensing Technology for Battery Safety in Electric Vehicles*. *Clean J. Production*, 13 (18), 4636, 242. <https://doi.org/10.3390/en13184636>.
- [7] Andersson, P., Blomqvist, P., Larsson, F., Lorén, A. & Mellander, B. E. (2014). Characteristics of Lithium Ion Batteries During Fire Tests. *J. Power Sources*, 271, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>.
- [8] Jones, C., Serov, A., Sudarshan, M., & Tomar, V. (2022). *Investigation of Physical Effects on Prismatic Lithium-Ion Cell Electrodes After Partial Nail Puncture Using Raman Spectroscopy and Incremental Capacity Analysis*. 100174, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100174>.
- [9] Wang, H. at al. (2017). *Progressive Mechanical Indentation of Large Format Lithium Ion Cells*. *J. Power Sources*, 341, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.11.094>.
- [10] Howard, J. N. & Maleki, H. (2006). *Effects of Overdischarge on Performance and Thermal Stability of A Lithium Ion Cell*. *J. Power Sources*, 160, 1395–1402. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.043>.
- [11] Hu, X. at al. (2022). *Complex gas formation during combined mechanical and thermal treatments of spent lithium-ion-battery cells*. *Hazardous Mater.*, 431, 128541. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128541>.

- [12] Mao, B., Stolarov, S. I., Sun, J. & Wang Q. (2019). A Review of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies. *Energy Combustion Sci.*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.
- [13] Abraham, D. P., Roth, E. P. Kostecki, R., McCarthy, K., MacLaren S., & Doughty, D. H. (2006). *Diagnostic Examination of Thermally Abused Highpower Lithium-ion Cells*. *J. Power Sources*, 161(1), 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.088>.
- [14] Sun, J. at al. (2016). Toxicity a Serious Concern of Thermal Runaway from Commercial Lithium-ion Battery. *Nano Energy*, 27, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031>.
- [15] Nedjalkov, A. at al. (2016). Toxic Gas Emissions From Damaged Lithium Ion Batteries-Analysis And Safety Enhancement Solution. *Batteries*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.3390/batteries2010005>.
- [16] Jin, Y. at al. (2020). Detection of Micro-Scale Li Dendrite Via H₂ Gas Capture for Early Safety Warning. *Joule*, 4(8), 1714–1729. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.016>.
- [17] Ren, D. at al. (2017). An Electrochemical-Thermal Coupled Overcharge-Tothermal-Runaway Model For Lithium Ion Battery. *J. Power Sources*, (364), 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.035>.
- [18] Ahlberg, A., Blomqvist, P., Rosell, L., Sturk, D. & Tidblad, A. (2019). Analysis Of Li-Ion Battery Gases Vented In An Inert Atmosphere Thermal Test Chamber Batteries, *mdpi.com*, 5(3), 61 . <https://doi.org/10.3390/batteries5030061>.
- [19] Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W. (2015). Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, (1 st edition, ss 80). *Elseiver*, ebook ISBN: 9781782423980. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02665-2>.
- [20] Bora, Y. (2017). *Elektrikli Araç Sistemlerinin İncelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi], Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [21] Rahimzei, E., Sann, K., & Vogel, M. (2015). Kompendium: Li-Ionen-Batterien– Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. *VDE Verband der Elektrotechnik. Frankfurt am Main*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106579>.
- [22] Wen, J., Zhao, D., & Zhang, C. (2020). An overview of electricity powered vehicles: Lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency. *Renewable Energy*, 162, 1629-1648. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.055>.
- [23] Dinger, A., Martin, R., Mosquet, X., Rabl M., Rizoulis, D., Russo, M. & Sticher G. (2010). Batteries for Electric Cars: Challenges, *Opportunities and the Outlook to 2020*. The Boston Consulting Group.
- [24] Jones, N., (2024). The New Car Batteries That Could Power The Electric Vehicle Revolution, *Nature*, 626 (7998), 248-251.
