

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

18650 PİL HÜCRELERİNİN ISISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

İsmail DEMİR

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih BULUT

Ocak 2025

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

18650 PİL HÜCRELERİNİN ISISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

İsmail DEMİR
36213628006

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih BULUT

Ocak 2025

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

18650 PİL HÜCRELERİNİN ISIŞAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan: İsmail DEMİR
Yüksek Lisans

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih BULUT'a ,

Çalışmalarında ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme ve Prof. Dr. Serdar ALTIN'a

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora veya yüksek lisans tezi olarak sunduğum “18650 Pil Hücrelerinin Isısal Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İsmail Demir



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. BATARYA TEKNOLOJİLERİ.....	3
2.1. Pillerin Tarihi Gelişimi ve Geleceği.....	3
2.2. Isı Üretim Hızının Matematiksel Modellemesi	6
2.3. Pil Kimyası	10
2.3.1. Tek kullanımlık piller: alkalin piller ve çinko karbon piller	10
2.3.1.1. Alkalin pil çeşitleri ve özellikleri	11
2.3.1.2. Çalışma prensibi ve avantajları.....	11
2.3.1.3. Dezavantajları ve kullanım alanları	11
2.3.2. Şarj edilebilir piller.....	12
2.3.2.1. Lityum iyon piller	12
2.3.2.1.1. Lityum iyon pillerin gelişim tarihi	12
2.3.2.1.2. Lityum iyon pillerin gelişimine katkıda bulunan önemli kişiler ve kuruluşlar	15
2.3.2.1.3. Lityum iyon pillerin geleceği:	16
2.3.2.1.4. Lityum iyon pillerin yıllara göre kg başına kapasite gelişimi	17
2.3.2.1.5. Literatürde bazı lityum iyon pil kimyasallarının özellikleri:.....	21
2.3.2.1.6. Wh/kg oranındaki artışın geleceği	22
2.3.2.2. Sodyum iyon piller	23
2.3.2.2.1. Sodyum iyon pillerin geleceği:.....	24
2.3.2.3. Kurşun-asit piller	26
2.3.2.3.1. Kurşun asit pillerin çalışma prensibi:	27
2.3.2.3.2. Avantajlar ve dezavantajlar	27
2.3.2.3.3. Uygulama alanları.....	27
2.3.2.4. Katı hal piller	28
2.4. Pil Performansını etkileyen faktörler	29
2.4.1. Kimyasal yapı.....	29
2.4.2. Fiziksel yapı	29
2.4.3. Çalışma koşulları.....	30
2.4.4. Kullanım şekli	30
2.5. Sıcaklık Değişiminin Pil Performansı Üzerindeki Etkisi	30
2.6. Farklı Pil Kimyasallarının Genel Özellikleri	33
2.7. Mevcut Ölçüm Yöntemleri ve Karşılaştırılması	34
3. MATERYAL VE METOT	36
3.1. Kullanılan Pil Kimyasalları ve Tipleri	36
3.2. Deneysel Kurulum ve Ölçüm Sistemi.....	36
3.3. Veri Toplama Ve Analiz Yöntemi	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Araştırma Bulguları.....	40
4.2. Araştırmanın Sınırlamaları ve Gelecekteki Araştırma Önerileri.....	71
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72

6.	KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ		77



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Lityum iyon pillerin önemli kilometre taşları.....	16
Çizelge 2.2: Pil çeşitlerinin genel özellikleri	17
Çizelge 2.3: W/kg değerini etkileyen faktörler	18
Çizelge 2.4: Lityum iyon pil kapasite gelişimi (1991-2020)	20
Çizelge 2.5: Sodyum iyon pillerin lityum iyon pillere karşılaştırılması	24
Çizelge 2.6: Sodyum iyon pil - lityum iyon pil enerji yoğunluğu karşılaştırması ve hedefler	25
Çizelge 2.7: Sodyum iyon pillerin wh/kg oranını etkileyen faktörler ve avantajları	25
Çizelge 2.8: Bazı pillerin genel özellikleri	33
Çizelge 4.1: C/2 Şarj olurken sıcaklık ve ölçüm voltajı.	49
Çizelge 4.2: C/2 Deşarj olurken sıcaklık ve ölçüm voltajı.....	49
Çizelge 4.3: C Şarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.	50
Çizelge 4.4: C Deşarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.	51
Çizelge 4.5: 3C/2 Şarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.	51
Çizelge 4.6: 3C/2 akım ile deşarj sırasında pil yüzeyindeki sıcaklık değerleri ve ölçüm volatajı.	52
Çizelge 4.7: 3C/2 Reşarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.	53
Çizelge 4.8: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minimum sıcaklık değerleri.	53
Çizelge 4.9: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.	55
Çizelge 4.10: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.	56
Çizelge 4.11: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minimum sıcaklık değerleri.	58
Çizelge 4.12: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.	59
Çizelge 4.13: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.	61
Çizelge 4.14: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minimum sıcaklık değerleri.	63
Çizelge 4.15: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.	65
Çizelge 4.16: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.	66
Çizelge 4.17: Değişken akım sabit voltajda şarj- deşarj sırasında gözlemlenen sıcaklık değerleri.	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Alessandro Volta pili (Scrosati 2011).....	4
Şekil 2.2: Leclanché hücresi ve ticari karbon çinko ve alkalin hücreler oluşturma yönündeki evrimi (Scrosati 2011).	5
Şekil 2.3: Çeşitli pil türleri için enerji yoğunluğu ve spesifik yoğunluk diyagramı (Scrosati 2011).....	6
Şekil 2.4: Lityum iyon pillerin enerji yoğunluğu 1990’lardan günümüze (Dumé 2023). ..	20
Şekil 3.1: Deney düzeneği kurulum ve ölçüm şeması	37
Şekil 3.2: Pil şarj yuvası.....	38
Şekil 3.3: Termal kamera konumlandırması.	38
Şekil 3.4: Şarj -deşarj cihazı ve voltaj değerlerinin not edildiği ekran.	39
Şekil 4.1: C/2 akımda şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.	41
Şekil 4.2: C akımda şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.	44
Şekil 4.3: 3C/2 akımda şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.	46
Şekil 4.4: Değişken akımda şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.	48
Şekil 4.5: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	54
Şekil 4.6: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	56
Şekil 4.7: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	57
Şekil 4.8: Farklı akımlardadeşarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	59
Şekil 4.9: Farklı akımlardadeşarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	60
Şekil 4.10: Farklı akımlardadeşarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	62
Şekil 4.11: Farklı akımlarda şarj -deşarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	64
Şekil 4.12: Farklı akımlarda şarj -deşarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	66
Şekil 4.13: Farklı akımlarda şarj -deşarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.	68
Şekil 4.14: Değişken akım sabit voltajda şarj-deşarj sırasında gözlemlenen sıcaklık değerleri.....	70

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ρ	: Yoğunluk
C_p	: Isı kapasitesi
T	: Sıcaklık
k	: Isı iletkenliği katsayısı
q	: Isı üretim hızı
t	: Zaman
T_c	: Pil sıcaklığı
m	: Pil kütlesi
C_p	: Özgül ısı
Q	: Isı üretimi
I	: Akım
k_x, k_y, k_z	: x, y, z yönlerinde ısı iletkenlik
h	: Isı transfer katsayısı
A_s	: Pilin yüzey alanı
T_s	: Çevre sıcaklığı
R	: Direnç
EC	: Entropik katsayı
SOC	: Pilin şarj durumu
C_n	: Pil kapasitesi
δ	: Pil hücresinin kalınlığı
A_e	: Elektrot alanı
L	: Anot ayırıcı ve katot kalınlığı toplamı
T_{avg}	: Ortalama sıcaklık
$j \left(T_{avg} \frac{\partial U}{\partial T_{avg}} \right)$	: Tersinir ısıyı
$j(\phi_s - \phi_e - U)$	: Kinetik ısı
$\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \nabla \phi_s$	: Elektronik direnç
$K^{eff} \phi_e \cdot \phi_e$	: İyonik direnç
$K_D^{eff} \nabla \ln c_e \nabla \phi_e$	: Joule ısı
$Ni-Cd$	: Nikel-kadmiyum
$Ni-MH$	: Nikel-metal hidrit
$Ni-Zn$	: Nikel-çinko
ZnO	: Çinko oksit
$MnOOH$	: Manganez oksit hidroksit

LIB	: Lityum iyon pil
PVDF	: Viniliden florür-ko-hekzafloropropilen
MCMB	: Mezofaz karbon mikrobuncukları
kg/W	: Kilogram başına watt
NMC	: Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit
LFP	: Lityum, Demir Fosfat
Wh/kg	: Kg Başına Kapasite
kg	: Kilogram
NCA	: Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit
LMO	: Lityum mangan oksit
LTO	: lityum titanyum
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
NIB	: Sodyum iyon piller
SIB	: Sodyum iyon piller
UPS	: Kesintisiz güç kaynakları
BYS	: batarya yönetim sistemleri
ARC	: Hızlanma Oranlı Kalorimetre
IHC	: İzotermal Isı İletimi Kalorimetrisi
EV	: elektrikli araçlar
ESS	: depolama sistemleri
LiB	: lityum iyon piller
TMS	: sıcaklık yönetim sistemi
EKT	: elektrokimyasal-termal
MDF	: orta yoğunluklu lifli levha
C	: Nominal kapasite - akım oranı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

18650 PİL HÜCRELERİNİN İSİSAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
İSMAİL DEMİR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

77+XI sayfa

2025

Danışman: Doç. Dr. Fatih Bulut

Bu tez çalışmasında Aspilsan tarafından üretilen Nikelce zengin lityum-nikel-manganez-kobalt oksit (NMC) kimyasal yapıya sahip 2800 mAh deşarj kapasitesine ve 230Wh/kg enerji yoğunluklu Lityum iyon pillerin farklı şarj ve deşarj durumlarında sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Pillerin sıcaklık değişiminin gözlenmesi için özel bir kutu tasarlanmış ve sabit akım uygulanarak C/2, C ve 3C/2 şarj ve deşarj durumunda ve değişken akımda şarj ve deşarj durumu için sıcaklık takibi termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler sıcaklık farklarına göre analiz edilmiş, maksimum ve minimum sıcaklık değerleri her bir şarj deşarj durumu için grafiksel olarak incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde şarj ve deşarj durumlarının sıcaklıkla lineer değişim gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şarj edilebilir piller, Sıcaklık etkisi, sabit akımda şarj ve deşarj

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE IR PROPERTIES OF 18650 BATTERY CELLS İsmail Demir

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Energy Sciences and Technologies
77+XI page

2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih BULUT

In this thesis study, the temperature changes of Lithium ion batteries that produced by Aspilsan, with a nickel-rich lithium-nickel-manganese-cobalt oxide (NMC) chemical structure, 2800 mAh discharge capacity and 230Wh/kg energy density, were examined in different charge and discharge states. A special box was designed to observe the temperature change of the batteries and temperature monitoring was carried out with a thermal camera for C/2, C and 3C/2 charge and discharge rates by applying constant current and for charge and discharge rates with variable current. The obtained images were analyzed according to temperature differences, and the maximum and minimum temperature values were examined graphically for each charge-discharge situation. When the results were evaluated, it was observed that the charge and discharge states showed linear changes with temperature.

Keywords: Rechargeable batteries, Temperature effect, charging and discharging at constant current

1. GİRİŞ

Günümüz şartlarında insanlığın en büyük ihtiyaçlarından biri haline gelen enerji, günlük yaşamın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine göre dönüşümü ise daha pratiktir. İhtiyaç halinde, elektrik şebekelerinden veya depolanan elektrik enerjisini her alanda rahatlıkla kullanabilmekteyiz. Fosil yakıtların maliyetlerinin artması ve yakın bir gelecekte tükenecek olması kaçınılmazdır. Bu durumda yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem vermemiz gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük problemlerinden bir tanesi de sürekli ve stabil bir rejime sahip olmamalarıdır. Bu sebeple güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir elektrik enerjisi üretimlerinde depolamanın önemi artmaktadır.

Elektrik enerjisini mekanik, elektrokimyasal, sıkıştırılmış (volan), termal veya hidrojen depolama yöntemleri ile depolayabiliyoruz. Depolanan elektrik enerjisi frekans, güç kararlılığı, gerilim yönetimi gibi alanların optimizasyonunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada elektrik enerjisi depolama yöntemlerinden, elektrokimyasal yöntemlerle pillere depolanması ve depolanan enerjinin kullanılması sırasında pillerde gerçekleşen sıcaklık artışını inceleyeceğiz. Bu sıcaklık artışı pillerin ohmik dirençleri ve kimyasal tepkimelerinden kaynaklanmaktadır.

Hibrit ve elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte lityum iyon pillerin önemi artmıştır. Bu piller, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde uzun menzilli sürüşler sunmaktadır. Ancak, düşük sıcaklıklarda performanslarında önemli düşüşler yaşanmaktadır. Özellikle, soğuk havalarda pilin iç direnci artar, enerji yoğunluğu azalır ve şarj süresi uzar. Bu durum, özellikle soğuk iklimlerde yaşayan kullanıcılar için önemli bir sorun teşkil eder. Takılabilir hibrit ve elektrikli araçların düşük sıcaklıklarda bile sorunsuz çalışabilmesi için pillerin belirli bir performans seviyesini koruması gerekmektedir (Nagasubramanian, 2001). Bu nedenle, pil kimyasının optimize edilmesi, ısıtma sistemlerinin kullanılması ve akıllı şarj algoritmalarının geliştirilmesi gibi çeşitli yöntemlerle düşük sıcaklık performansını artırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir (None, 2016).

Bu çalışmanın temel amacı, lityum iyon pillerin termal davranışını daha iyi anlamak ve bu bilgiler doğrultusunda daha güvenli ve uzun ömürlü piller geliştirilmesine yardımcı olmaktır. Çalışmada, farklı şarj – deşarj durumlarının pil sıcaklık değişimine etkisi

incelenerek, sıcaklık dağılımının belirlenmesi ve pil performansına etkisi ortaya konacaktır. Elde edilen bulgular, pil üreticileri ve elektrikli araç üreticileri için değerli bir referans kaynağı olacaktır.



2. BATARYA TEKNOLOJİLERİ

Lityum iyon pillerin sıcaklık karakteristiklerinin incelenmesi üzerine yapılsın birçok çalışmanın olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, farklı pil kimyaları, çalışma koşulları ve sıcaklık aralıkları için deneysel ve teorik analizler sunmaktadır. Ancak, sıcaklık ölçüm yöntemleri, veri analizi ve modelleme konusunda hala bazı eksiklikler bulunmaktadır. Özellikle, dinamik çalışma koşullarında ve farklı ölçeklerde sıcaklık dağılımının incelenmesi üzerine daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.Pillerin Tarihi Gelişimi ve Geleceği

Elektrokimyasal pilin kökenleri, 18. yüzyılın sonlarına doğru Luigi Galvani ve Alessandro Volta'nın çığır açan çalışmalarıyla sıklıkla ilişkilendirilir. Her ne kadar arkeolojik buluntular arasında yer alan "Bağdat Pili" gibi daha eski örnekler olduğu iddia edilse de, bu iddiaların bilimsel olarak kesin kanıtlarla desteklenmesi henüz mümkün olmamıştır (Lu ve Anariba, 2014). Günümüzde, elektrokimyasal hücrenin keşfi ve gelişiminde Galvani ve Volta'nın öncü rolleri daha yaygın olarak kabul görmektedir.

Galvani, ünlü deneyinde bir kurbağanın bacağına iki farklı metale temas ettirilmesi sonucu kasılma gözlemlemiş ve bu olayın canlı dokularda bulunan "hayvani elektrik" adı verdiği bir enerji türünden kaynaklandığını öne sürmüştür (Galvani ve Roller, 1954). Volta ise Galvani'nin deneylerinden yola çıkarak, elektrik akımının metallerin farklı potansiyellerinden kaynaklandığını ve canlı dokuların bu akımı sadece ilettiğini savunmuştur. Volta'nın geliştirdiği voltaik pil, ilk sürekli elektrik akımı kaynağı olarak kabul edilmiştir.

Volta pili, iki farklı metal elektrotun (genellikle çinko ve bakır) tuzlu su veya asit çözeltisi gibi bir elektrolit içinde yer almasıyla oluşur. Elektrotlar arasındaki potansiyel farkı, elektrolit içindeki iyonların hareketiyle dengelenmeye çalışır ve bu sırada elektrik akımı üretilir (Volta, 1923). Bu temel prensip, günümüzde kullanılan birçok pil türünün de temelini oluşturmaktadır (Scrosati, 2011).



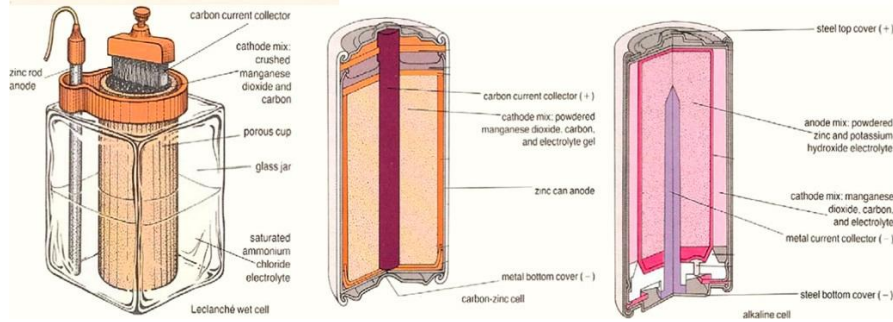
Şekil 2.1: Alessandro Volta pili (Scrosati, 2011).

Volta'nın deneyinde, farklı metallerin bir elektrolit çözeltisi içinde yer almasıyla elektrik akımının üretildiği gözlemlenmiştir. Bu deney, elektrolit-elektrot ara yüzünün elektrik üretimindeki kritik rolünü ortaya koyarak, modern pil teknolojilerinin temelini atmıştır (Trasatti, 1999).

Volta'nın bu çalışması, Faraday'ın elektroliz yasaları ve Nernst denklemi gibi temel elektrokimya kavramlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Fabbrizzi, 2019).

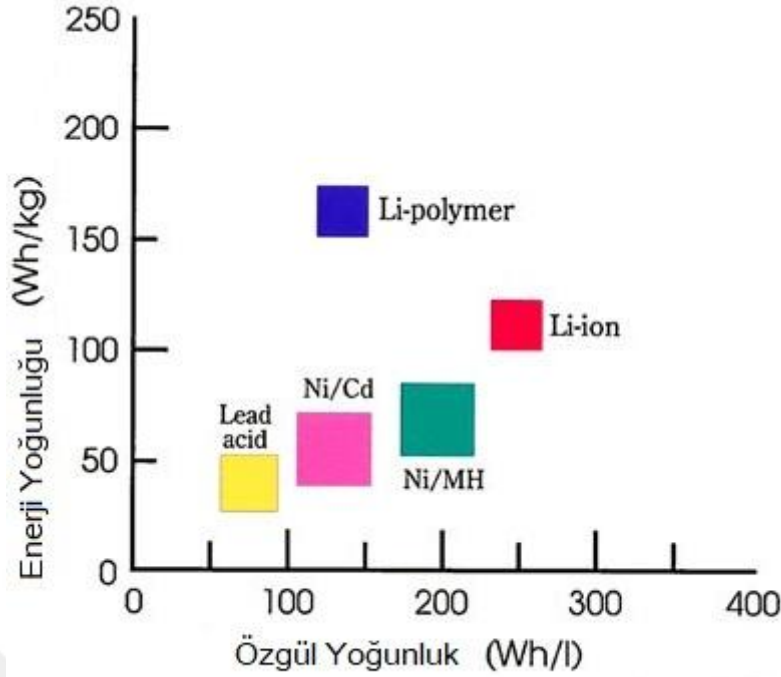
Volta'nın voltaik pili üzerine yaptığı öncü çalışmalar, 19. yüzyılda elektrokimya alanında önemli gelişmelere zemin hazırlamıştır. Bu gelişmelerin en önemlilerinden biri, Georges-Lionel Leclanché tarafından geliştirilen Leclanché pilidir. Leclanché, 1866 yılında, pozitif elektrot (katot) olarak manganez dioksit-karbon karışımı ve negatif elektrot (anot) olarak çinko çubuk kullandığı, sulu amonyum klorür çözeltisine daldırılmış bir pil sistemi önermiştir (Trasatti, 1999). Leclanché hücresinin temel konsepti, sırasıyla karbon-çinko ve alkalin piller olarak bilinen tüketici birincil pillerinde günümüze kadar gelmiştir. Modern karbon-çinko pillerde, elektrolit sıvı yerine macun formunda kullanılmakta ve çinko anot hem kabı hem de elektrot görevi görmektedir (Leclanché, 1866). Alkalin pillerde ise, çinko ve elektrolit macunundan oluşan bir çekirdek, paslanmaz çelik bir kutunun içinde yer almaktadır. Bu tasarımlarda, manganez dioksit, katot reaksiyonunda

elektron alıcısı olarak görev yaparken, çinko ise anot reaksiyonunda elektron vericisi olarak rol oynamaktadır (Scrosati, 2011).