- [25] Burch, I., Gamble, G., Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Suendermann, B., (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression, *Energies* 13, 5117. <https://doi.org/10.3390/en13195117>, 1 October 2020.

- [26] Li, L., Zhang, W., & Zhang, X., (2021). Review of Research about Thermal Runaway and Management of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems, *IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*. <https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367968>.
- [27] Doughty, D. H., & Pesaran A. A., (2012). *Vehicle Battery Safety Roadmap Guide*, US Department of Energy National Laboratory.
- [28] Chen, M., Hu, J., Huana, Q., Ouyang, D.X., Wang, J., & Weng, T.W., (2019). Experimental investigation of thermal fault propagation in typical lithium-ion battery modules. *Thermochimica Acta*, 676(2019) 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.05.002>.
- [29] Shi, H., Cheng, M., Feng, Y., Qiu, C., Song, C., Yuan, N., Kang, C., Yang, K., Yuan, J., & Li, Y. (2023). Thermal Management Techniques for Lithium-ion Batteries Based on Phase Change Materials: A Systematic Review and Future Recommendations. *Energies*, 16 (2), 876. <https://doi.org/10.3390/en16020876>.
- [30] 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.127>.
- [31] Bisschop, R., Huang, X., Niu, H. & Sun, P., (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicle, *Fire Technology*, 56-1361. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- [32] Han, D., Liu, J., Meng, Y., Mo, Y., Yang, K., Wang, S. & Xiao, M. (2018). Highly safe lithium-ion batteries: High strength separator from polyformaldehyde/cellulose nanofibers blend. *Journal of Power Sources*. 400. 502510.10.1016/j.jpowsour.2018.08.043. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.043>.
- [33] Wakihara, M. (2021). Recent developments in lithium-ion batteries. *Materials Science and Engineering*, 33, 109–134. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00030-4).
- [34] Kim, T., Ono, L.K., Song, D.Y., Song, W., Qi, Y. (2019). Journal of materials chemistry A, pubs.rsc.org. <https://doi.org/10.1039/C8TA10513H>.
- [35] Ghiji, M. (2020). Lithium-Ion Battery Fire Suppression Using Water Mist Systems October 2021. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 17. <https://doi.org/10.5098/hmt.17.13>.
- [36] Fauler, G., Golubkov, W., Planteu, R., Scheikl, S., Stangl, C., Voitig, G., & Wilsche, H. (2015). Thaler A. and V. Hacker (Paper) *RSC Adv.*, 5, 57171-57186. <https://doi.org/10.1039/C5RA05897J>.
- [37] Al-Zareer, M., (2020). Numerical study of flow and heat transfer performance of 3D-printed polymer based battery thermal management. *International Journal of Applications*, 79(5), 406-435. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119995>.
- [38] Cadaval, E.R., Lozano, J.G., Montero, B.I.M. & Martinez, M., A., G., (2014). “Battery equalization active methods”, *Journal of Power Source*, 246, 934-949. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>.

- [39] Balakrishnan, P.G., Prem Kumar, T. & Ramesh, R. (2006). Safety mechanisms in Lithium-ion batteries. *J. Power Sources*, 155, 401-414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour>.
- [40] Lopez, C.F., Mondal, B. & Mukherjee, P.P. (2017). Exploring the effectiveness of nanofluids for lithium-ion battery thermal management. *International Journal, Heat and Mass Transfer*, 112, 779-794. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.130>.
- [41] Sun, L., Wang, S., Yang, L., & Zhou, F. (2022). A Review on Thermal Management of Lithium-ion Batteries with Nanofluids and Nanophase Change Materials. *Power Sources Magazine*, 539, 231605.
- [42] Ashjaee, M., Houshfar, E., Kiani, M., Miremadi, S.R., Nejad, A.M., & Omiddezyani, S. (2020). Lithium-ion battery thermal management system with Al₂O₃/AgO/CuO nanofluids and phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 180, 115840. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115840>.