Şekil 2.2: Leclanché hücresi ve ticari karbon çinko ve alkalin hücreler oluşturma yönündeki evrimi (Scrosati, 2011).

Leclanché, Jungner ve Planté'nin ilk konseptlerine dayanan piller, o dönemde teknolojinin gereksinimlerini karşılama da, tıbbi cihazlar, artan enerji talebi ve yeni uygulamalar bu pillerin yetersiz kaldığını göstermiştir (Bagotsky, 2011). Lityum-iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu (birim kütle başına depolanan enerji miktarı), uzun döngü ömrü ve hızlı şarj olma özellikleri, onları cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve elektrikli araçlar gibi birçok alanda tercih edilen bir seçenek haline getirmiştir (Bruce ve diğ., 2012). Ancak lityum iyon pillerin maliyeti, güvenliği ve sınırlı döngü ömrü gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle, sodyum-iyon, katı hal piller gibi yeni nesil pil teknolojileri üzerindeki araştırmalar hızla devam etmektedir (Scrosati, 2011).



Şekil 2.3: Çeşitli pil türleri için enerji yoğunluğu ve spesifik yoğunluk diyagramı (Scrosati, 2011)

Lityum metalin yüksek teorik özgül kapasitesi (3.860 Ah/kg) ve düşük atom ağırlığı sayesinde, lityum piller daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha uzun ömre sahiptir (Jiao ve diğ., 2018). Bu özelliği sayesinde, lityum piller kalp pillerinde kullanılan pil teknolojisinde çığır açmıştır. Ancak, lityum metalin suyla tepkimeye girmesi ve organik elektrolitlerin kullanımı gibi bazı zorluklar da beraberinde getirmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelinmesiyle birlikte, lityum piller günümüzde kalp pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Scrosati, 2011).

2.2. Isı Üretim Hızının Matematiksel Modellemesi

Lityum-iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi avantajları, elektrikli araçlarda yaygın kullanımını teşvik etmektedir. Ancak, bu pillerin termal yönetimi, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji depolaması için kritik bir öneme sahiptir. Termal kaçak olarak adlandırılan kontrolsüz ısınma olayı, pilin ömrünü kısaltabilir ve hatta ciddi güvenlik riskleri oluşturabilir. Bu nedenle, pil tasarımı, malzeme seçimi ve etkin soğutma sistemleri gibi faktörler, termal yönetim stratejilerinin merkezinde yer almaktadır.

Temel termal denge modellerine dayanan simülasyonlar, bu pillerin iç sıcaklık dağılımını detaylı bir şekilde analiz ederek, sıcak noktaların tespit edilmesini ve potansiyel termal kaçak risklerinin önceden belirlenmesini sağlar. Bu sayede, pil tasarımı, malzeme seçimi ve soğutma sistemleri gibi parametreler optimize edilerek, pilin ömrü uzatılabilir ve güvenliği artırılabilir. Simülasyon sonuçları, ısı iletimi, konveksiyon ve radyasyon gibi ısı transfer mekanizmalarını dikkate alarak, pilin farklı çalışma koşullarındaki termal davranışını daha iyi anlamayı mümkün kılar. Özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyan uygulamalarda, termal yönetim sistemlerinin gelişimi, lityum-ion pillerin daha yaygın kullanımı için kritik öneme sahiptir (Kim ve diğ., 2009).

Isıl simülasyonun temelini oluşturan enerjinin korunumu için yönetici denklem şudur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (1)$$

Burada ρ yoğunluk, C_p ısı kapasitesi, T sıcaklık, k ısı iletkenliği ve q pilin ısı üretim hızıdır (Zhang ve diğ., 2013)

Bir pil hücresinin termal davranışını tam olarak anlamak için, hücre içindeki ısı üretim hızının belirlenmesi büyük önem taşır. C-hızı gibi elektrokimyasal parametreler, bu hız üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek C-hızı, yani yüksek akım yoğunlukları, ohmik kayıplar ve ekzotermik reaksiyonlar gibi faktörler nedeniyle ısı üretimini artırır. Yaygın olarak kullanılan teorik bir model, ısı üretim hızını aşağıdaki gibi tahmin eder

$$Q_{Teorik} = I \cdot (U - V) - I \cdot T \frac{\partial U}{\partial T} \quad (2)$$

(Drake ve diğ., 2015).

Pil içindeki sıcaklık dağılımına ilişkin enerji dengesi denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$Q = \frac{d}{dx} \left(k_x \frac{dT_c}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k_y \frac{dT_c}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k_z \frac{dT_c}{dz} \right) + m \cdot C_p \frac{dT_c}{dt} \quad (3)$$

Burada t , T_c , m , C_p sırasıyla pilin zamanı, pil sıcaklığını, pil kütlesini, özgül ısısını, k_x, k_y, k_z ise sırasıyla pilin x, y, z yönlerinde ısı iletkenliğini temsil etmektedir. Denklemdaki sol taraftaki terim (Q) şarj/deşarj yüklerinden kaynaklanan ısı üretimini temsil etmektedir ve sağ taraftaki terimler sırasıyla üç boyutlu ısı iletimini ve pil içinde biriken enerjiyi temsil etmektedir. Pil içindeki sıcaklığın her yönde eşit olduğu varsayılır.

İletim yoluyla pil yüzeyine aktarılan ısı, konveksiyon yoluyla çevreye yayılır, daha sonra pilde ısı birikir ve aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$m \cdot C_p \cdot \left(\frac{dT_c}{dt} \right) = q - h \cdot A_s \cdot (T_c - T_s) \quad (4)$$

Burada h , A_s ve T_s sırasıyla ısı transfer katsayısını, pilin yüzey alanını ve çevre sıcaklığını temsil etmektedir.

Şarj vedeşarj sırasında aküdeki ısı esas olarak iki kaynaktan üretilir. Biri pilin iç direncinden dolayı oluşan tersinmez ısı, ikincisi ise kimyasal reaksiyon sonucu oluşan entropi değişiminden kaynaklanan tersinir ısıdır. Dolayısıyla bir bataryadaki ısı üretimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = I^2 R + I \cdot T_c \cdot EC \quad (5)$$

Burada I , R ve EC sırasıyla şarj/deşarj akımını, iç direnci ve entropik katsayısını temsil eder.

Denklemdaki ısı üretimi ifadesini değiştirerek Denklem 5'te Denklem 4'ü ve ayrıca parametreleri yeniden düzenleyerek, aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$m \cdot C_p \cdot \left(\frac{dT_c}{dt} \right) = (I \cdot EC - h A_s) \cdot T_c + (I^2 R + h A_s T_s) \quad (6)$$

Denklem 4 Euler'in sayısal yöntemini kullanarak aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$T_c^{(t+1)} = T_c^{(t)} + \left\{ \frac{t^{(t+1)} - t^{(t)}}{(m C_p)^{(t)}} \right\} \cdot \left[(I \cdot EC - h A_s)^{(t)} \cdot T_c^{(t)} + (I^2 R + h A_s T_s)^{(t)} \right] \quad (7)$$

Burada üst simge $(t + 1)$ ve (t) , sırasıyla $(t + 1)$ ve (t) zamanındaki parametrelerin değerlerini belirtir.

Pil yüzeyindeki sıcaklık profilini hesaplamak için aşağıdaki bölümlerde hesaplanmaktadır.

İç direnç, pilin ohmik direnci olarak kabul edilir. Aktif malzemenin bileşimindeki, elektrolit konsantrasyonundaki ve sıcaklıklardaki sürekli değişiklik nedeniyle şarj ve deşarj görev döngüsü sırasında değişir. Pilin iç direnci, pilin şarj durumuna (SOC) ve sıcaklığa göre değişir. SOC şu şekilde tanımlanır:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_0+1} I(t).dt \quad (8)$$

Burada $SOC(t)$, $SOC(t_0)$, $I(t)$ ve C_n , t zamanındaki SOC'yi, ilk SOC'yi, t zamanındaki akımı ve pil kapasitesini temsil eder (Kumar ve Chavan, 2022).

Bir pil hücresinin ısı transfer sürecini tasvir etmek için 1 boyutlu bir termal model esas alınmıştır. Termal alan için geçerli denklemler aşağıda verilmiştir.

Isı Enerjisinin korunumu denklemi:

$$pC_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (9)$$

Burada p , c_p ve hücrenin yoğunluğu, özgül ısı kapasitesi ve termal $\dot{Q}$ iletkenliği sırasıyla ısı üretim terimidir. Pil hücresinin spesifik ısı kapasitesi ve termal iletkenlik gibi termal özellikleri literatürden yararlanılmıştır. Termal sınır koşulları:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(0, t) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(\delta, t) = \frac{h}{k} [T_\infty - T(\delta, t)] \quad (11)$$

Burada t zaman ve $z \in [0, \delta]$ pil hücresi kalınlığı yönündeki koordinattır. Koordinat sisteminin orijini hücre kalınlığının ortasında yer alır ve δ hücre kalınlığının yarısını temsil eder. h konvektif ısı transfer katsayısıdır.

Elektrokimyasal etkilerden kaynaklanan ısı üretimi şu şekilde verilmiştir:

$$\dot{Q}_{ele} = A_e \int_0^L \left[j \left(T_{avg} \frac{\partial U}{\partial T_{avg}} \right) + j(\phi_s - \phi_e - U) + \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \nabla \phi_s + K^{eff} \phi_e \cdot \phi_e + K_D^{eff} \nabla \ln c_e \nabla \phi_e \right] dx \quad (12)$$

A_e elektrot alanı, L anot, ayırıcı ve katot kalınlığının toplamı, T_{avg} ise pil hücresinin ortalama sıcaklığıdır.

$j \left(T_{avg} \frac{\partial U}{\partial T_{avg}} \right)$ terimi tersinir ısıyı gösterir, $j(\phi_s - \phi_e - U)$ terimi kinetik ısıyı temsil eder, $\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \nabla \phi_s$, $K^{eff} \phi_e \cdot \phi_e$ ve $K_D^{eff} \nabla \ln c_e \nabla \phi_e$ terimi sırasıyla elektronik dirençten, iyonik dirençten ve konsantrasyon aşırı potansiyelinden kaynaklanan joule ısını belirtir (Ji ve diğ., 2013).

2.3. Pil Kimyası

2.3.1. Tek kullanımlık piller: alkalın piller ve çinko karbon piller

Nikel bazlı piller, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleri sayesinde kurşun asit pillerin yerini alan ilk ciddi alternatifler olarak öne çıkmıştır. Bu pil türleri, elektrolit olarak genellikle potasyum hidroksit gibi alkalın bir çözelti kullanmaları nedeniyle alkalın piller olarak da adlandırılır (Van den Bossche ve diğ., 2006).

Nikel bazlı piller, temel olarak nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve nikel-çinko (Ni-Zn) olmak üzere üç ana türe ayrılır (Enache ve diğ., 2014). Bu üç tip pil de pozitif elektrot olarak nikel hidroksit içeren ortak bir yapıya sahiptir. Ancak negatif elektrot malzemeleri farklılık gösterir: Ni-Cd'de kadmiyum hidroksit, Ni-MH'de metal alaşımları ve Ni-Zn'de ise çinko hidroksit kullanılır. Tüm bu pil tiplerinde, elektrolit olarak sulu bir potasyum hidroksit çözeltisi ve bir miktar lityum hidroksit bulunur.

Alkalın pillerin nominal voltajları genellikle 1,2 V civarındadır, ancak Ni-Zn piller 1,65 V gibi daha yüksek bir voltaj sunar. Ağırlıksal enerji yoğunlukları ise pil tipine göre değişiklik gösterir: Ni-Cd için yaklaşık 50 Wh/kg, Ni-MH için 80 Wh/kg ve Ni-Zn için 60 Wh/kg (Hadjipaschalis ve diğ., 2009). Bu değerler, pil teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak değişebilir (Özcan ve diğ., 2021).

Alkalın piller, günlük hayatta sıkça kullandığımız, çinko-manganez dioksit (Zn/MnO_2) elektrokimyasal reaksiyonuna dayalı birincil pil türüdür. Leclanché veya çinko-karbon pillerle karşılaştırıldığında, alkalın piller aynı gerilimde daha yüksek bir enerji yoğunluğuna ve daha uzun bir raf ömrüne sahiptir.

2.3.1.1. Alkalın pil çeşitleri ve özellikleri

Bu pillerin ortak özelliği, çinko anot, manganez dioksit katot ve potasyum hidroksit elektrolit içermeleridir. Ancak, farklı boyutlarda ve kapasitelerde üretilmeleri, iç yapıları ve performansları açısından farklılıklar göstermelerine neden olur.

2.3.1.2. Çalışma prensibi ve avantajları

Alkalın bir pilde, çinko anot yükseltgenerek elektronları dış devreye bırakır ve çinko oksit (ZnO) oluşturur. Bu elektronlar, dış devreden geçerek katoda ulaşır ve burada manganez dioksit ile reaksiyona girerek manganez oksit hidroksit (MnOOH) oluşturur. Bu elektrokimyasal reaksiyon, elektrik enerjisi üretmeyi sağlar (Yazami ve Touzain, 1983).

Alkalın pillerin en önemli avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu, uzun raf ömrü ve düşük iç direnç sayılabilir. Yüksek enerji yoğunluğu, pillerin daha uzun süre kullanılabilmesini sağlar. Uzun raf ömrü ise, pillerin uzun süre depolansa bile performanslarını kaybetmemelerini sağlar. Düşük iç direnç ise, yüksek akım çeken cihazlarda bile kararlı bir gerilim sağlayabilmelerini mümkün kılar.

2.3.1.3. Dezavantajları ve kullanım alanları

Alkalın pillerin dezavantajları arasında şarj edilemez olmaları ve sıcaklık değişimlerine duyarlı olmaları sayılabilir. Yüksek sıcaklıklarda performansları düşebilir ve ömürleri kısalabilir. Düşük sıcaklıklarda ise iç dirençleri artar ve bu da performanslarını olumsuz etkiler. Alkalın piller, düşük sürekli akım gerektiren elektronik cihazlarda yaygın

olarak kullanılır. Uzaktan kumandalar, saatler, oyuncaklar, el fenerleri ve fotoğraf makineleri gibi cihazlar, alkalın pillerin en sık kullanıldığı alanlardandır.

Alkalın piller, günlük hayatta sıkça kullanılan, pratik ve güvenilir bir enerji kaynağıdır. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun raf ömrü ve düşük iç direnç gibi avantajları, bu pilleri birçok uygulama için ideal hale getirir. Ancak, şarj edilemez olmaları ve sıcaklık değişimlerine duyarlı olmaları gibi dezavantajları da vardır.

2.3.2. Şarj edilebilir piller

2.3.2.1.Lityum iyon piller

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleri nedeniyle en yaygın kullanılan pil türüdür.

2.3.2.1.1. Lityum iyon pillerin gelişim tarihi

Lityum pil teknolojisindeki ilk çalışmalar, birincil pil sistemlerine odaklanmış olsa da, lityum iyonlarının tersinirliği sayesinde şarj edilebilir sistemlere geçiş potansiyeli hızla fark edilmiştir. Bu dönüşümde, katot malzemelerinin seçimi kritik bir rol oynamıştır. Lityum iyonlarını yapısında barındırabilen ve tekrar serbest bırakabilen "yerleştirme" elektrotlarının keşfi, 1978 yılında bu alandaki bir dönüm noktası olmuştur. (Whittingham, 1978) Özellikle, titanyum sülfür gibi geçiş metali bileşiklerinin, elektronik ve kristal yapılarının tersinir bir şekilde değişebilmesi sayesinde, lityum iyonlarını başarıyla barındırdığı ve serbest bıraktığı gözlemlenmiştir (Scrosati, 2011).

Lityum iyon pilin temel fikri olan, lityum iyonlarının pozitif ve negatif elektrotlar arasında tersinir bir şekilde hareket etmesi, ilk olarak Armand tarafından 1970'lerin sonunda ortaya atılmıştır. Armand, bu fikri farklı potansiyellere sahip ara katman malzemeleri kullanarak formüle etmiş ve bu nedenle bu pile 'sallanan sandalye pili' adı verilmiştir (Armand, 1980). Bu fikir, Lazzari ve Scrosati tarafından da benimsenmiş ve 1970'lerde tungsten dioksit ve titanyum disülfür elektrotları kullanarak ilk prototipler geliştirilmiştir. Bu ilk pillerin potansiyel aralığı 0,8 ila 2,1 volt arasında olup, 60'tan fazla şarj-deşarj döngüsü gerçekleştirebilmelerine rağmen, enerji yoğunlukları oldukça düşüktü (Lazzari ve Scrosati, 1980).

Elektronik cihazlar için daha küçük ve hafif güç kaynaklarına olan ihtiyacı karşılamak amacıyla susuz elektrolit temelli yeni bir ikincil pilin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yoshino, 1980'lerin başında lityum iyon pilinin (LIB) tasarımına başlamış ve 1986 yılında bu pilin ilk prototipini tamamlayarak (patent başvurusu 1985) alanda önemli bir adım atmıştır. Geliştirilen LIB, susuz elektrolit temelli ikincil piller kategorisinde değerlendirilmektedir. Lityum iyon pilinin tam tanımı, pozitif elektrot olarak $LiCoO_2$ gibi lityum iyonu ve negatif elektrot olarak karbon bazlı malzemeler içeren geçiş metali oksitlerinden oluşan susuz bir ikincil pil şeklinde ifade edilebilir (Yoshino, 2012).

Li-ion pil teknolojisi, 1991'de Sony tarafından ticarileştirilmesinden (Nagaura, 1990) bu yana, taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar gibi alanlarda çığır açıcı bir rol oynamıştır. Bu teknolojinin kökenleri, 1970'lerde inorganik katmanlı kalkojenitlerin alkali metal iyonlarını barındırabilme özelliğinin keşfine dayanmaktadır (Rouxel ve diğ., 1971). Ancak, ilk ticarileştirme girişimleri olan Li/MoS_2 piller, güvenlik sorunları nedeniyle piyasadan çekilmiştir (Brandt, 1994). Bilim insanları, polimerik membranlar ve yerleştirme karbon elektrotları gibi yenilikçi çözümlerle bu sorunları aşarak, sırasıyla Li-metal polimer ve Li-ion pilleri geliştirmişlerdir (Tarascon, 2016).

1991 yılında Sony Corporation tarafından duyurulan lityum iyon pil, taşınabilir elektronik cihazlar için bir devrim niteliğindedir. Bu gelişme, öncesinde güvenlik sorunları nedeniyle geri çağrılan lityum metal pillerin yerini alarak, daha güvenli ve yüksek performanslı bir alternatif sunmuştu. Lityum metal piller, yüksek enerji yoğunlukları ve enerji çıktıları sayesinde cazip bir seçenek gibi görünseler de, dendrit oluşumu ve termal kaçak gibi ciddi güvenlik sorunlarıyla karşı karşıya kalmışlardı (Julien ve diğ., 2016).

Özellikle Exxon sisteminde kullanılan elektrolit, şoka karşı oldukça duyarlıydı ve patlama riski taşıyordu. Ayrıca, lityum metal anotun zayıf geri dönüşüm verimliliği, pil ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktaydı (Whittingham, 2004).

Lityum iyon piller, lityum metal anot yerine grafit gibi karbon bazlı anotlar kullanarak dendrit oluşumunu engellemiş ve güvenliği artırmıştır. Ayrıca, daha kararlı elektrolitlerin geliştirilmesiyle termal kaçak riskini azaltmıştır (Sun ve diğ., 2022).

Sonuç olarak, lityum iyon pil teknolojisi, lityum metal pillerin güvenlik sorunları ve performans eksiklikleri nedeniyle ortaya çıkmış ve kısa sürede taşınabilir elektronik cihazların vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Günümüzde lityum iyon piller,

elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak, daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve daha düşük maliyet gibi hedeflere ulaşmak için lityum iyon pil teknolojisi üzerindeki araştırmalar devam etmektedir (Blomgren, 2016).

Goodenough laboratuvarının yaptığı çalışmalardan biri, lityum iyon pillerin gelişiminde çığır açıcı bir buluşa imza atmıştır. Bu buluş, $NaFeO_2$ yapısındaki lityumlanmış geçiş metali oksitlerinin, yüksek potansiyellerde lityum iyonlarını geri dönüşümlü olarak deinterkalasyon ve yeniden interkalasyon yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu özellik, nikel, kobalt ve manganez gibi çeşitli geçiş metallerinin oksitleri için de geçerli bulunmuştur (Mizushima ve diğ., 1980). Özellikle $LiCoO_2$ bileşiği, bu alanda önemli bir dönüm noktası olmuş ve Sony tarafından üretilen ilk ticari lityum iyon pillerde kullanılmıştır (Lyu ve diğ., 2021). Benzer şekilde, Eveready Laboratuvarları'nda keşfedilen spinel yapılı $LiMn_2O_4$ bileşiği de yüksek enerji yoğunluğuna sahip, güvenli ve yüksek sıcaklıklarda stabil bir katot malzemesi olarak dikkat çekmiştir.

Lityum iyon pillerin performansı, büyük ölçüde negatif elektrot malzemesinin seçimi ile belirlenir. Erken dönem çalışmalarda, grafit ve karbon bazlı malzemeler, lityum iyonlarını depolamak için umut verici adaylar olarak görülmüştür (Daniel ve Besenhard, 2012). Ancak, bu malzemelerin elektrolitlerle etkileşimi sonucu çözücü moleküllerinin eş-interkalasyonu ve indirgenmesi gibi yan reaksiyonlar, pilin ömrünü kısalttığı ve kapasitesini düşürdüğü belirlenmiştir (Yazami ve Touzain, 1983). Fong, Von Sacken ve Dahn tarafından yapılan çalışmada, petrol kokunun grafit ve diğer karbon malzemelerine göre çözücü ko-interkalasyonuna karşı daha dirençli olduğu ve böylece daha stabil bir yapı sergilediği gösterilmiştir (Fong ve diğ., 1990). Yoshino ve arkadaşları tarafından yapılan öncü çalışmalar, petrol kokunun, lityum iyon piller için uygun bir negatif elektrot malzemesi olduğunu göstermiştir (Nakajima, 1987). Özellikle, düşük sıcaklıklarda elde edilen petrol koklarının, yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$) katot malzemeleriyle başarılı bir şekilde birleştirildiği belirtilmiştir. Yoshino'nun grubu, petrol kokunun saflığına ve elektrolit bileşimine büyük önem vererek, $LiClO_4$, $LiBF_4$ ve $LiPF_6$ gibi farklı tuzları içeren elektrolitler kullanmıştır. Bu çalışmalar, Dahn grubunun $LiAsF_6$ tuzu ile elde ettiği sonuçlarla karşılaştırıldığında, farklı elektrolitlerin pil performansı üzerindeki etkileri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Blomgren, 2016).

Lityum iyon pilin ilk ticarileştirilmesinde, $LiCoO_2$ pozitif elektrot malzemesi, iyi kristallığe ve kaba parçacık boyutuna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Lyu ve diğ., 2021). Bu tasarım, daha küçük parçacık boyutlarının neden olduğu güvenlik endişelerini minimize etmek amacıyla yapılmıştır. Bağlayıcı olarak başlangıçta viniliden florür-ko-hekzafloropropilen (PVDF) kullanılmış olsa da, yapışma sorunları nedeniyle karboksilik asit anhidrit ile modifiye edilmiş PVDF'ye geçiş yapılmıştır. Ayırıcı olarak ise, çift eksenli gerilmiş mikro gözenekli polietilen tercih edilmiştir. Elektrolit olarak ise, doğrusal dialkil karbonat ve $LiPF_6$ tuzu içeren bir çözelti kullanılmıştır. Bu elektrolit, yaklaşık 4.5 V'a kadar oksidasyon direnci göstererek pilin çalışma gerilimini artırmıştır (Wang ve diğ., 2019). Üretim sürecinde, kaplama işlemi ve kullanılan malzemelerin saflığı büyük önem taşımıştır. Örneğin, nikel kaplı demir kutuların kullanılması, elektrolitin korozyonunu önleyerek pilin ömrünü uzatmıştır (Blomgren, 2016).

Daha sonra, daha yüksek özgül kapasiteye sahip sert karbon malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, sert karbonların negatif eğimli deşarj eğrisi gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu sorunları aşmak için, mezofaz karbon mikrobuncukları (MCMB) gibi daha gelişmiş karbon malzemeleri geliştirilmiştir. MCMB'ler, belirli bir sıcaklık aralığında ısı işlem görmüş öncül malzemelerden elde edilir ve küresel bir yapıya sahiptir. Bu yapı, MCMB'lere yüksek özgül kapasite, düz bir deşarj eğrisi ve iyi bir hız kapasitesi kazandırır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda sinterlenen MCMB'ler, lityum iyon piller için ideal özellikler sunar (Doh ve diğ., 2019).

2.3.2.1.2. Lityum iyon pillerin gelişimine katkıda bulunan önemli kişiler ve kuruluşlar

Gilbert N. Lewis: Lityum iyonunun kimyasal özelliklerini keşfetti (Lewis, 1916).

John B. Goodenough: Lityum iyon pillerin ilk prototiplerini geliştirdi (Griffith ve diğ., 2020).

Sony ve Asahi Kasei: Ticari olarak ilk lityum iyon pilleri piyasaya sürdü (Blomgren, 2016).

M. Stanley Whittingham: Lityum iyon piller için lityum grafit interkalasyon bileşiğini (LiC_6) keşfetti (Luo ve diğ., 2023).

Akira Yoshino: Lityum iyon pillerin ticari olarak kullanılmasını mümkün kılan yenilikler yaptı (Balakrishnan ve diğ., 2021).

Çizelge 2.1: Lityum iyon pillerin önemli kilometre taşları

Yıl	Olay	Etkileri
1970'ler	İlk lityum iyon pil prototipleri geliştirildi.	Lityum iyon pil teknolojisinin temel prensipleri ortaya kondu.
1991	Sony, ilk ticari lityum iyon pilini piyasaya sürdü (Nagaura, 1990).	Taşınabilir elektronik cihazlar için yeni bir dönem başladı. Cihazlar daha küçük, hafif ve uzun ömürlü hale geldi.
1997	Apple, ilk lityum iyon pilli dizüstü bilgisayarı piyasaya sürdü.	Dizüstü bilgisayarların kullanımı daha pratik ve taşınabilir hale geldi.
2001	Tesla, ilk lityum iyon pilli elektrikli arabayı piyasaya sürdü.	Elektrikli araç teknolojilerinde çığır açıcı bir gelişme yaşandı. Elektrikli araçların daha cazip hale gelmesi ve sektörün büyümesi sağlandı.
2010'lar	Lityum iyon piller, elektrikli araçlarda ve diğer büyük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlandı.	Elektrikli araçların yaygınlaşması, yenilenebilir enerji sistemlerinin gelişmesi ve enerji depolama teknolojilerinde önemli bir dönüm noktası oldu.

2.3.2.1.3. Lityum iyon pillerin geleceği:

Lityum iyon pillerin araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Araştırmacılar, daha yüksek enerji yoğunluğuna, daha uzun ömre ve daha fazla güce sahip

lityum iyon piller geliştirmek için çalışmaktadırlar. Bu gelişmeler, elektrikli araçların menzilin ve performansını daha da iyileştirecek ve lityum iyon pillerin yeni uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılacaktır.

2.3.2.1.4. Lityum iyon pillerin yıllara göre kg başına kapasite gelişimi

kg/W (kilogram başına watt) birimi, bir pilin birim kütle başına depolayabileceği enerji miktarını ifade eder. Bu değer, pilin enerji yoğunluğunu gösterir ve farklı pil teknolojilerini karşılaştırmak için kullanılan önemli bir parametredir.

Daha düşük kg/W değeri, pilin daha hafif ve daha fazla enerji depolayabildiği anlamına gelir. Bu, özellikle taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar gibi uygulamalarda önemlidir.

Pil teknolojilerindeki gelişmeler, kg/W değerlerini sürekli olarak düşürerek daha verimli pillerin üretilmesini sağlar.

Farklı pil kimyalarını (lityum iyon, nikel-kadmiyum, vb.) ve teknolojilerini (katı hal piller, akışkan piller) kg/W değeri üzerinden karşılaştırmak, en uygun pilin seçimi için önemli bir kriterdir.

Farklı pil teknolojilerinin kg/W değerleri, üreticiye, pil boyutuna, kimyasal bileşime ve diğer faktörlere göre değişiklik gösterir. Ancak genel olarak aşağıdaki gibi bir sıralama yapabiliriz:

Çizelge 2.2: Pil eşitlerinin genel zellikleri

Pil Türü	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	mr Döngüsü	Güvenlik	evresel Etki	Maliyet	Uygulama Alanları
Lityum İyon (NMC)	250-300	500-1000 döngü	Orta	Orta	Orta	Elektrikli araçlar, cep telefonları
Lityum İyon (LFP)	180-200	2000+ döngü	Yüksek	Düşük	Düşük	Enerji depolama

						sistemleri
Nikel-Kadmiyum (NiCd)	60-80	1000-2000 döngü	Düşük	Yüksek	Düşük	Eski tüketici elektroniği
Nikel-Metal Hidrit (NiMH)	100-130	500-1000 döngü	Orta	Orta	Orta	Hibrit araçlar, tüketici elektroniği
Çinko-Hava	1000+ (teorik)	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Askeri uygulamalar, büyük ölçekli enerji depolama
Katı Hal	400+ (potansiyel)	Çok yüksek (tahmini)	Çok yüksek	Düşük (potansiyel)	Yüksek	Elektrikli araçlar, uzay araçları

Çizelge 2.3: W/kg değerini etkileyen faktörler

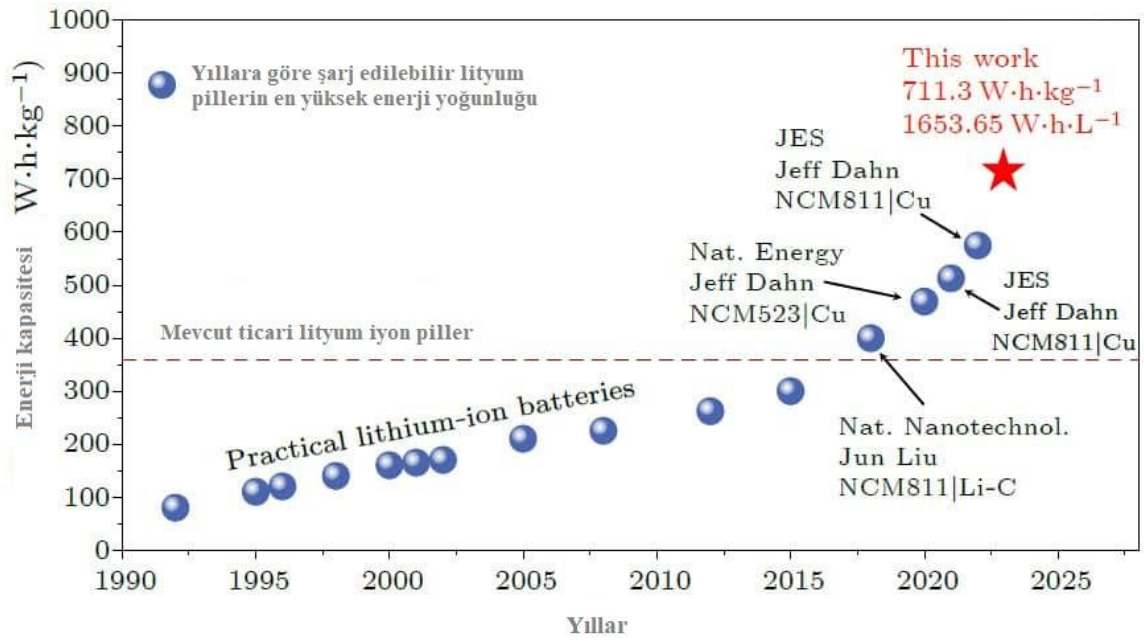
Faktör	Etki	Açıklama
Katot Malzemesi	Doğrudan etkiler	NMC (Nikel, Manganez, Kobalt) gibi malzemeler daha yüksek enerji yoğunluğu sunarken, LFP (Lityum Demir Fosfat) daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olabilir.
Anot Malzemesi	Etkiler	Grafit, silikon gibi farklı anot malzemelerinin kullanılması, pilin teorik kapasitesini ve dolayısıyla enerji yoğunluğunu değiştirebilir. Silikon, daha yüksek

teorik kapasiteye sahip olsa da, hacimsel değişim sorunları gibi zorluklar sunar.

Elektrolit	Etkiler	Elektrolitin iletkenliği, viskozitesi ve kimyasal özellikleri pilin iç direncini ve enerji verimliliğini etkiler. Daha düşük iç direnç, daha yüksek enerji yoğunluğuna katkı sağlar.
Pil Tasarımı	Doğrudan etkiler	Elektrot kalınlığı, gözeneklilik, aktif malzeme yüzey alanı gibi faktörler pilin enerji yoğunluğunu belirler. Daha ince elektrotlar ve daha yüksek yüzey alanı, daha yüksek enerji yoğunluğuna katkı sağlar.
Çalışma Koşulları	Etkiler	Sıcaklık, şarj/deşarj hızı, döngü sayısı gibi faktörler, pilin iç direncini ve kapasitesini etkileyerek enerji yoğunluğunu dolaylı olarak etkiler. Düşük sıcaklıklar, pilin iç direncini artırarak enerji yoğunluğunu azaltabilir.
Uygulama Alanı	Dolaylı etkiler	Farklı uygulamalar için farklı pil özellikleri öncelikli olabilir. Elektrikli araçlarda yüksek enerji yoğunluğu, mobil cihazlarda ise yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj önemlidir. Bu durum, pil tasarımını ve dolayısıyla enerji yoğunluğunu etkiler.
Maliyet	Dolaylı etkiler	Yüksek enerji yoğunluğu genellikle daha pahalı malzemeler ve üretim süreçleri gerektirir. Bu nedenle, maliyet faktörü, pil tasarımında önemli bir kısıtlama olabilir.

Lityum iyon pillerin kg başına kapasitesi, yıllara göre önemli ölçüde artmıştır. Bu gelişme, pil teknolojisindeki gelişmelerden ve yeni pil kimyasallarının ve malzemelerinin geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Lityum iyon pil teknolojisi, özellikle kg başına düşen kapasite açısından son yıllarda önemli bir gelişim göstermiştir. 1990'lı yıllarda yaklaşık 80 Wh/kg olan bu değer, 2000'li yıllarda 100 Wh/kg'a yükselerek ilk önemli adımı atmıştır. 2010'lı yıllarda ise bu değer iki katına çıkarak 200 Wh/kg'ı aşmıştır. En son verilere göre, 2020'li yıllarda lityum iyon pillerin kg başına kapasitesi 250 Wh/kg'a ulaşmıştır. Bu hızlı artış, elektrikli araçlardan cep telefonlarına kadar birçok alanda daha uzun ömürlü ve yüksek performanslı bataryaların kullanılmasını mümkün hale getirmiştir.



Şekil 2.4: Lityum iyon pillerin enerji yoğunluğu 1990'lardan günümüze (Dumé, 2023).

Çizelge 2.4: Lityum iyon pil kapasite gelişimi (1991-2020)

Yıl	Şirket	Ağırlık (kg)	Kapasite (kWh)	Kg Başına Kapasite (Wh/kg)
1991	Sony	1.8	0.04	22
2001	Tesla	35	11	314
2010	Tesla	120	24	200
2020	Tesla	600	82	137

2012 yılında piyasaya sürülen Tesla Roadster, o dönem için oldukça yüksek sayılabilecek 130 Wh/kg enerji yoğunluğuyla dikkat çekmişti. Ancak Tesla, bu başarıyla yetinmeyerek sürekli olarak pil teknolojisinde iyileştirmeler yapmaya devam etti.

2017'de tanıtılan Model 3, sadece 5 yıl içinde bu değeri neredeyse ikiye katlayarak 260 Wh/kg'a ulaştı. Bu gelişme, elektrikli araçların menzil ve performans konusunda önemli bir sıçrama yapmasına olanak tanıdı. 2020'de piyasaya sürülen Model Y ise bu değeri biraz daha yükselterek 290 Wh/kg'a ulaştı.

En son olarak, 2023 yılında güncellenen Model 3 Long Range, 358 Wh/kg gibi oldukça etkileyici bir enerji yoğunluğuna ulaştı. Bu durum, Tesla'nın pil teknolojisindeki liderliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Lityum iyon pillerin kg başına kapasitesinin artması, elektrikli araçların menzilin ve performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, lityum iyon pillerin daha hafif ve daha kompakt hale gelmesini sağlamıştır.

Bu gelişmeler, pil kimyasında ve hücre tasarımında yapılan iyileştirmelere atfedilebilir. Tesla, nikel kobalt alüminyum (NCA) ve lityum demir fosfat (LFP) gibi yeni pil kimyasalları kullanmaya başladı. Ayrıca, hücrelerin paketlenmesini optimize ederek pil paketlerinin ağırlığını azaltmayı başarmıştır.

2.3.2.1.5. Literatürde bazı lityum iyon pil kimyasallarının özellikleri:

Lityum mangan oksit (LMO) katotlu piller, yüksek termal kararlılığı ve uzun ömürlü olması sayesinde güvenilir bir enerji depolama çözümü olarak öne çıkmaktadır. Spinel yapılı LMO katodu, lityum iyonlarının hızlı ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlayarak düşük iç direnç ve yüksek özgül güç sunar. Grafit veya LTO anotlarla birleştirilen LMO piller, özellikle 1000-1500 döngüye kadar uzanan uzun ömürleriyle dikkat çekmektedir. Ancak, LCO pillerle karşılaştırıldığında daha düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Kobalt içermemesi ve çevre dostu malzemelerden üretilmesi nedeniyle LMO piller, sürdürülebilir enerji çözümleri arayışında olan sektörler için cazip bir seçenektir (Zubi ve diğ., 2018).

Lityum Demir Fosfat (LFP) piller, yüksek termal kararlılığı ve uzun ömrü sayesinde güvenilir bir enerji depolama çözümü olarak öne çıkmaktadır. LiFePO_4 katodunun olivin yapısı, lityum iyonlarının katot içerisinde hızlı ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlayarak yüksek güç yoğunluğu sunar. Grafit anot ise, lityum iyonlarının depolamasında önemli bir rol oynar. LFP pillerin düşük maliyeti, çevre dostu olması ve uzun ömrü, bu pilleri büyük ölçekli enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlar gibi uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirmiştir. Ancak, düşük özgül enerji gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Gelecekte, nanoteknoloji ve yeni malzemelerin kullanımıyla LFP pillerin enerji yoğunluğunun artırılması ve maliyetlerinin daha da düşürülmesi beklenmektedir (Zubi ve diğ., 2018).

Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) piller, yüksek enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu sayesinde elektrikli araçlarda sıklıkla tercih edilen bir batarya teknolojisidir. NCA katodunda bulunan nikel, kobalt ve alüminyum oranları, pilin performansını doğrudan etkiler. Yüksek nikel içeriği, pilin enerji yoğunluğunu artırırken, kobalt içeriği pilin stabilite ve ömrünü etkiler. Alüminyum ise, katotun yapısal stabilitesini artırmaya yardımcı olur. Ancak, NCA pillerin yüksek maliyeti, sınırlı döngü ömrü ve güvenlik endişeleri gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Zubi ve diğ., 2018).

Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC) piller, nikel, mangan ve kobaltın farklı oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen bir katot malzemesi kullanılarak üretilir. Bu bileşimin değiştirilmesiyle, pilin enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve ömrü gibi özellikleri optimize edilebilir. NMC piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve iyi bir güç dengesi sayesinde elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve elektronik cihazlar gibi birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Ancak, kobalt gibi kritik metallerin kullanımı maliyeti artırırken, çevresel endişeleri de beraberinde getirmektedir. Gelecekte, nikel içeriğinin artırılması ve kobalt kullanımının azaltılmasıyla NMC pillerin hem performansı hem de maliyeti iyileştirilebilir (Yoo ve diğ., 2015; Zubi ve diğ., 2018).

2.3.2.1.6. Wh/kg oranındaki artışın geleceği

Tesla ve diğer pil üreticileri, Wh/kg oranını daha da iyileştirmek için araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam etmektedir. Uzmanlar, önümüzdeki 10 yıl içinde kg/kWh oranının 400 Wh/kg'a ve hatta 500 Wh/kg'a ulaşabileceğini tahmin ediyor.