- [43] Abdelkareem, M.A., Abo-Khalil, A.G., Adhari, O.H.K., Elsaid, K., Maghrabie, H.M., Olabi, A.G., Radwan, A., Sayed, E.T., & Wilberforce, T. (2022). Nanofluids in battery thermal management systems for electric vehicles. *Energy Storage Magazine*, 50, 104385. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104385>.
- [44] Al-Hallaj, S., Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J.R., (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *J. Power Sources*, 194, 1105e1112. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.074>.
- [45] Golubkov, A.W., Planteu, R., Scheikl, S., Stangl, C., Voitic, G., Wiltsche, H., et al. (2015). Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes e impact of state of charge and overcharge. *RSC Adv.*, 5, 57171e57186. <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA05897J>.
- [46] [] Fauler, G., Fuchs, D., Golubkov, A. W., Stangl, C., Wagner, J., Wiltsche, H., et al. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metaloxide and olivin-type cathodes. *RSC Adv.*, 4, 3633e3642. <http://dx.doi.org/10.1039/C3RA45748F>.
- [47] Doughty, D.H., & Pesaran, A.A. (2012). Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance. *National Renewable Energy Laboratory*. <http://dx.doi.org/10.2172/1055366>. NREL/SRe5400e54404.
- [48] Hatchard, T.D., MacNeil, D.D., Basu, A., Dahn, J.R. (2001). Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells. *J. Electrochem. Soc.*, 148, A755eA761. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1377592>.
- [49] Mendoza-Hernandez, O.S., Ishikawa, H., Nishikawa, Y., Maruyama, Y., Umeda, M. (2015). Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge. *J. Power Sources*, 280, 499e504. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.143>.
- [50] Franklin, J. & Spotnitz, R., (2003). Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *J. Power Sources*, 113, 81e100. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00488-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00488-3).

- [51] Jeevarajan, J.A., Lopez, C. F., & Mukherjee, P.P. (2015). Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules. *J. Electrochem. Soc.*, 162, A1905eA1915. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0921509jes>.
- [52] Feng, X., He, X., Lu, L. Ouyang, M., Sun, J., Wang, F. at al. (2015). Characterization Of Penetration Induced Thermal Runaway Propagation Process Within A Large Format Lithium Ion Battery Module. *J. Power Sources*, 275, 261e273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.017>.
- [53] Feng, X., He, X., Kulp, C., Lu, L., Ouyang, M., Wu, P., at all. (2015). Thermal Runaway Propagation Model For Designing A Safer Battery Pack with 25Ah LiNix- CoyMnzO2 Large Format Lithium Ion Battery. *Appl. Energy*, 154, 74e91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.118>.
- [54] Yan, J., Wang, N., Wanlu, F.L. Weilin, L. (2022). Preparation and Application of Provincial Specific Functional Materials. Key Laboratory of Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang Research Institute of Industrial Technology for Advanced Coating Materials, China, Shenyang 110142. <https://doi.org/10.1016/j.recm.2022.07.005>
- [55] Burch, I., Gamble, G., Ghiji, M., Joseph, P., Moinuddin, K., Novozhilov, V., Suendermann, B., (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression, *Energies* 2020, 13, 5117. <https://doi.org/10.3390/en13195117>.
- [56] Feng, X., He, X., Liu, X., Lu, L., Ouyang, M., & Xia, Y., (2017). Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles. *Energy Storage Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>.
- [57] Andrey, W., Fauler, G., Golubkov S.S., Hacker V., Planteu, R., Stangl, C., Thaler, A., Voitic, G., & Wiltscche, H., (2015). Thermal Runaway Of Commercial 18650 Li-Ion Batteries With Lfp And Nca Cathodes-Impact Of State Of Charge And Overcharge, (*Paper*) *RSC Adv*. <https://doi.org/10.1039/C5RA05897J> 2015, 5, 57171-57186.
- [58] Abhishek, V. K., Adams, S., Chidambaram, R. K., Kaliaperumal, M., Prasanna, M. D. S., Reddy, M. V., & Zaghbi K., (2021). Cause and Mitigation of Lithium Ion Battery Failure. A Review, *Materials (Basel)*. 14(19), 5676.
- [59] Zhang, Z., (2020). A Novel Method For Screening Deep Eutectic Solvent To Recycle The Cathode Of Li-Ion Batteries. *Green chemistry*, 22(14). <http://dx.doi.org/10.1039/D0GC00701C>.
- [60] Anouti, M., Phadke, S., Raghibi, M., Xiong, B. (2020). The role of electrolyte in gas evolution during cycling of a Gr//NMC battery depending on temperature: Effect of solvent, salt and ionic liquid. *Electrochim*, 362, 137214. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137214>
- [61] Demeaux, J., Gasteiger, H.A., Lucht, B.L., Schwenke, K.U., & Solchenbach, S., (2019). Effect of CO2 Evolved from VC and FEC on the Formation of Graphite Anodes in Lithium-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, A2035–A2047.
- [62] Crompton, K.R., Li, W., Mukherjee, P.P., & Ostanek, J.K. (2020). Simulating the onset and evolution of thermal runaway in Li-ion cells using a coupled thermal and ventilation model. *Appl. Energy* 2020, 268, 114972.

- [63] Hazard, J. A., Li, Y., Wang, G., Wang, J., Wang, Z., & Yang, H., (2019). Thermal Runaway and Fire Behavior of Large-Scale Lithium-ion Batteries with Different Heating Methods. 379, 120730.
- [64] He, Y. B., Kang, F., Li, B., Li, J., Li, Y., Lu, Q., Luo, D., Wang, X., Qian, K., & Zheng, Y., (2016). The effect of overdischarging on the life and performance of LiFePO₄/graphite batteries. *RSC Adv.* 6 (2016) 30474– 30483.
- [65] Lyu, N., Jin, Y., Miao, S., Xiong, R., Xu, H., Gao, J., Liu, H., Li, Y. Han, X. (2023). Fault warning and location acoustic signal in battery energy storage systems via ventilation. *IEEE J. Emerg. Sel. Tepe. Power Electron.* 11 (2023) 100–108.
- [66] Lammer, M., Konigseder, A., & Hacker, V., (2017). Holistic methodology for characterization of thermally induced failure of commercially available 18650 lithium-ion cells. *RSC Adv.*, 7(2017) 24425–24429.
- [67] Amin, K. Crafts, C.C., Doughty, D.H., Henriksen, G., Nagasubramanian, G., & Roth, E.P., (2005). Effects of additives on thermal stability of lithium-ion cells, *J. Power Sources*, 146(2005), 116–120.
- [68] Angelmahr, M., Dahle, S., Doering, A., Fischer, A., Kohring, M., Meyer, J., Nedjalkov, A., Sander, A., & Schade, W., (2016). Analysis and Safety Improvement Solution for Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium-ion Batteries 2(1), 5. <https://doi.org/10.3390/batteries2010005>.
- [69] Essl, C., Ewert, E., Fuchs, A., Gasser, E., Golubkov, A.W., Nachtnebel, M., & Zankel, A., (2020). Comprehensive Hazard Analysis of Failed Automotive Lithium-Ion Batteries in Extreme Temperature Experiments, 6(2), 30. <https://doi.org/10.3390/batteries6020030>.
- [70] Lee, C., Said, A., & Stoliarov, S., (2020). Experimental Investigation of Cascading Failure in 18650 Lithium-Ion Cell Arrays: Effect of Cathode Chemistry, *J. Power Supplies*, 446(2020), 227347. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227347>.
- [71] Cheng, X., Fu, Y., Li, K., Liu, C., Lu, S., & Zhang, H., (2015). An experimental study on the combustion behavior of 18650 lithium-ion batteries using a cone calorimeter, *J. Power Source,s* 273(2015), 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.039>.
- [72] Chen, H., Jiang, L., Mao, B., Sun, J., Wang, Q., & Zhao, C., Detailed Study on Combustion of Lithium-ion Battery in Open Field and in a Combustion Chamber, *Process Saf. Environ. Prot.*, 139(2020) 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.037>.