Lityum iyon pillerin kg başına kapasitesinin gelecekte de artması beklenmektedir. Araştırmacılar, 300 Wh/kg ve üzeri kapasiteye sahip yeni pil kimyasalları ve malzemeleri geliştirmek için çalışmaktadırlar.

2.3.2.2.Sodyum iyon piller

Sodyum iyon piller, lityum iyon pillerden daha ucuz ve daha bol bulunan sodyum metalini kullanır.

Sodyum iyon piller (NIB veya SIB), lityum iyon pillerin (LIB) bir alternatifi olarak geliştirilen yeni bir pil türüdür. Lityum yerine sodyum iyonlarını kullanarak çalışırlar. Sodyum, lityumdan daha bol ve daha ucuz bir elementtir. Bu da sodyum iyon pillerin lityum iyon pillerden daha düşük maliyetli olması potansiyelini taşır (Slater ve diğ., 2013).

Sodyum iyon piller, enerji depolama sistemlerinde yeni bir çıkış açma potansiyeli taşıyan, lityum iyon pillerin daha uygun maliyetli ve güvenli bir alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Lityum iyon pillerde kullanılan lityum elementine kıyasla sodyum, yer kabuğunda daha bol ve maliyeti daha düşüktür. Bu durum, sodyum iyon pillerin üretim maliyetlerini düşürerek daha ekonomik bir seçenek olmasını sağlar.

Ayrıca, sodyum iyonların lityum iyonlara göre daha az reaktif olması, pilin daha güvenli çalışmasını sağlar ve termal kaçak gibi riskleri azaltır. Bu özellikler, özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlarda kullanılmak üzere sodyum iyon pilleri cazip hale getirir (Eshetu ve diğ., 2016).

Ancak, sodyum iyon pillerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların başında enerji yoğunluğunun lityum iyon pillere göre daha düşük olması gelir (Song ve diğ., 2017). Bu durum, aynı ağırlıkta veya hacimde daha az enerji depolayabilmeleri anlamına gelir ve özellikle taşınabilir elektronik cihazlar gibi yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyan uygulamalarda sınırlayıcı olabilir. Ayrıca, sodyum iyon pil teknolojisi, lityum iyon pil teknolojisi kadar olgunlaşmamıştır. Bu nedenle, üretim süreçleri, malzeme çeşitliliği ve performans optimizasyonu konularında daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Sonuç olarak, sodyum iyon piller, düşük maliyeti, yüksek güvenliği ve sürdürülebilirliği sayesinde enerji depolama sektöründe önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlarda kullanılmak üzere

bu teknolojinin gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Ancak, enerji yoğunluğu ve ömür gibi konularda iyileştirmelere ihtiyaç vardır.

Çizelge 2.5: Sodyum iyon pillerin lityum iyon pillerele karşılaştırılması

Kriter	Sodyum İyon Pili	Lityum İyon Pili
Maliyet	Daha düşük	Daha yüksek
Güvenlik	Daha yüksek	Daha düşük
Sürdürülebilirlik	Daha yüksek	Daha düşük
Enerji Yoğunluğu	Daha düşük	Daha yüksek
Ömür	Daha kısa	Daha uzun
Teknoloji Gelişmişliği	Daha az	Daha fazla
Uygulama Alanları	Elektrikli araçlar, enerji depolama, taşınabilir elektronikler	Elektrikli araçlar, enerji depolama, taşınabilir elektronikler

2.3.2.2.1. Sodyum iyon pillerin geleceği:

Sodyum iyon piller (SIB), lityum iyon piller (LIB) için cazip bir alternatif olarak görülmektedir. Özellikle daha düşük maliyetleri ve daha yüksek güvenlikleriyle dikkat çekmektedirler. Ancak, SIB'lerin en büyük dezavantajlarından biri, enerji yoğunluklarının LIB'lere göre daha düşük olmasıdır. Bu durum, aynı ağırlıkta bir SIB'in, bir LIB kadar enerji depolayamayacağı anlamına gelir.

Çizelge 2.6: Sodyum iyon pil - lityum iyon pil enerji yoğunluğu karşılaştırması ve hedefler

Pil Tipi	Mevcut Durum	Hedeflenen Değer
Sodyum İyon (SIB)	100-160 Wh/kg	200-250 Wh/kg
Lityum İyon (LIB)	200-300 Wh/kg	300-400 Wh/kg

SIB'lerin mevcut enerji yoğunluğu LIB'lerden yaklaşık %50-67 daha düşüktür. Bu farkın temel nedeni, sodyum iyonlarının lityum iyonlarından daha büyük ve daha ağır olmasıdır. Daha büyük iyonlar, elektrotlarda daha az sıkıştırılabildiği için birim kütle başına daha az enerji depolama kapasitesine yol açar.

Sodyum iyon pil teknolojisi gelişmeye devam ettikçe, Wh/kg oranının da artması beklenmektedir. Araştırmacılar, yeni pil kimyasalları ve malzemeleri geliştirerek Wh/kg oranını 200-250 Wh/kg'a çıkarmayı hedeflemektedir.

Çizelge 2.7: Sodyum iyon pillerin wh/kg oranını etkileyen faktörler ve avantajları

Faktör	Etkisi	Avantajları
Pil Kimyası	Farklı katot ve anot malzemelerinin kullanımı, enerji yoğunluğunu doğrudan etkiler. NCA ve LFP gibi farklı kimyalar, farklı enerji yoğunluğu değerlerine sahiptir.	Yeni ve daha verimli elektrot malzemelerinin keşfi, enerji yoğunluğunu artırır.
Hücre Tasarımı	Hücrenin iç yapısı, aktif malzemelerin miktarı ve elektrotların kalınlığı gibi	Aynı hacimde daha fazla aktif malzeme barındırarak enerji yoğunluğunu artırır.

faktörler, enerji yoğunluğunu belirler. Daha ince ve daha kompakt hücreler, daha yüksek enerji yoğunluğu sağlar.

Pil hücrelerinin bir araya getirilerek oluşturulan paketin tasarımı, pilin toplam ağırlığını etkiler. Hafif malzemelerin kullanılması ve optimize edilmiş paketleme teknikleri, enerji yoğunluğunu artırır.

Yüksek Wh/kg
Oranının Genel
Avantajları

Pil paketinin ağırlığını azaltarak enerji yoğunluğunu artırır.

Daha fazla menzil, daha düşük maliyetler, daha az çevresel etki, daha küçük ve hafif cihazlar, daha hızlı şarj, daha uzun ömür.

2.3.2.3.Kurşun-asit piller

Kurşun asit aküler, 19. yüzyıldan beri kullanılan en eski şarj edilebilir pil türlerinden biridir. Gaston Plante tarafından 1859'da icat edilen bu aküler, özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun (Pb), kurşun dioksit (PbO_2) elektrotları ve sülfürik asit elektrolitinden oluşan bu sistem, deşarj sırasında sülfürik asidin elektrotlarla reaksiyona girerek kurşun sülfat ($PbSO_4$) oluşturmaya ve elektrolitin seyrelmesi prensibine dayanır. Şarj işlemi ise bu reaksiyonun tersine dönmesiyle gerçekleşir. Kurşun asit akülerin uzun yıllardır kullanılan olmasına rağmen, özellikle düşük sıcaklıklarda performans kaybı ve çevresel etkileri gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Kurzweil, 2010).

2.3.2.3.1. Kurşun asit pillerin çalışma prensibi:

Kurşun asit aküler, elektrokimyasal reaksiyonlar sayesinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Pilin temel bileşenleri, pozitif elektrot (anot) olarak kurşun dioksit (PbO_2), negatif elektrot (katot) olarak saf kurşun (Pb) ve elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisidir. Şarj işlemi sırasında, harici bir elektrik kaynağı sayesinde anot oksitlenirken katot indirgenir. Bu reaksiyonlar sonucu elektrolitteki sülfürik asit yoğunlaşır ve elektrik enerjisi depolanır. Deşarj işleminde ise bu reaksiyonlar tersine döner; elektrotlar üzerinde kurşun sülfat ($PbSO_4$) oluşur ve elektrolit seyreterek elektrik enerjisi üretilir (Pavlov ve diğ., 2004).

2.3.2.3.2. Avantajlar ve dezavantajlar

Kurşun asit aküler, düşük maliyetleri, uzun ömürleri, yüksek güç çıkışları ve güvenilirlikleri gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak, düşük enerji yoğunluğu, ağır yapıları, bakım gerektirmeleri ve çevresel etkileri gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda lityum iyon piller gibi daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve çevre dostu teknolojilerin gelişmesi, kurşun asit akülerin kullanım alanını sınırlamıştır.

2.3.2.3.3. Uygulama alanları

Özellikle otomotiv sektöründe, marş motorlarını çalıştırmak ve araçların elektrik sistemlerini beslemek için yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, yedek güç sistemlerinde, telekomünikasyon altyapılarında ve kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) da önemli bir yere sahiptirler. Bu akülerin yüksek çıkış akımı verme özelliği, ani güç ihtiyacı olan uygulamalarda onları vazgeçilmez kılar.

Düşük maliyetleri ise ekonomik açıdan avantaj sağlar. Ancak, kurşun asit akülerin ağır ve hacimli olmaları, periyodik bakım gerektirmeleri ve çevresel etkileri gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte lityum iyon gibi daha hafif, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve daha çevre dostu akü türleri ortaya çıksa da, kurşun asit aküler, özellikle düşük maliyet ve yüksek çıkış akımı gerektiren uygulamalarda hala önemli bir yer tutmaktadır. Ancak, gelecekte, daha sürdürülebilir ve çevre dostu enerji depolama çözümlerine geçişle birlikte kurşun asit akülerin kullanım alanları daralabilir (Jiang ve Song, 2022).

2.3.2.4.Katı hal piller

Katı hal piller, sıvı elektrolit yerine katı elektrolit kullanan yeni bir pil türüdür. Katı hal piller, daha güvenli ve daha uzun ömürlü olma potansiyeline sahiptir. Katı hal pilleri, sıvı elektrolit yerine katı elektrolit kullanan yeni bir pil türüdür. Katı hal pilleri, geleneksel lityum iyon pillerden daha güvenli, daha uzun ömürlü ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olma potansiyeline sahiptir.

Katı hal pilleri, lityum iyonlarının anottan katoda akmasına izin veren katı bir elektrolit kullanır. Katı elektrolit, sıvı elektrolitten daha güvenlidir ve sızıntı riski yoktur. Ayrıca katı elektrolit, pilin daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasını sağlar (Xiao ve diğ., 2020).

Katı hal piller, geleneksel lityum iyon pillerin sunduğu avantajların üzerine çıkarak, enerji depolama teknolojilerinde yeni bir çığır açmaktadır. Sıvı elektrolit yerine katı bir elektrolit kullanmaları, bu pilleri daha güvenli, daha uzun ömürlü ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip hale getirmektedir. Bu özellikler, katı hal pillerini elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi birçok alanda potansiyel bir çözüm haline getirmektedir.

Katı hal pillerin en büyük avantajlarından biri, güvenlikleriyle ilgilidir. Sıvı elektrolit içermeleri nedeniyle kısa devre veya yanma riskine karşı hassas olan geleneksel lityum iyon pillerin aksine, katı hal piller bu riskleri önemli ölçüde azaltır. Bu durum, özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyan uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, katı elektrolitlerin aşınma direnci daha yüksek olduğundan, katı hal pillerin döngü ömrü sıvı elektrolitli pillere göre daha uzundur. Bu özellik, pilin daha uzun süre boyunca yüksek performans göstermesini sağlar.

Diğer bir önemli avantaj ise yüksek enerji yoğunluklarıdır. Katı hal piller, aynı hacimde daha fazla enerji depolayabilme potansiyeline sahiptir. Bu özellik, elektrikli araçların menzilini artırmak ve daha küçük ve hafif elektronik cihazlar geliştirmek için önemlidir. Ancak, katı hal pillerin henüz yaygınlaşmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Yüksek maliyet ve düşük üretim kapasitesi, bu teknolojinin henüz tam olarak olgunlaşmadığının göstergeleridir.

Katı hal pil teknolojileri, günümüzde hızla gelişmektedir. Araştırmacılar ve üreticiler, bu pillerin maliyetini düşürmek, üretim kapasitesini artırmak ve performansını iyileştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Önümüzdeki yıllarda katı hal pillerin daha yaygın olarak kullanılması ve enerji depolama teknolojilerinde yeni bir dönem başlatması beklenmektedir. Katı hal piller, elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara, enerji depolama sistemlerinden endüstriyel uygulamalara kadar birçok alanda hayatımızı kolaylaştıracak ve sürdürülebilir bir geleceğe katkı sağlayacaktır.

2.4.Pil Performansını etkileyen faktörler

Pil performansı, çok çeşitli faktörlerden etkilenebilen karmaşık bir konudur. Bu faktörler, pilin kimyasal bileşimi, fiziksel yapısı, çalışma koşulları ve kullanım şekli gibi birçok değişkene bağlıdır.

Pil Kimyası: Katot Malzemeleri: Lityum iyon pillerde yaygın olarak kullanılan katot malzemeleri arasında LCO (Lityum Kobalt Oksit), NMC (Nikel-Manganez-Kobalt Oksit) ve NCA (Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit) gibi bileşikler bulunmaktadır. Bu malzemelerin kristal yapısı, yüzey alanı ve elektronik özellikleri, pilin performansını önemli ölçüde etkiler.

2.4.1. Kimyasal yapı

Lityum iyon pillerin performansı, büyük ölçüde anot malzemeleri ve elektrolitlerin özelliklerine bağlıdır. Geleneksel olarak, grafit anot malzemeleri yüksek stabilite ve düşük maliyet avantajlarıyla öne çıksa da, silikon ve kalay gibi alternatif malzemeler, teorik olarak daha yüksek kapasiteleri nedeniyle yoğun bir araştırma konusu olmuştur. Bu malzemelerin, pilin enerji yoğunluğunu artırma potansiyeli, elektrikli araçlar gibi yüksek enerji ihtiyacı olan uygulamalar için oldukça caziptir. Öte yandan, elektrolitlerin ise lityum iyonlarının katot ve anot arasında taşınmasını sağlayan kritik bir bileşen olduğu unutulmamalıdır. Genellikle organik çözücülerde çözülmüş lityum tuzlarından oluşan elektrolitlerin viskozitesi, iyonik iletkenliği ve kimyasal kararlılığı, pilin iç direnci, ömrü ve güvenliği üzerinde doğrudan etkilidir.

2.4.2. Fiziksel yapı

Pilin fiziksel yapısı, elektrotların geometrisi, gözenekliliği ve kalınlığı gibi parametrelerle yakından ilişkilidir. Levha, silindirik veya toz şeklinde olabilen elektrotların

geometrisi, yüzey alanı ve elektron taşınımı üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek gözeneklilik, iyonların daha hızlı hareket etmesini sağlarken, mekanik dayanımı zayıflatır. Elektrotların kalınlığı ise kapasite ile iç direnç arasında bir denge oluşturur.

2.4.3. Çalışma koşulları

Pilin çalışma koşulları, performansını önemli ölçüde etkileyen bir diğer faktördür. Yüksek sıcaklıklar, kimyasal reaksiyon hızını artırarak pilin bozulmasına neden olurken, düşük sıcaklıklar iyon hareketini yavaşlatır ve kapasite kaybına yol açar. Yüksek şarj/deşarj oranları ise polarizasyon ve aşırı ısınma gibi sorunlara neden olarak pil ömrünü kısaltabilir. Çevresel faktörler arasında nem, titreşim ve toz, pilin iç direncini artırarak performansını olumsuz etkiler. Pilin çalışma sıcaklık aralığı, şarj profilleri ve pil yönetim sistemleri gibi faktörler de pilin ömrü ve performansı üzerinde önemli rol oynar.

2.4.4. Kullanım şekli

Pilin kullanım şekli, performansı üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir faktördür. Sürekli derindeşarjlar, pilin aktif malzemelerinde kalıcı hasarlara yol açarak kapasite kaybına neden olurken, sığdeşarjlar pil ömrünü uzatır. Şarj vedeşarj arasında yeterli dinlenme süresi verilmemesi, iç direnci artırarak pilin performansını düşürür. Ayrıca, pilin tekrar tekrar şarj edilmesi vedeşarj edilmesi, kalender yaşlanma ve stres yaşlanma gibi mekanizmalar nedeniyle kapasitesinin zamanla azalmasına neden olur. Pil kimyası, şarj profilleri, batarya yönetim sistemleri (BYS) ve çevresel koşullar gibi faktörler de pilin kullanım şeklinin etkilerini modüle eder. Bu nedenle, pilin ömrünü uzatmak için uygun şarj/deşarj döngüleri ve dinlenme süreleri belirlenmeli ve pilin çalışma koşulları optimize edilmelidir.

2.5. Sıcaklık Değişiminin Pil Performansı Üzerindeki Etkisi

Lityum-ion pillerin elektrokimyasal süreçleri, doğal olarak ısı üretimi ile birlikte gerçekleşir (Thomas ve Newman, 2003). Bu ekzotermik reaksiyonlar, pil sıcaklığının artmasına ve dolayısıyla pilin performansının düşmesine neden olur. Yüksek sıcaklık, iç direnci artırarak enerji verimliliğini azaltır, kapasite kaybına yol açar ve hatta termal kaçak gibi ciddi güvenlik risklerini beraberinde getirir. Pilin termal davranışı, hem içsel faktörler (malzeme özellikleri, hücre geometrisi) hem de dışsal faktörler (çevre sıcaklığı, soğutma

sistemi) tarafından etkilenir (Linden, 1995). Bu nedenle, lityum-ion pillerin güvenli ve verimli çalışması için, sıcaklık yönetimi kritik bir öneme sahiptir (Drake ve diğ., 2015).

Lityum iyon piller (LiB'ler), performansları, dayanıklılıkları ve güvenlikleri açısından termal davranışlarıyla yakından ilişkilidir. Pil paketindeki ısı üretiminin tahmini, LiB'lerin termal davranışlarını anlamak ve pil ömrünü ve güvenliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla pil ısı üretiminin belirlenmesine yönelik önceki çalışmalar genellikle deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Ancak bu noktada kalorimetri, olumlu bir yaklaşımdır. Araştırmalara göre, Hızlanma Oranlı Kalorimetre (ARC), İzotermal Isı İletimi Kalorimetrisi (IHC) ve geliştirilmiş yüksek hassasiyetli kalorimetre, pilin termal davranışını incelemek için kullanılmıştır. Ayrıca, yerinde tahminler için ısı akısı ölçümü gibi geleneksel olmayan yöntemler de tasarlanmıştır. Ancak bu yöntemler yalnızca laboratuvar koşullarında uygulanabilir ve elektrikli araçlar (EV'ler) gibi yerleşik uygulamalara uygulanması zordur. Bu nedenle, lityum iyon pillerinin ısı üretim özelliklerinin mekanizmasını ve bunun pil performansına etkisini anlamak hayati önem taşır (Duan ve Naterer, 2010; Xie ve diğ., 2018).

Elektrikli araç (EV) ve enerji depolama sistemleri (ESS) endüstrileri büyüdükçe, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha büyük boyutlu lityum iyon pilleri (LiB'ler) yaygın olarak kullanılmaktadır. LiB hücrelerinin enerji yoğunluğu yaklaşık 260 Wh/kg'a ulaşmış ve boyutları yaklaşık 120 Ah kapasiteyi karşılayacak şekilde artmıştır. Bu hücreler bir modül veya bir paket içinde kullanıldığından, sıcaklık kontrolü güvenli ve uzun döngü ömrü işletimi için kritik öneme sahiptir (Bloom ve diğ., 2001). Şarj ve deşarj sırasında bir hücrenin sıcaklığı değişir ve sıcaklık değişiminin kesin tahmini, modülün, paketin ve sistemin sıcaklık yönetim sistemi (TMS) tasarımı için önemlidir (Duan ve Naterer, 2010; Wu ve diğ., 2013). Bir hücre, açık bir alanda ısıyı kolayca yayabilirken, bataryanın içindeki hücreleri kontrol etmek kolay değildir. Çok hücreli bir batarya paketinin iç kısmında bulunan hücre, kısmi adiyabatik koşullarda olabilir. Burada biriken ısı, çok hücreli batarya paketinin dış kısmına göre iç kısmında daha hızlı bir sıcaklık artışına yol açar ve bu da en kötü durumda hızlı bir bozulma veya termal kaçışa neden olabilir (Doh ve diğ., 2019).

Lityum iyon pillerde meydana gelen termal kaçak, hücre sıcaklığının anormal seviyelere yükselmesiyle karakterize edilen ve potansiyel olarak ciddi sonuçlara yol açabilen bir durumdur. Hücre içi sıcaklığın 90°C'nin üzerine çıkması, havalandırma riski;

130°C'ye ulaşması ise kendiliğinden yanma riski taşımaktadır. Ayrıca, 80°C'nin üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta termal kaçak olasılığı önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, hücre sıcaklığını gerçek zamanlı olarak izlemek ve termal kaçak riskini önceden tahmin etmek büyük önem taşımaktadır. Geleneksel olarak kullanılan termal görüntüleme, temaslı sensörler gibi yöntemler, ölçüm süreleri uzun olduğundan hızlı müdahale için yeterli olmamaktadır (Srinivasan ve diğ., 2011).

Lityum iyon pillerin (LiB'ler) termal davranışını ve bunun performans, dayanıklılık ve güvenlik üzerindeki etkilerini anlama bağlamında, bu pillerdeki ısı üretimini tahmin etmeye yönelik yöntemleri araştırmak çok önemlidir. Bu, pil ömrünü ve güvenliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirmek için bu tür bir anlayışın gerekli olduğu pil endüstrisinde özellikle önemlidir. Pilin ısı üretimini belirlemeye yönelik önceki çabalar büyük ölçüde deneysele ve kalorimetri umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıktı. Raporlar, pillerin termal davranışını araştırmak için Hızlandırılmış Hız Kalorimetresi (ARC), İzotermal Isı İletimi Kalorimetresi (IHC) ve gelişmiş yüksek hassasiyetli kalorimetri gibi tekniklerin kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca yerinde tahmin için ısı akısı ölçümü ve çoklu sensör füzyon yöntemleri gibi geleneksel olmayan yöntemler de tasarlanmıştır. Ancak bu yöntemlerin öncelikle laboratuvar koşullarında uygulanabilir olduğunu ve elektrikli araçlar (EV'ler) gibi entegre uygulamalarda uygulamada zorluklar yaratabileceğini unutmamak önemlidir (Zhang ve diğ., 2020).

Pil sıcaklığındaki değişimler, pilin performansı, ömrü ve güvenilirliği üzerinde doğrudan ve önemli etkiler yaratmaktadır. Pilin iç yapısını oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sıcaklık ile doğrusal bir ilişki içerisindedir. Örneğin, nikel-metal hidrit pillerde hidrojenin elektrot üzerindeki emilimi ve bırakılması gibi temel reaksiyonlar, sıcaklık değişimlerinden oldukça etkilenir. Düşük sıcaklıklarda pil kapasitesinde kayıplar yaşanırken, yüksek sıcaklıklarda ise iç direnç artarak pilin ömrünü kısaltır ve termal kaçak riskini artırır. Bu nedenle, pillerin optimum performans göstermesi ve uzun ömürlü olması için belirli bir sıcaklık aralığında çalıştırılması gerekmektedir. Özellikle elektrikli araçlarda kullanılan gelişmiş bataryalarda, yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj gibi talepler, pil içindeki sıcaklığın eşit dağılımını ve kontrolünü daha da önemli hale getirmektedir. Zira sıcaklıktaki dengesizlikler, pilin bazı bölgelerinde aşırı ısınmaya ve dolayısıyla güvenlik sorunlarına yol açabilir (Gu ve Wang, 2000).

2.6.Farklı Pil Kimyasallarının Genel Özellikleri

Piller, günlük hayatımızda elektronik cihazlarımızdan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Farklı pil kimyasalları, farklı enerji yoğunlukları, güç çıkışları, ömürleri ve maliyetleri gibi çeşitli özelliklere sahiptir. Bu bölümde, farklı pil kimyasallarının genel özellikleri ve birbirleri arasındaki karşılaştırmalar üzerinde durulacaktır.

Çizelge 2.8: Bazı pillerin genel özellikleri

Pil Türü	Enerji Yoğunluğu	Güç Çıkışı	Ömür (Şarj Döngüsü)	Maliyet	Çevresel Etki	Kullanım Alanları
Çinko-Karbon	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Uzaktan kumandalar, saatler
Alkalın	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta	Ev aletleri, oyuncaklar
Lityum (Primer)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük (Atık yönetimi zor)	Elektronik cihazlar, saatler
Kurşun Asit	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta (Asit içerir)	Otomobil aküleri
Nikel-Kadmiyum	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek (Kadmiyum zehirli)	Eski tip şarjlı piller
Nikel-Metal Hidrit	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Şarjlı piller

Lityum İyon	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta (Düşüş eğilimi)	Orta (Geri dönüşüm önemli)	Cep telefonları, elektrikli araçlar
--------------------	--------	--------	--------	----------------------	----------------------------	-------------------------------------

Farklı pil kimyasallarının, enerji yoğunluğu, güç çıkışı, ömür, maliyet ve çevresel etkiler gibi çeşitli özellikleri, farklı uygulama alanlarında farklı pil türlerinin tercih edilmesine neden olur. Teknolojik gelişmeler sayesinde pil teknolojileri sürekli olarak gelişmekte ve yeni pil türleri ortaya çıkmaktadır.

2.7.Mevcut Ölçüm Yöntemleri ve Karşılaştırılması

Mevcut literatürde lityum iyon pillerdeki ısı üretimini yakalamak için modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Öne çıkan yaklaşımlardan biri, fiziksel prensiplere dayanan ve kinetik ısı, tersinir ısı, joule ısı ve diğer ilgili faktörler dahil olmak üzere ısı üretimini yüksek derecede hesaplama yeteneğine sahip elektrokimyasal-termal (EKT) modellerin kullanımını içerir. Bu modellerin lityum iyon pillerdeki ısı üretimini tahmin etmede mükemmel hassasiyet sunduğu bildirildi. Ancak, EKT modellerinin yüksek hesaplama maliyetleriyle ilişkili olduğunu ve bunun da gerçek dünya uygulamalarında pratik uygulamalarını sınırlayabileceğini unutmamak gerekir (Zhang ve diğ., 2020).

Lityum-iyon pillerin güvenilir ve verimli çalışması için termal yönetim son derece kritiktir. Pillerin iç direnci, şarj/deşarj akımı ve çevresel sıcaklık gibi faktörler, pil içindeki ısı üretimini doğrudan etkiler. Yüksek ısı üretimi, termal kaçak riskini artırarak pilin ömrünü kısaltabilir ve güvenliği tehdit edebilir. Bu nedenle, farklı çalışma koşullarında pilin termal davranışını doğru bir şekilde modellemek ve simüle etmek büyük önem taşır. Araştırmacılar, pilin iç sıcaklık dağılımını, yüzey sıcaklığını ve ısı üretim hızını belirlemek için çeşitli yöntemler ve modeller geliştirmişlerdir. Bu modeller, pil tasarımı, malzeme seçimi ve soğutma sistemlerinin optimizasyonu için önemli bir araçtır. Özellikle, mikrokanallı soğutucu plakalar ve hava soğutma sistemleri gibi farklı soğutma yöntemlerinin etkinliği üzerine yapılan çalışmalar, pilin termal yönetimi konusunda önemli ilerlemeler sağlamıştır (Drake ve diğ., 2015; Mevawalla ve diğ., 2022; Panchal ve diğ., 2022; Wu ve diğ., 2023).

Farklı en boy oranlarına sahip elektrotlar ve akım toplayıcı sekmelerin farklı konumlarda yerleştirildiği üç farklı geometrik yapıdaki elektrot için modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, elektrot geometrisi ve deşarj davranışı arasındaki ilişki incelenmiştir. Kim ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, 1C, 3C ve 5C deşarj oranlarında elde edilen deneysel veriler, modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı malzeme ve üretim süreçleri kullanılarak hazırlanan farklı geometrik yapıdaki elektrotlar için, bir elektrot geometrisi için ayarlanan model parametrelerinin diğer geometriler için de geçerli olabileceğini göstermiştir (Kim ve diğ., 2008).

Kumar ve Chavan (2022), çalışmasında NMC ve NCA aktif malzemelerine sahip, farklı boyutlardaki silindirik lityum iyon pillerin termal karakterizasyonu, $C/2$, C , $3C/2$ akımlarında ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, pillerin içsel ısı üretimini ve sıcaklık dağılımını belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, elektrot malzemelerinin, pil boyutunun ve çalışma koşullarının pil sıcaklığı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.(Kumar ve Chavan, 2022)

3. MATERYAL VE METOT

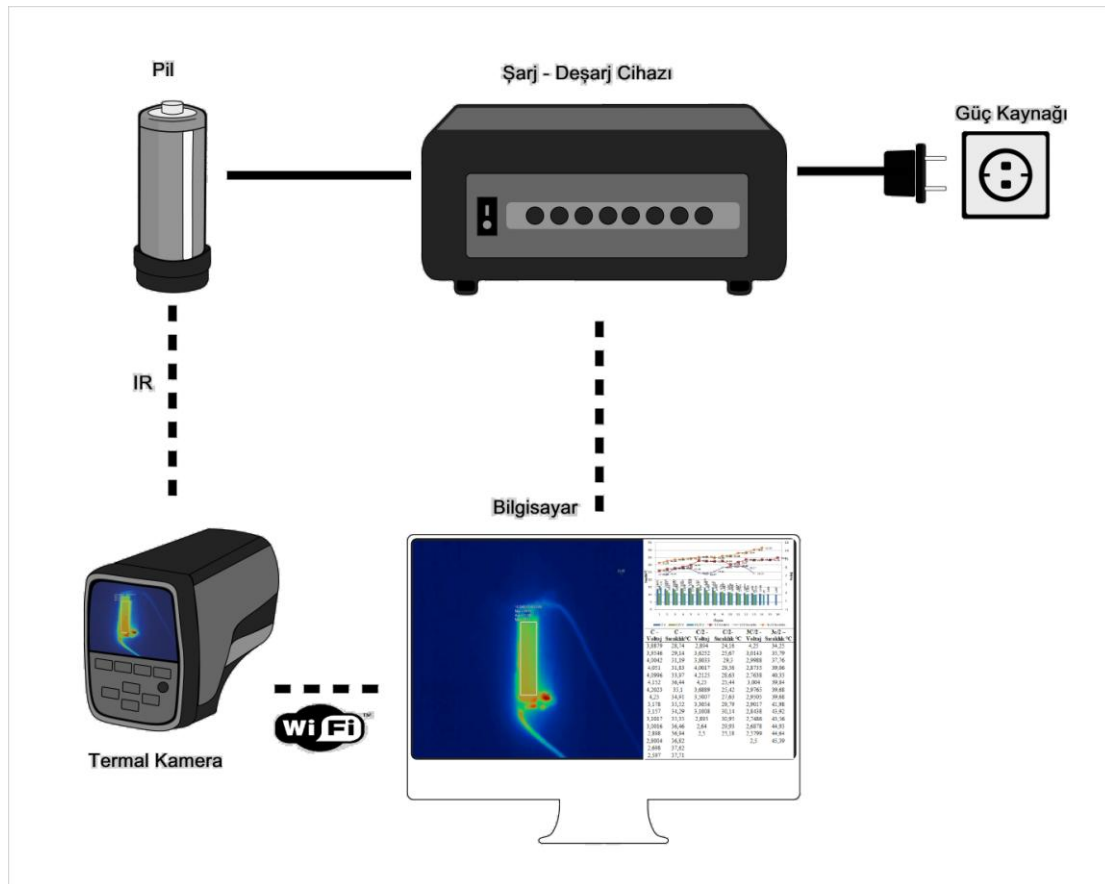
3.1.Kullanılan Pil Kimyasalları ve Tipleri

Nikelce zengin lityum-nikel-manganez-kobalt oksit (NMC) kimyasallı, ticari olarak kullanılan Aspilsan marka 18650, 2800 mAh kapasiteli ve 3.7V nominal voltaja sahip, enerji yoğunluğu 230 Wh/kg – 605Wh/L olan silindirik bir pil.

3.2.Deneysel Kurulum ve Ölçüm Sistemi

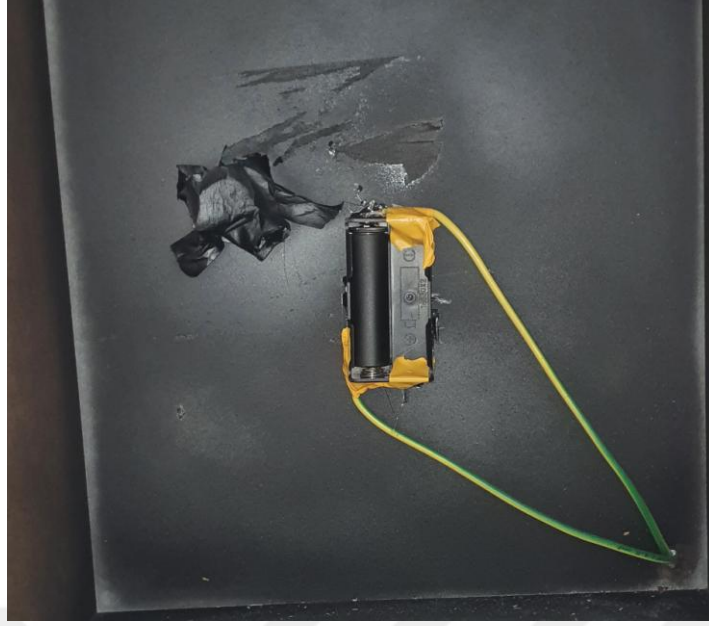
Farklı şarj akımlarının lityum iyon pilin termal davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir deney tasarlanmıştır. Nikelce zengin lityum-nikel-manganez-kobalt oksit (NMC) kimyasallı, silindirik pil, 25°C oda sıcaklığında, farklı kalınlıklarda yalıtım malzemesi ile kaplanmış, iç ebatları 20 cm x 40 cm x 30 cm olan bir orta yoğunluklu lifli levha (MDF) kutu içerisinde yerleştirilmiştir. Pil, C/2, C ve 3C/2 olmak üzere farklı şarj akımlarında, Neware marka BTS8 5V12A model şarj – deşarj cihazı kullanılarak 2.5V ile 4.2V arasında şarj – deşarj edilmiş ve şarj sürecinde pil yüzeyindeki sıcaklık değişimleri, belirli aralıklarla bir Fluke TİS60+ termal kamera ile manuel kaydedilmiştir. Termal kamera görüntülerinin daha anlamlı olması için ortam ışıktan arındırıldı. Yansımayı engellemek için pil akrilik spreyci boya ile boyandı. Termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler anlamlı tablo ve şekillere dönüştürüldü.

Bu deney, pilin termal yönetimi ve elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemlerinin geliştirilmesi için önemli veriler sunmaktadır.



Şekil 3.1: Deney düzeneği kurulum ve ölçüm şeması

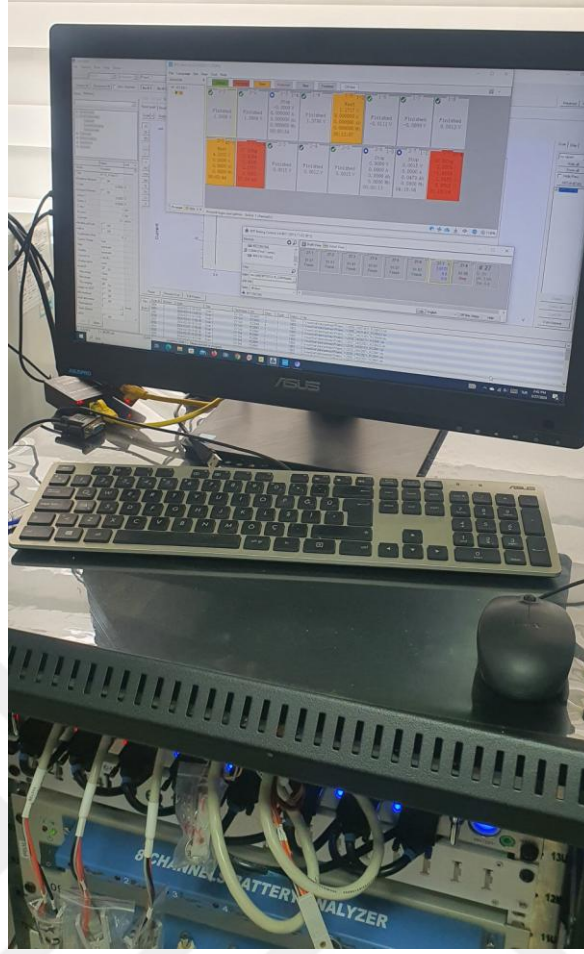
Bu deney, pilin termal yönetimi, batarya paketlerinin tasarımı ve elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemlerinin geliştirilmesi için önemli veriler sunmaktadır



Şekil 3.2: Pil şarj yuvası.



Şekil 3.3: Termal kamera konumlandırması.



Şekil 3.4: Şarj - deşarj cihazı ve voltaj değerlerinin not edildiği ekran.

3.3. Veri Toplama Ve Analiz Yöntemi

Deney sırasında farklı voltaj değerlerinde termal kamera ile ölçümler yapıldı. Yapılan ölçümlerde pil yüzeyindeki sıcaklık değişiminin termal kamera görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen görüntüler Fluke Connet 2.0.1.0 programı ile 320*240 piksel çözünürlükteki resimler analiz ettirildi. Her piksele karşılık gelen sıcaklık değerini veren Excel formatındaki veriler elde edildi. Bu verilerle sıcaklık grafikleri Microsoft Excel ile oluşturuldu.

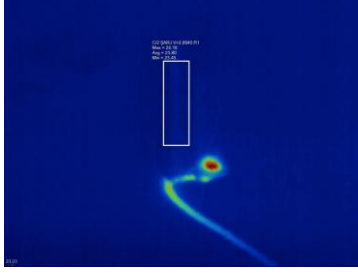
Görüntülerden pil yüzeyinin maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıkları tespit edilip Excel tablosu oluşturuldu. Oluşturulan tablolardan farklı akımlardaki sıcaklık değişimlerini gösteren grafikler oluşturulup karşılaştırıldı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

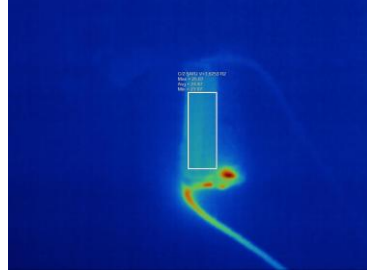
4.1.Araştırma Bulguları

C/2 akım kullanılarak şarj ve deşarj sırasında alınan ölçümlerden elde edilen termal kamera görüntüleri **Şekil 4.1**'de verilmiştir.