- [73] Bry, A., Fernandes, Y., & Persis, S. (2018). Identification and Measurement of Gases. Overcharging Abuse Tests of a Commercial Li-ion Battery. *J. Power Supplies* 389 (2018) 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.034>.
- [74] Kartunov, Z. Marinova, I., & Mateev, V., (2019). Gas leak source detection for Li-ion batteries with distributed sensor array, *Sensors*, 19(13), 2900. <https://doi.org/10.3390/sn19132900>.
- [75] Cummings, S.R., Dawson, W.J., Frank, N.B., Gully, B.H., S.L., Hill, & Swartz, D.M., (2020). Systems and methods for monitoring a gas analysis. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100146>.

- [76] Cummings, S., Swartz, S., Frank, N. B., Dawson, W. J., & Nexceris, L.L.C., (2017). Lithium-ion Battery External Gas Monitoring for Battery Health and Safety 2017.
- [77] Cui, Y., Gao, J.F., Guo, D.L., Jiang, X., Jin, Y., Liu, Y., Lu, H.F., Sun, L., Tao, F.B., Wei, D.H., & Zheng, Z.K. (2020). Detection of micro-scale li dendrite via -2 gas capture for early safety warning. 1714–1729.
- [78] Ahn, J. H., et al. (2024). Study of gas emission and safety characteristics of lithium ion batteries under abuse conditions. *Journal of Power Sources*, 290, 151-157. <https://doi.org/10.3390/batteries10120443>.
- [79] Saito, S., et al. (2019). Gas Emission Characteristics of Lithium Ion Batteries Under Thermal Runaway Conditions. *Journal of Power Sources*, 342, 366-373. <https://doi.org/10.3390/elektronik12071603>.
- [80] Peter, J., Bugryniec, E. G., Resendiz, S. M., Nwophoke, S. K., Charles, J., Solomon F. B., (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure- Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, 87,111288. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
- [81] Lihua, J., et al. (2019). Analysis of Gas Generation Behavior in Lithium Ion Batteries under Overcharge and Overdischarge Conditions. *Journal of Electrochemical Society*, 168(12), 120503. <https://doi.org/10.1149/2.0661906>
- [82] Chung, S. Y., et al. (2018). Gas Emission and Thermal Behavior of Lithium Ion Batteries in an Overcharge State. *Journal of Power Sources*, 401, 309-318. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00703-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00703-0).
- [83] Li, X., Sheldon, S. & Williamson. (2007). Evaluation of efficiency improvement techniques for future power electronics intensive hybrid electric vehicle propulsion systems. *Electric Power Conference*, 2007. IEEE Canada.
- [84] Batenburg, C. V. (2014). HEV, PHEV ve EV: For technicians and students new to high voltage systems, 1st edition. *Automotive Career Development Center*.
- [85] Warner, J.T. (2015). Lithium-ion battery pack design handbook: chemistry, components, types, and terminology. *Elsevier*, Amsterdam
- [86] Chan, C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE* 95,4, 704-718.
- [87] Sakarya Üniversitesi, (2022). Mühendislikte Yakıtlar, *Yangın ve Yanma Dergisi*, 10(1), 1-8, <http://dergipark.gov.tr/fce>
- [88] Chen, W., Jiang, J., Wen, J., (2021). Thermal Runaway Induced by Dynamic Overcharge of Lithium-ion Batteries Under Different Environmental Conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,146, 855–863. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10037-x>.
- [89] Cheng, C., Chow, C., Chow, W., & Kwok, J. (2019). An Experimental Study on Potential Thermal Hazards of Mobile Phones. *Third International Fire Safety Symposium*, Ottawa, Ontario, Canada.

- [90] Knaust, C., Kwade, A., Palis, S., Sträubig, F., & Voigt, S. (2020). CFD Analysis of Sensible Enthalpy Increase Approach to Determine Heat Release Rate of Lithium-ion Battery Fires at Electric Vehicle Scale. *Yangın Saf. J.*, 114(1). <https://doi.org/102989>.