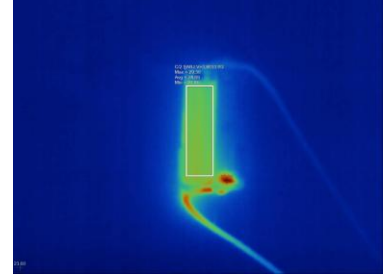




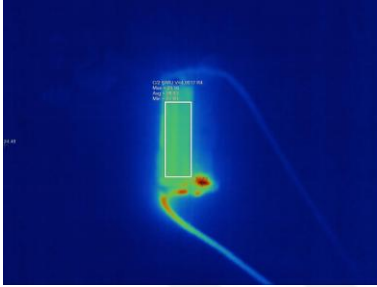
Şekil 4.1.a



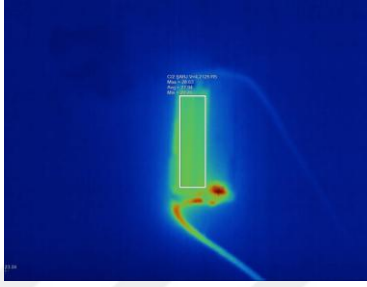
Şekil 4.1.b



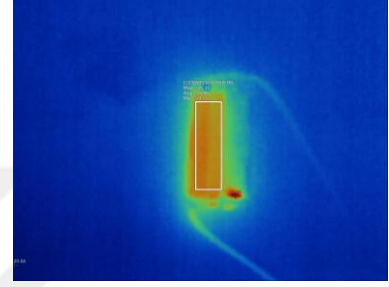
Şekil 4.1.c



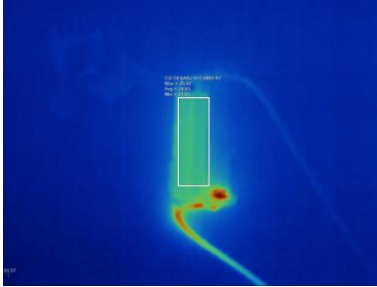
Şekil 4.1.d



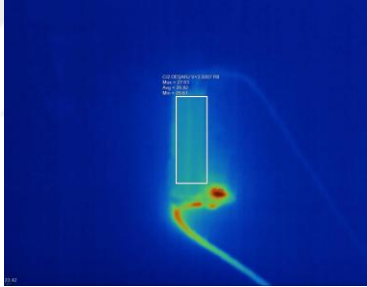
Şekil 4.1.e



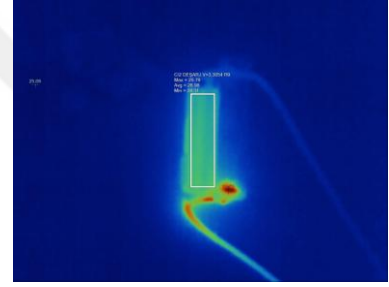
Şekil 4.1.f



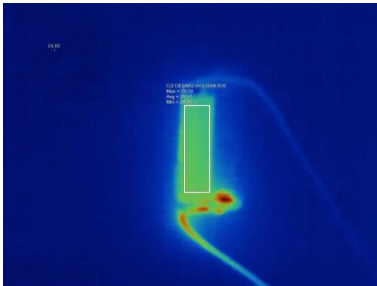
Şekil 4.1.g



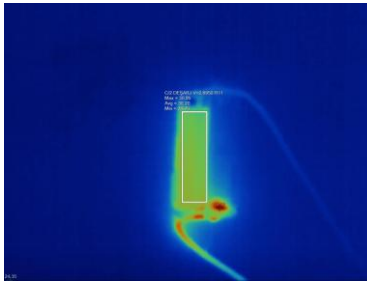
Şekil 4.1.h



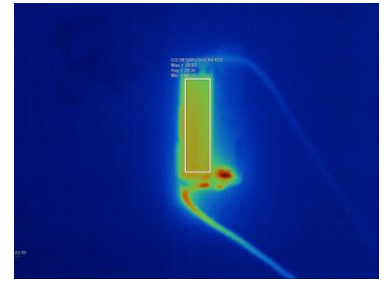
Şekil 4.1.ı



Şekil 4.1.j



Şekil 4.1.k

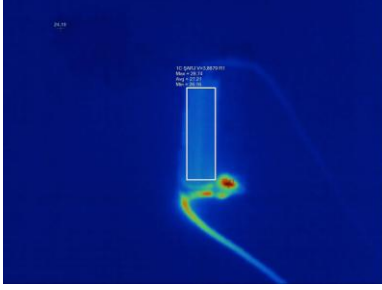


Şekil 4.1.l

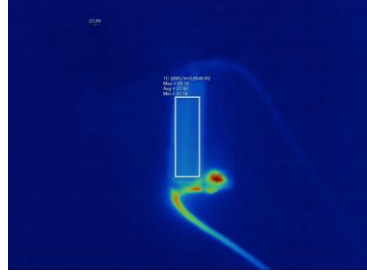
Şekil 4.1: C/2 akımda şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.

C akım kullanılarak şarj ve deşarj sırasında alınan ölçümlerden elde edilen termal kamera görüntüleri **Şekil 4.2**'de verilmiştir.

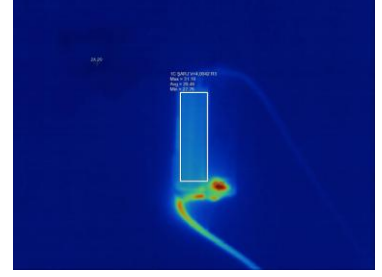




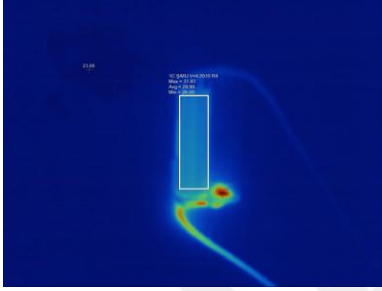
Şekil 4.2.a



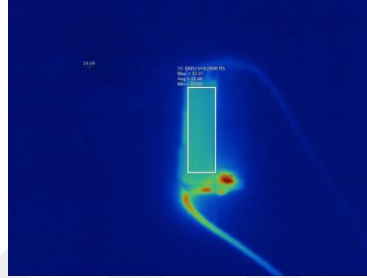
Şekil 4.2.b



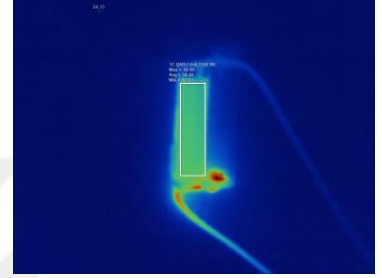
Şekil 4.2.c



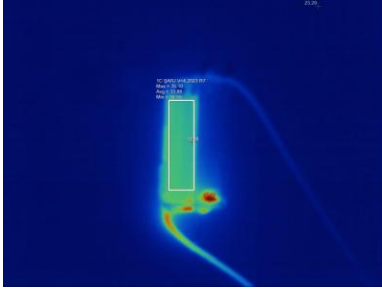
Şekil 4.2.d



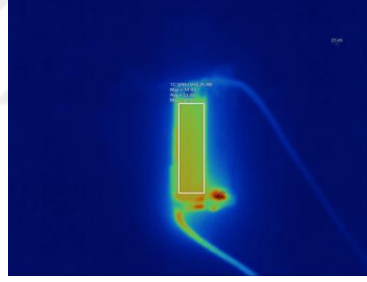
Şekil 4.2.e



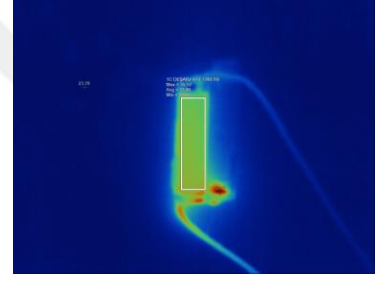
Şekil 4.2.f



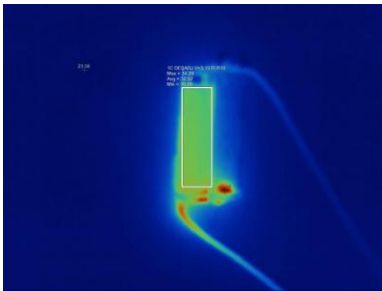
Şekil 4.2.g



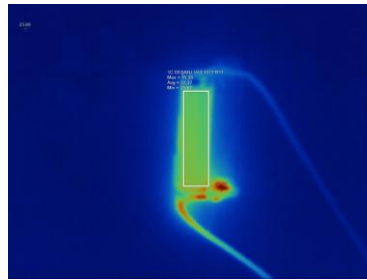
Şekil 4.2.h



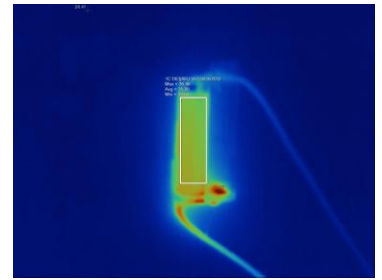
Şekil 4.2.ı



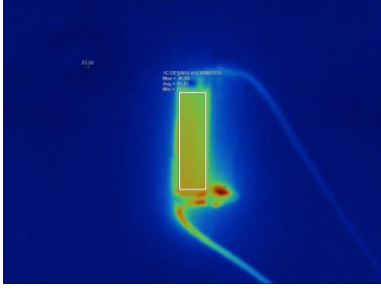
Şekil 4.2.j



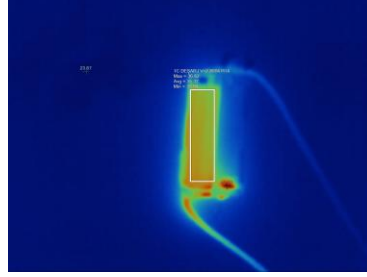
Şekil 4.2.k



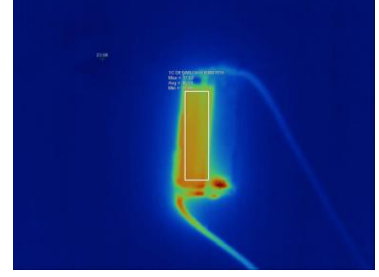
Şekil 4.2.l



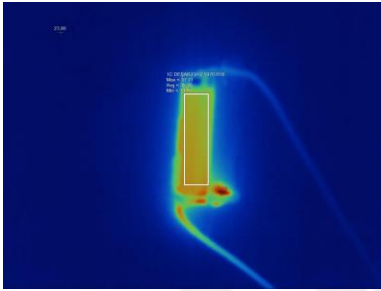
Şekil 4.2.m



Şekil 4.2.n



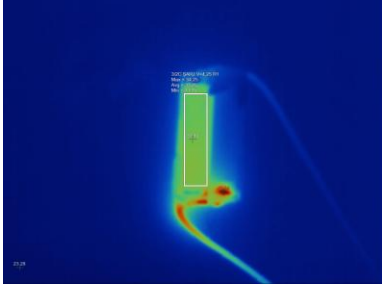
Şekil 4.2.o



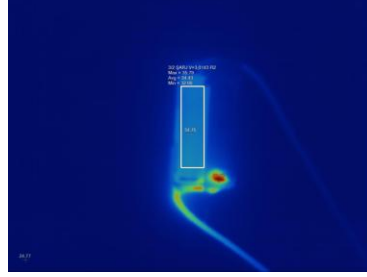
Şekil 4.2.p

Şekil 4.2: C akımında şarj –deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.

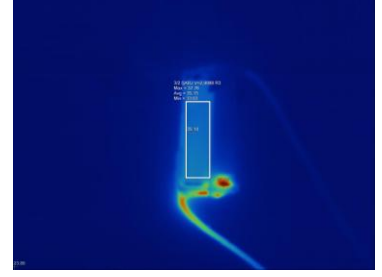
3C/2 akım kullanılarak şarj vedeşarj sırasında alınan ölçümlerden elde edilen termal kamera görüntüleri **Şekil 4.3**'te verilmiştir.



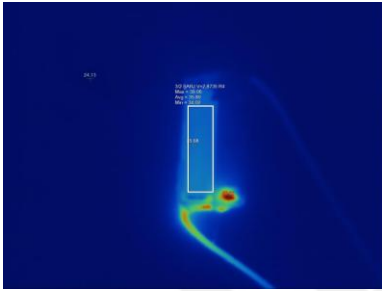
Şekil 4.3.a



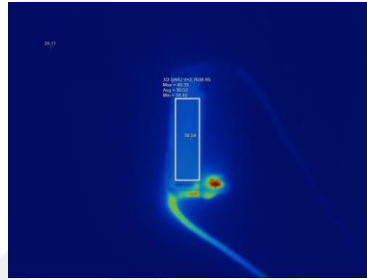
Şekil 4.3.b



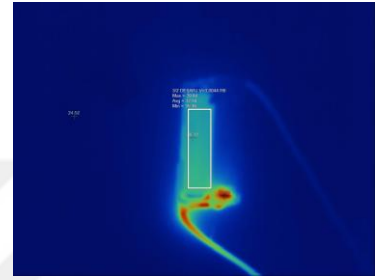
Şekil 4.3.c



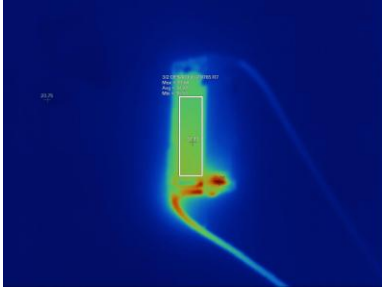
Şekil 4.3.d



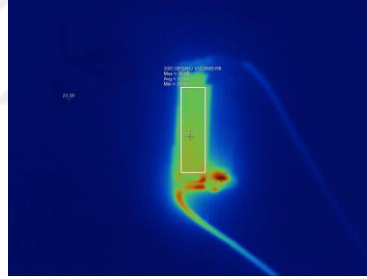
Şekil 4.3.e



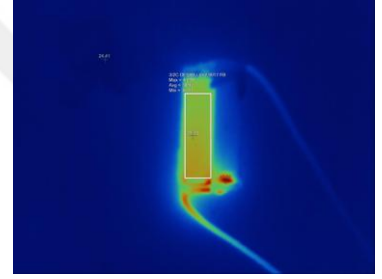
Şekil 4.3.f



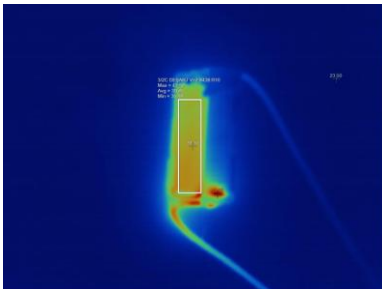
Şekil 4.3.g



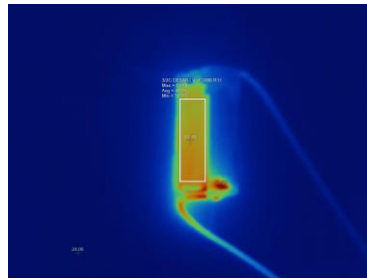
Şekil 4.3.h



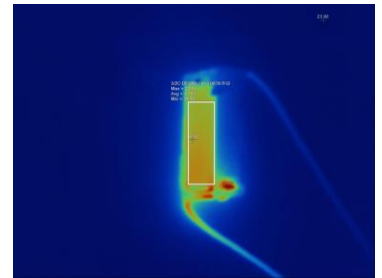
Şekil 4.3.ı



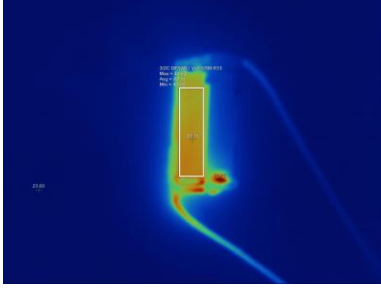
Şekil 4.3.j



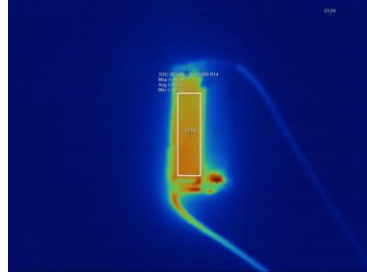
Şekil 4.3.k



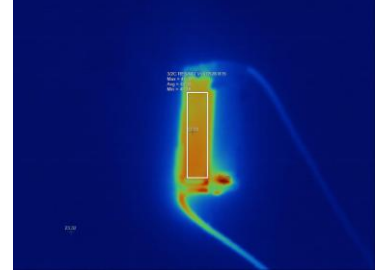
Şekil 4.3.l



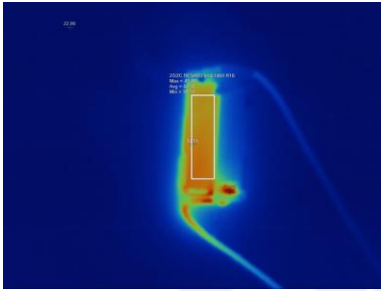
Şekil 4.3.m



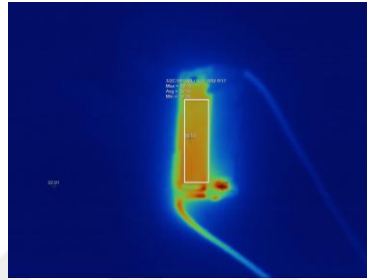
Şekil 4.3.n



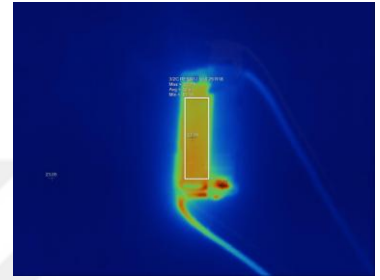
Şekil 4.3.o



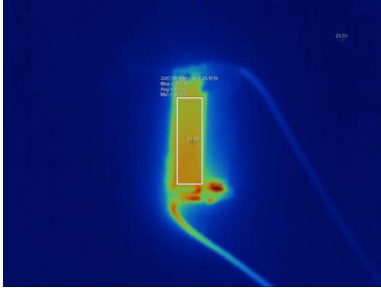
Şekil 4.3.p



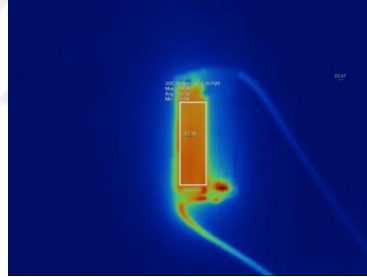
Şekil 4.3.r



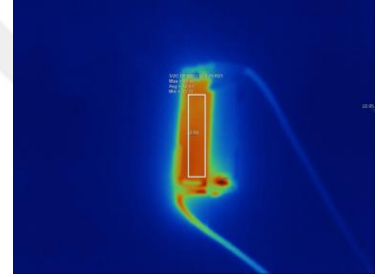
Şekil 4.3.s



Şekil 4.3.t



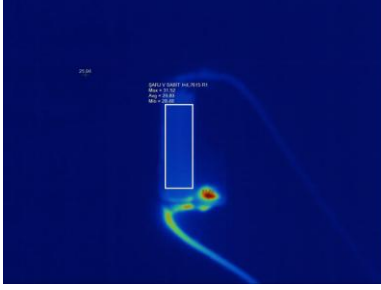
Şekil 4.3.u



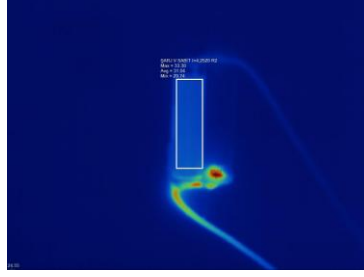
Şekil 4.3.v

Şekil 4.3: 3C/2 akımda şarj – deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.

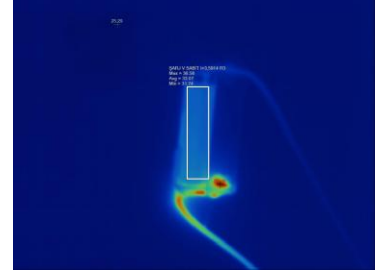
Değişken akım sabit voltaj kullanılarak şarj ve deşarj sırasında alınan ölçümlerden elde edilen termal kamera görüntüleri **Şekil 4.4**'te verilmiştir.



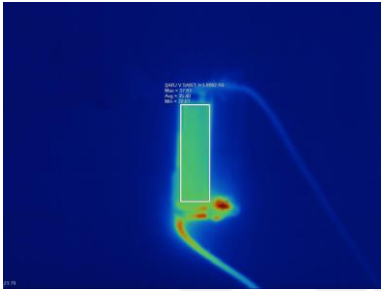
Şekil 4.4.a



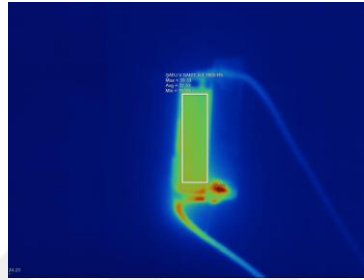
Şekil 4.4.b



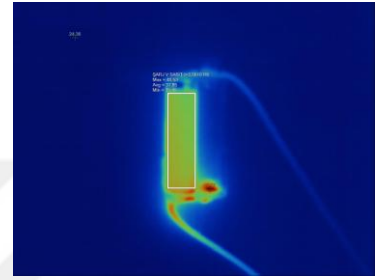
Şekil 4.4.c



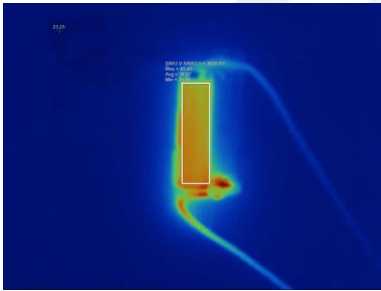
Şekil 4.4.d



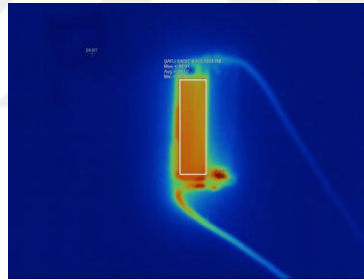
Şekil 4.4.e



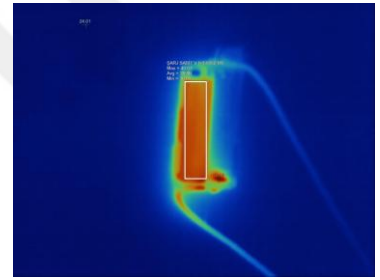
Şekil 4.4.f



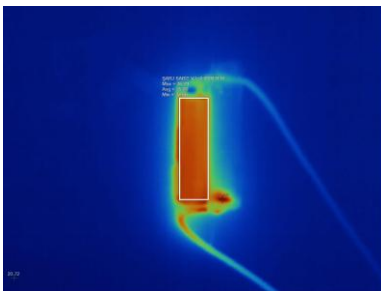
Şekil 4.4.g



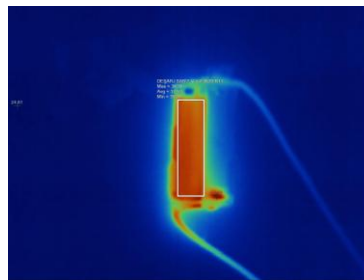
Şekil 4.4.h



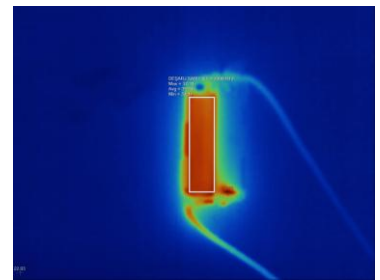
Şekil 4.4.i



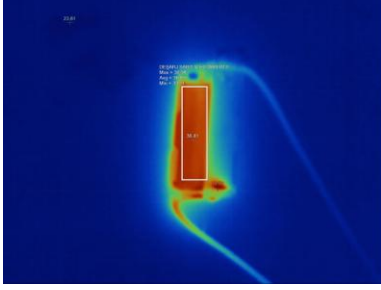
Şekil 4.4.j



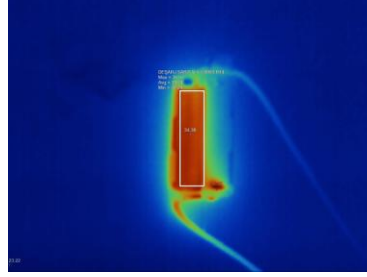
Şekil 4.4.k



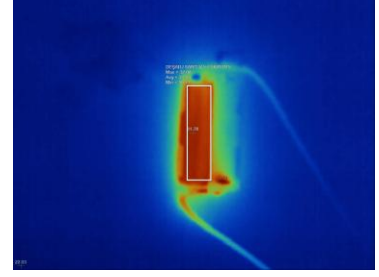
Şekil 4.4.l



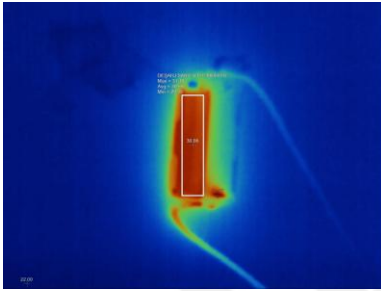
Şekil 4.4.m



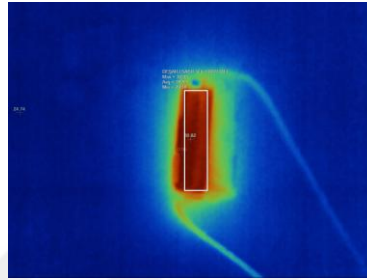
Şekil 4.4.n



Şekil 4.4.o



Şekil 4.4.p



Şekil 4.4.r

Şekil 4.4: Değişken akımda şarj – deşarj sırasında termal kamerada gözlemlenen sıcaklığa bağlı renk değişimleri.

Ölçümlerden elde edilen veriler ve termal kameradan gözlemlenen yüzey sıcaklık değişimlerine bakıldığında pil şarjı dolmaya başladığında sıcaklık artarken, şarj işlemi sonuna doğru sıcaklığın nispeten düşmeye başladığı gözlemlendi.

Termal kamera ile ölçülen pil yüzeyi sıcaklığı minimum, maksimum ve ortalama değerleri tablo haline getirilip grafikleri oluşturuldu.

C/2 akım ile şarj edildiğinde elde edilen veriler **Çizelge 4.1**'te verilmiştir.

Çizelge 4.1: C/2 Şarj olurken sıcaklık ve ölçüm voltajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
2,894	23,45	24,16	23,8
3,6252	23,97	25,67	24,87
3,8033	27,86	29,3	28,69
4,0017	27,8	29,56	28,93
4,2125	27,26	28,63	27,94
4,25	24,55	25,44	25,06

C/2 akım ile deşarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler **Çizelge 4.2**'da verilmiştir.

Çizelge 4.2: C/2 Deşarj olurken sıcaklık ve ölçüm voltajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
3,6889	23,67	25,42	24,83
3,5007	25,61	27,63	26,82
3,3054	28,31	29,79	28,98
3,1008	28,9	30,14	29,51
2,895	29,25	30,95	30,2

2,64	28,17	29,93	29,3
2,5	24,25	25,18	24,63

C akım ile şarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler:

Çizelge 4.3: C Şarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
3,8879	26,16	28,74	27,21
3,9546	27,18	29,14	27,92
4,0042	27,76	31,19	29,46
4,051	28,49	31,83	29,99
4,0996	29,82	33,97	32,48
4,152	32,81	36,44	34,48
4,2023	32,55	35,1	33,88
4,25	32,31	34,91	33,6

C akım ile deşarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler:

Çizelge 4.4: C Deşarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
3,178	32,62	35,52	33,86
3,157	30,28	34,29	32,62
3,1017	31,87	35,35	33,37
3,0016	33,58	36,46	35,2
2,898	33,17	36,94	35,21
2,8004	33,58	36,82	35,37
2,698	33,28	37,62	36,14
2,597	34,82	37,71	36,4

3C/2 akım ile şarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler:

Çizelge 4.5: 3C/2 Şarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
4,25	31,35	34,25	33,25
3,0143	32,66	35,79	34,43
2,9988	33,63	37,76	35,15

2,8735	34,02	39,06	35,8
2,7638	34,42	40,33	36,53

3C/2 akım ile deşarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler:

Çizelge 4.6: 3C/2 akım ile deşarj sırasında pil yüzeyindeki sıcaklık değerleri ve ölçüm volatajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
3,004	35,36	39,84	37,04
2,9765	35,51	39,68	37,22
2,9505	34,66	39,68	37,22
2,9017	36,01	41,98	38,97
2,8438	35,88	43,92	39,2
2,7486	37,93	43,56	41,29
2,6878	38,4	44,93	41,83
2,5799	40,2	44,64	42,7
2,5	41,54	45,39	43,42

3C/2 akım ile reşarj edildiğinde termal kamera görüntülerinden elde edilen veriler **Çizelge 4.7'**de verilmiştir.

Çizelge 4.7: 3C/2 Reşarj sıcaklık ve ölçüm volatajı.

Voltaj	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
4,0528	40,48	45,32	42,94
4,146	38,34	43,8	42,34
4,1992	37,39	44,32	42,19
4,25	40,34	44,24	42,61
4,25	40,63	45,04	43,02
4,25	39,08	44,9	42,92
4,25	41,11	43,82	42,51

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.8'**de verilmiştir.

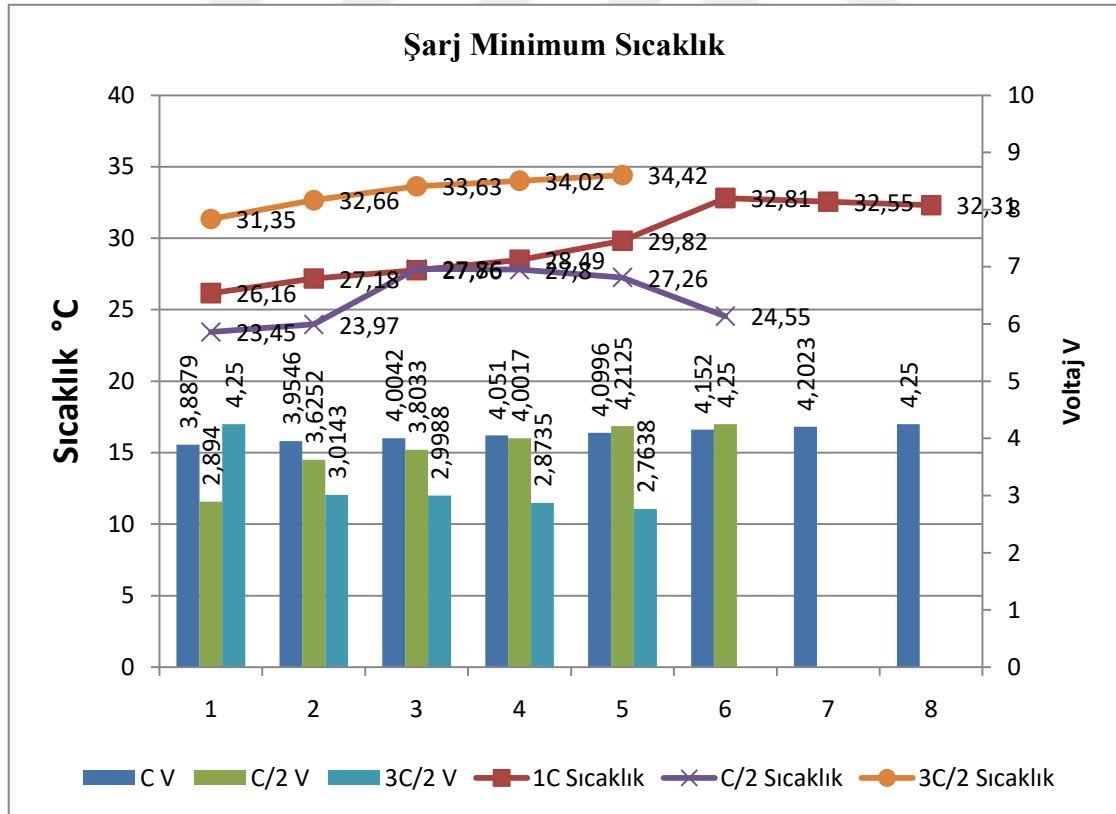
Çizelge 4.8: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minumum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık°C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,8879	26,16	2,894	23,45	4,25	31,35
3,9546	27,18	3,6252	23,97	3,0143	32,66
4,0042	27,76	3,8033	27,86	2,9988	33,63

4,051	28,49	4,0017	27,8	2,8735	34,02
4,0996	29,82	4,2125	27,26	2,7638	34,42
4,152	32,81	4,25	24,55		
4,2023	32,55				
4,25	32,31				

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.

Sıcaklık - voltaj grafiklerinde birincil dikey eksen sıcaklığı (°C), ikincil dikey eksen ölçüm voltajını (V), birincil yatay eksen ise ölçüm sırasını belirtmektedir.



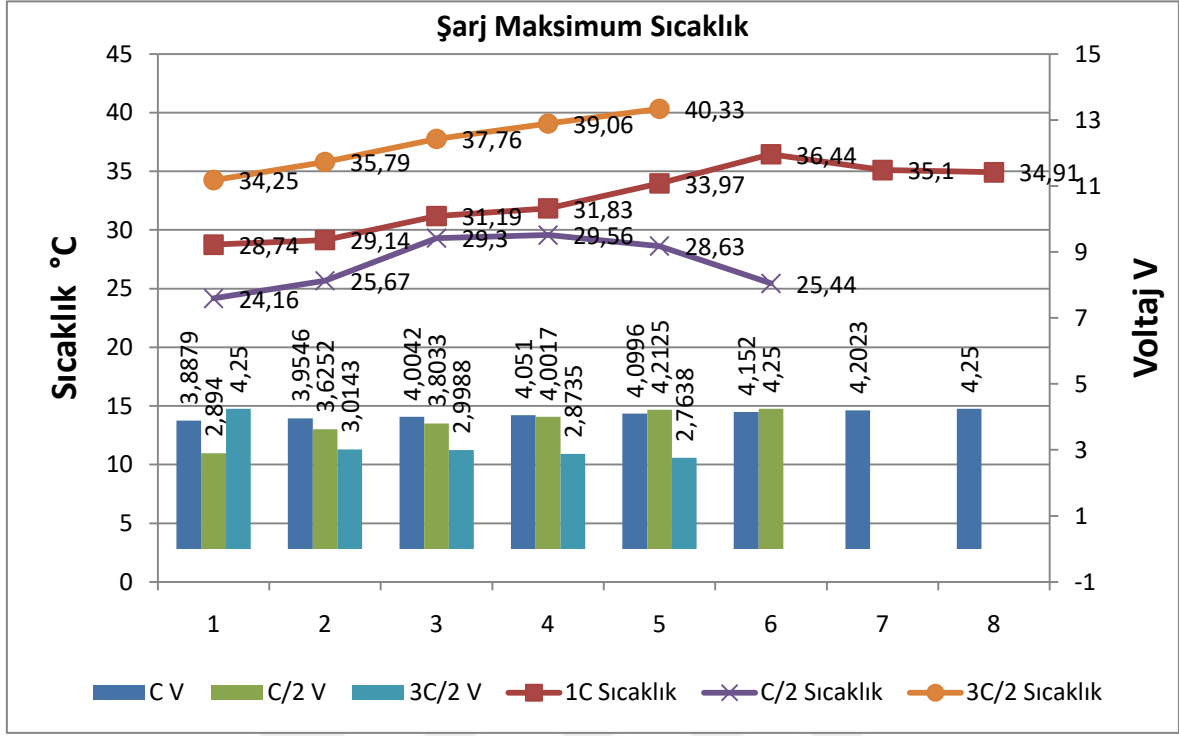
Şekil 4.5: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.9**'te verilmiştir.

Çizelge 4.9: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık°C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,8879	28,74	2,894	24,16	4,25	34,25
3,9546	29,14	3,6252	25,67	3,0143	35,79
4,0042	31,19	3,8033	29,3	2,9988	37,76
4,051	31,83	4,0017	29,56	2,8735	39,06
4,0996	33,97	4,2125	28,63	2,7638	40,33
4,152	36,44	4,25	25,44		
4,2023	35,1				
4,25	34,91				

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.6: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

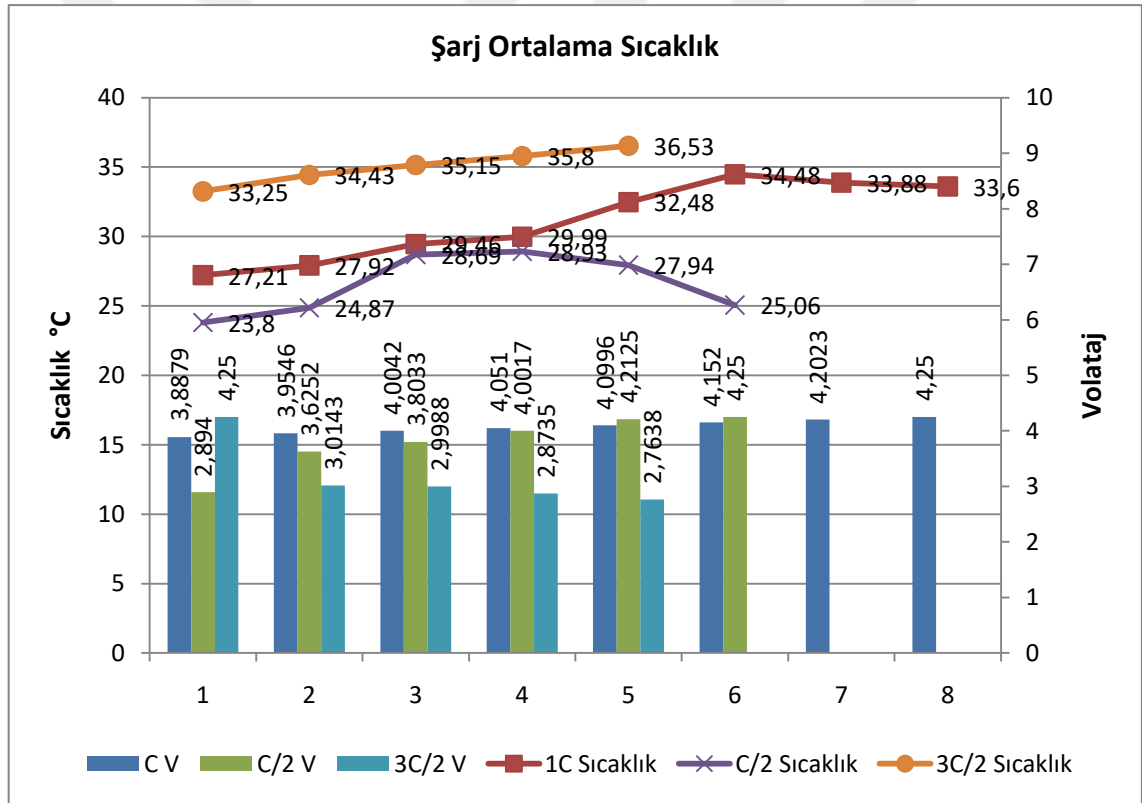
C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerleri **Çizelge 4.10**'te verilmiştir.

Çizelge 4.10: Farklı akım değerlerinde şarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,8879	27,21	2,894	23,8	4,25	33,25
3,9546	27,92	3,6252	24,87	3,0143	34,43
4,0042	29,46	3,8033	28,69	2,9988	35,15
4,051	29,99	4,0017	28,93	2,8735	35,8

4,0996	32,48	4,2125	27,94	2,7638	36,53
4,152	34,48	4,25	25,06		
4,2023	33,88				
4,25	33,6				

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.



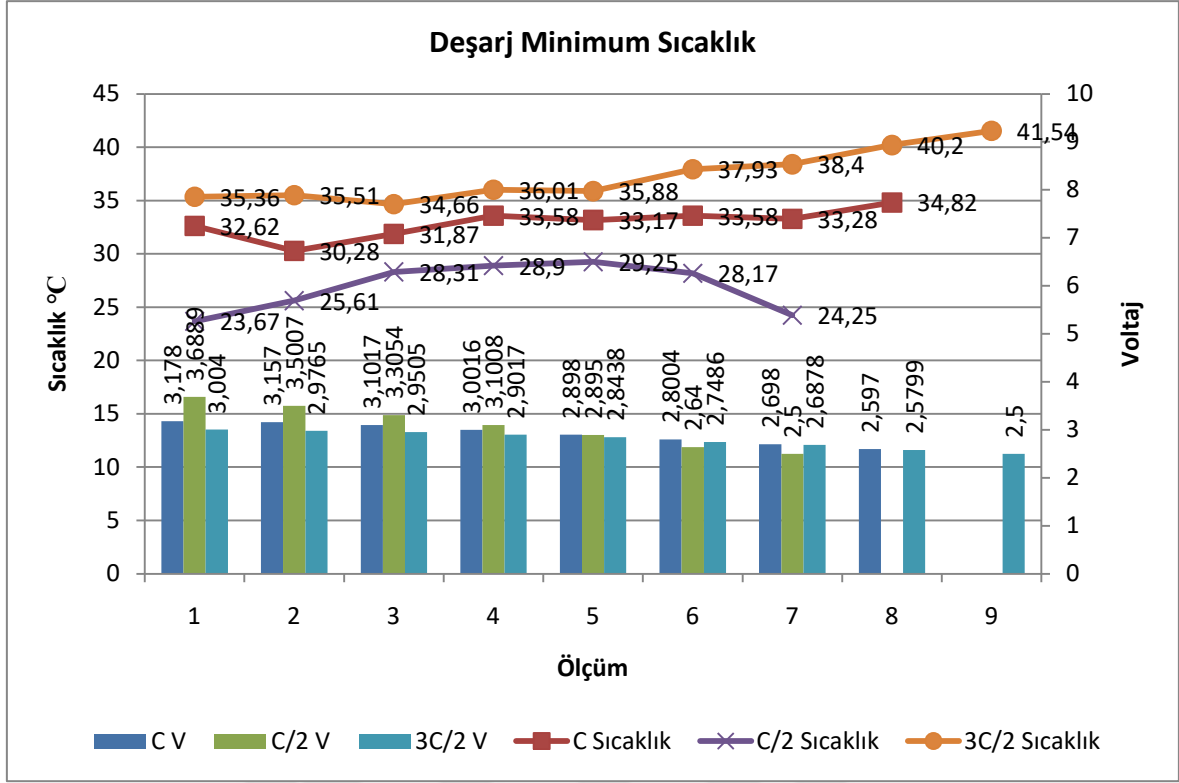
Şekil 4.7: Farklı akımlarda şarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.11**'te verilmiştir.