- [91] Amon, F., Bisschop, R., Rosengren, M., & Willstrand, O. (2019). Fire Safety of Lithium-ion Batteries in Road Vehicles.
- [92] IEC. (2010). Secondary lithium-ion cells for electric road vehicle propulsion Part 2: Reliability and Abuse Testing.
- [93] Mao, B., Stoliarov, S.I., Sun, J., & Wang, Q. (2019). Review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Prog Energy Combust Sci*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.
- [94] Chen, S.C., Wang, Y.Y., Wan, C.C. (2006). Thermal analysis of spirally wound lithium batteries. *J Electrochem Soc*, 153, 637. <https://doi.org/10.1149/1.2168051>.
- [95] Ramadass, P., Santhanagopalan, S., Zhang, & Zhengming, J. (2009). Internal short circuit analysis in a lithium-ion cell. *Power Sources*, 194, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.powsour.2009.05.002>.
- [96] Finegan, D., Robinson, J.B., & Scheel, M. at al. (2015). High-speed tomography processing of lithium-ion batteries during thermal runaway. *Nat Commune*, 6, 6924. <https://doi.org/10.1038/ncomms7924>.
- [97] Cai, L., & White, R.E. (2011). Mathematical modeling of a lithium-ion battery with thermal effects in Multiphysics (MP) software. *J. Power Sources*, 196, 5985– 5989. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.017>.
- [98] Kim, G.H., Pesaran, A., Spotnitz, R. (2007). A Three-Dimensional Thermal Abuse Model for Lithium-ion Cells. *J. Power Sources*, 170, 476–489. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.018>.
- [99] Mahamud, R., Park, C. (2011). Reciprocating airflow to improve temperature uniformity for Li-ion battery thermal management. *J. Power Sources*, 196, 5685–5696. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>.
- [100] U.S. Department of Transportation. (2014). Interim Guidance for Electric and Hybrid Electric Vehicles Equipped with High-Voltage Batteries. DOT HS 811 575.
- [101] Gardiner, J. (2017). The Rise of Electric Cars Could Leave us with a Major Battery Waste Problem. *The Guardian*.
- [102] Polinares (2012) Bilgi Notu: Lityum. GLOBAL 2000 VerlagsgesmbH.
- [103] Liu, Y., Sun, P., Niu, H., at al. (2020). Self-Heating Ignition Tendency of Open Circuit Pouch Lithium-ion Battery Stack at a Hot Boundary. *Fire Safety Journal*.
- [104] He, X., Restuccia, F., Zhang, Y., at al. (2019). Experimental Study on Self-Heating Ignition of Lithium-ion Batteries During Storage and Transportation: Effect of Cell Number. *Fire Technology*.
- [105] Chu G., Sun J., & Wang Q. (2005). Lithium-ion Battery Fire and Explosion. *The Science of Fire Safety* 2005, 8, 375–382. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-375>.

- [106] Thomas L.R., & Misera, A.M. (2019). Sprinkler Protection Guide for Lithium-Ion Based Energy Storage Systems, Fire Protection Research Foundation Report.
- [107] Yang X., Wang H. (2022). Experimental Study on Thermal Runaway behavior of Lithium-ion Battery and Analysis of Flammable Materials. 8, 250. <https://doi.org/10.3390/piller8110250>.
- [108] Binbin, M., Chunpeng, Z., Conner, F., Hanwei, Z., Haodong, C., Partha, P., Jinhua, S. & Quinsong, W. (2022). Experimental And Modeling Investigation On The Gas Generation Dynamics of Lithium-Ion Batteries During Thermal Runaway. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100212>.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ayşegül KIRDUDU

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2012, Anadolu Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Kamu Yönetimi Bölümü
- Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Mühendisliği Anabilim Dalı, Yangın ve Yangın Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-Halen devam ediyor. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Dairesi Başkanlığı İtfaiye Eğitim Merkezi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kırdudu, A. ve Soyhan, H. S. 2025. Lityum İyon Bataryalarda Meydana Gelen Termal Kaçak Nedenlerinin Araştırılması ve Gaz Salımının İncelenmesi