Çizelge 4.11: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minimum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,178	32,62	3,6889	23,67	3,004	35,36
3,157	30,28	3,5007	25,61	2,9765	35,51
3,1017	31,87	3,3054	28,31	2,9505	34,66
3,0016	33,58	3,1008	28,9	2,9017	36,01
2,898	33,17	2,895	29,25	2,8438	35,88
2,8004	33,58	2,64	28,17	2,7486	37,93
2,698	33,28	2,5	24,25	2,6878	38,4
2,597	34,82			2,5799	40,2
				2,5	41,54

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.8: Farklı akımlarda deşarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

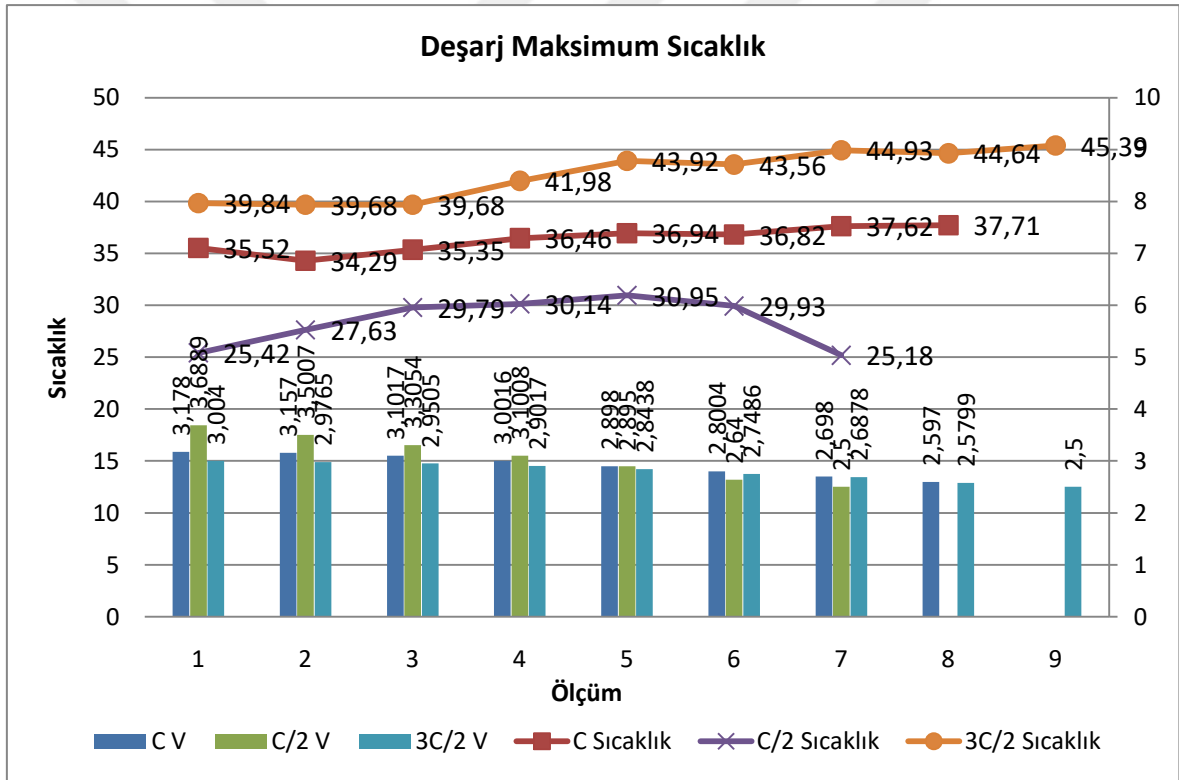
C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.12**'de verilmiştir.

Çizelge 4.12: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık°C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,178	35,52	3,6889	25,42	3,004	39,84
3,157	34,29	3,5007	27,63	2,9765	39,68
3,1017	35,35	3,3054	29,79	2,9505	39,68
3,0016	36,46	3,1008	30,14	2,9017	41,98
2,898	36,94	2,895	30,95	2,8438	43,92

2,8004	36,82	2,64	29,93	2,7486	43,56
2,698	37,62	2,5	25,18	2,6878	44,93
2,597	37,71			2,5799	44,64
				2,5	45,39

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.



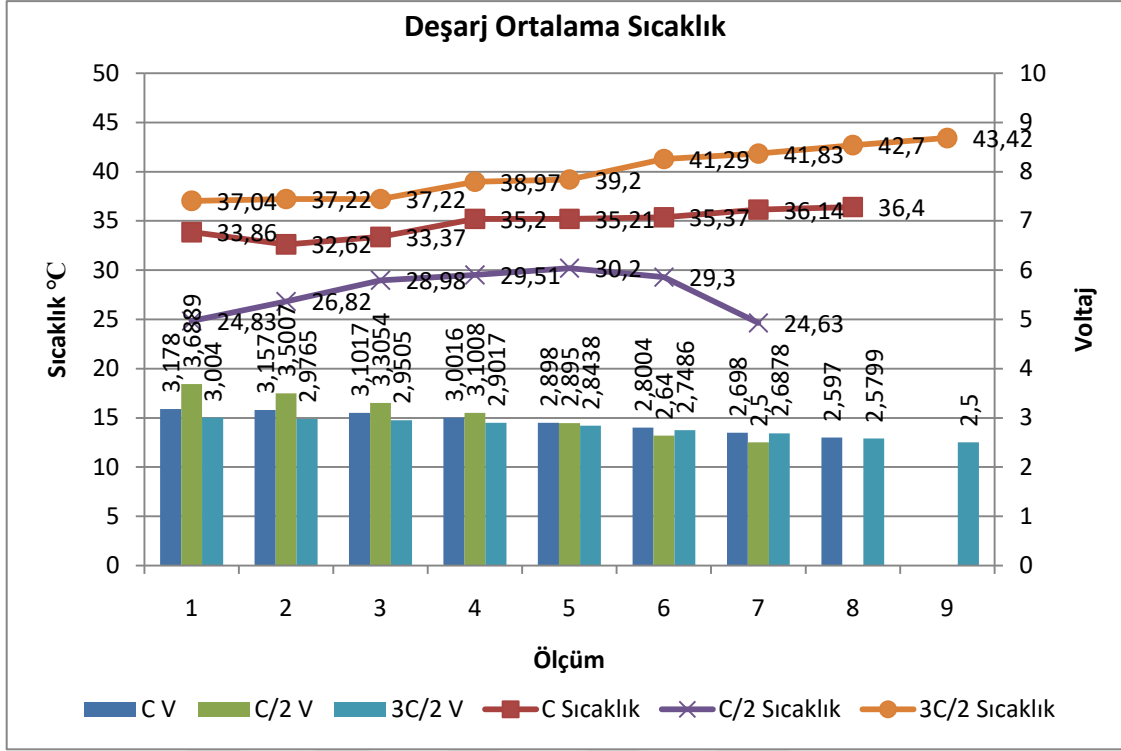
Şekil 4.9: Farklı akımlarda deşarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerleri **Çizelge 4.13**'de verilmiştir.

Çizelge 4.13: Farklı akım değerlerinde deşarj ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,178	33,86	3,6889	24,83	3,004	37,04
3,157	32,62	3,5007	26,82	2,9765	37,22
3,1017	33,37	3,3054	28,98	2,9505	37,22
3,0016	35,2	3,1008	29,51	2,9017	38,97
2,898	35,21	2,895	30,2	2,8438	39,2
2,8004	35,37	2,64	29,3	2,7486	41,29
2,698	36,14	2,5	24,63	2,6878	41,83
2,597	36,4			2,5799	42,7
				2,5	43,42

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin grafiği aşadaki gibidir.



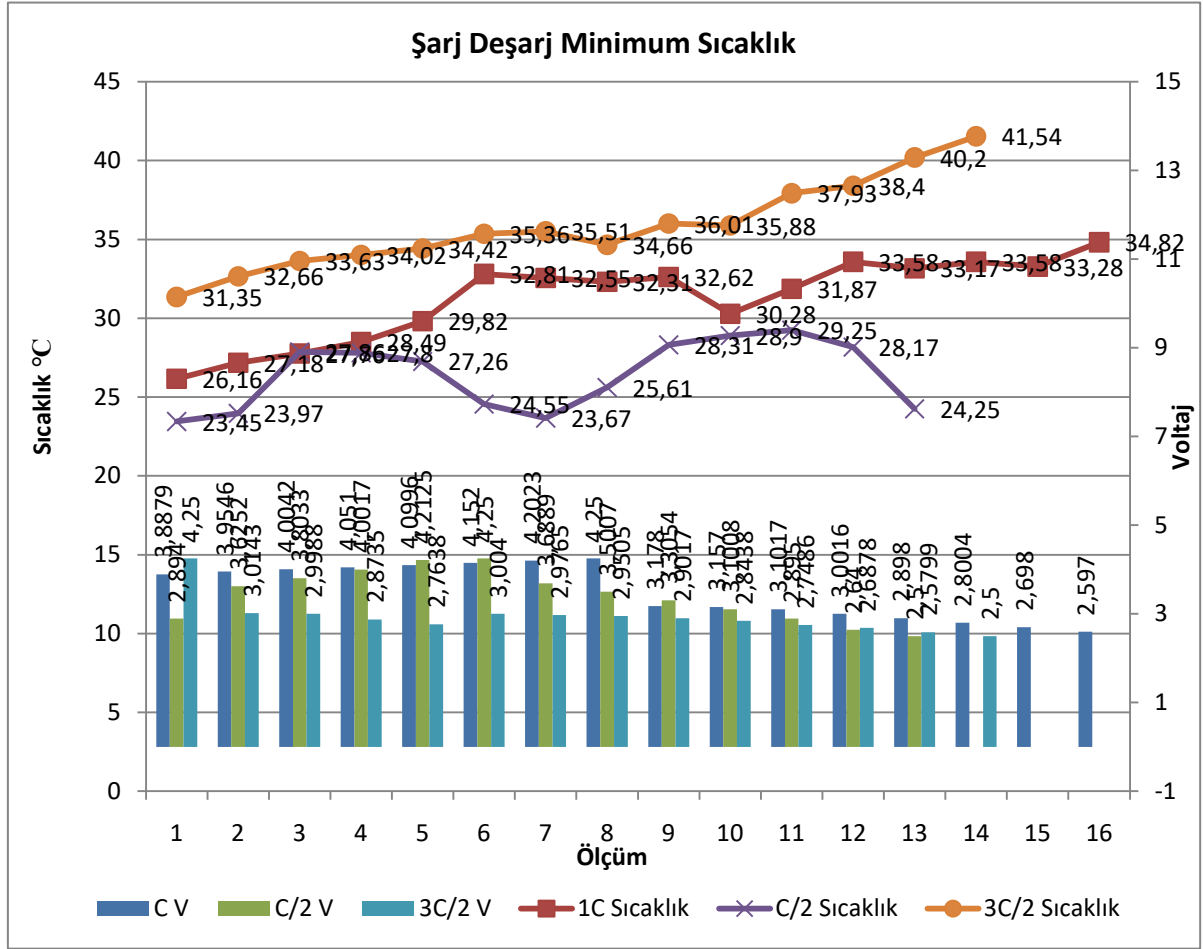
Şekil 4.10: Farklı akımlarda deşarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj - deşarj döngüsü sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.14**'de verilmiştir.

Çizelge 4.14: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki minimum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,8879	26,16	2,894	23,45	4,25	31,35
3,9546	27,18	3,6252	23,97	3,0143	32,66
4,0042	27,76	3,8033	27,86	2,9988	33,63
4,051	28,49	4,0017	27,8	2,8735	34,02
4,0996	29,82	4,2125	27,26	2,7638	34,42
4,152	32,81	4,25	24,55	3,004	35,36
4,2023	32,55	3,6889	23,67	2,9765	35,51
4,25	32,31	3,5007	25,61	2,9505	34,66
3,178	32,62	3,3054	28,31	2,9017	36,01
3,157	30,28	3,1008	28,9	2,8438	35,88
3,1017	31,87	2,895	29,25	2,7486	37,93
3,0016	33,58	2,64	28,17	2,6878	38,4
2,898	33,17	2,5	24,25	2,5799	40,2
2,8004	33,58			2,5	41,54
2,698	33,28				
2,597	34,82				

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj – deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen minimum sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıdaki gibidir.



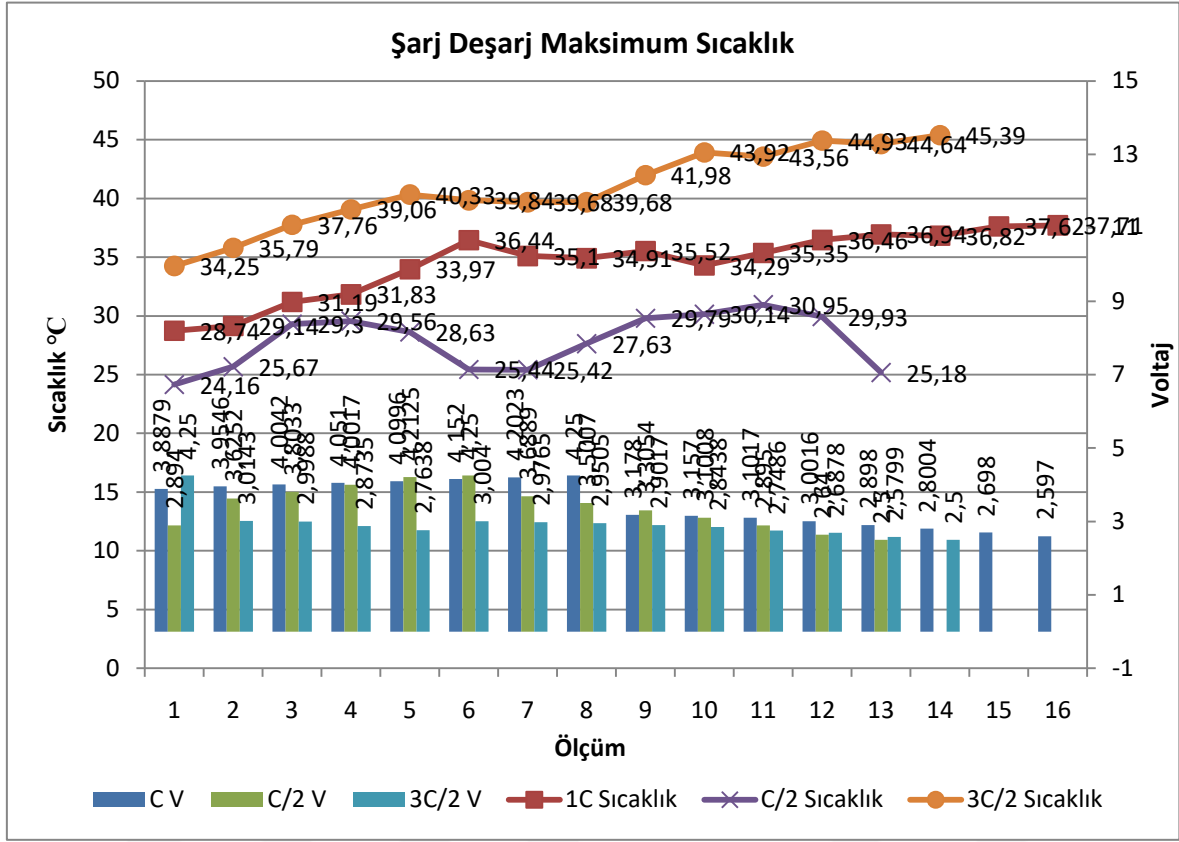
Şekil 4.11: Farklı akımlarda şarj - deşarj olurken pil yüzeyindeki minimum sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj - deşarj döngüsü sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri **Çizelge 4.15'**da verilmiştir.

Çizelge 4.15: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2- Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 – Sıcaklık °C
3,8879	28,74	2,894	24,16	4,25	34,25
3,9546	29,14	3,6252	25,67	3,0143	35,79
4,0042	31,19	3,8033	29,3	2,9988	37,76
4,051	31,83	4,0017	29,56	2,8735	39,06
4,0996	33,97	4,2125	28,63	2,7638	40,33
4,152	36,44	4,25	25,44	3,004	39,84
4,2023	35,1	3,6889	25,42	2,9765	39,68
4,25	34,91	3,5007	27,63	2,9505	39,68
3,178	35,52	3,3054	29,79	2,9017	41,98
3,157	34,29	3,1008	30,14	2,8438	43,92
3,1017	35,35	2,895	30,95	2,7486	43,56
3,0016	36,46	2,64	29,93	2,6878	44,93
2,898	36,94	2,5	25,18	2,5799	44,64
2,8004	36,82			2,5	45,39
2,698	37,62				
2,597	37,71				

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin grafiğı aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.12: Farklı akımlarda şarj - deşarj olurken pil yüzeyindeki maksimum sıcaklık grafiğı ve ölçüm voltajı.

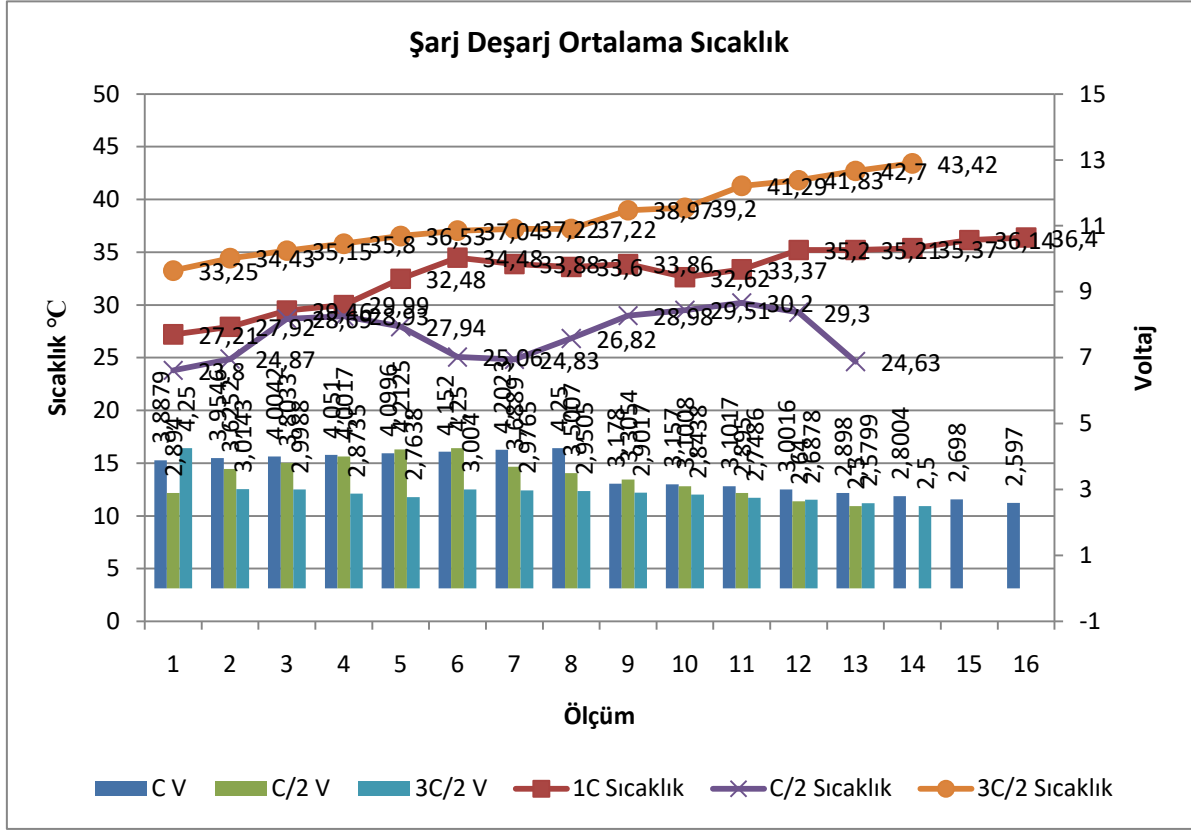
C/2, C, 3C/2 akımlarında şarj - deşarj döngüsü sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerleri **Çizelge 4.16**'de verilmiştir.

Çizelge 4.16: Farklı akım değerlerinde şarj - deşarj döngüsünde ölçüm voltajı ve pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri.

C - Voltaj	C - Sıcaklık °C	C/2 - Voltaj	C/2 - Sıcaklık °C	3C/2 - Voltaj	3C/2 - Sıcaklık °C
3,8879	27,21	2,894	23,8	4,25	33,25
3,9546	27,92	3,6252	24,87	3,0143	34,43

4,0042	29,46	3,8033	28,69	2,9988	35,15
4,051	29,99	4,0017	28,93	2,8735	35,8
4,0996	32,48	4,2125	27,94	2,7638	36,53
4,152	34,48	4,25	25,06	3,004	37,04
4,2023	33,88	3,6889	24,83	2,9765	37,22
4,25	33,6	3,5007	26,82	2,9505	37,22
3,178	33,86	3,3054	28,98	2,9017	38,97
3,157	32,62	3,1008	29,51	2,8438	39,2
3,1017	33,37	2,895	30,2	2,7486	41,29
3,0016	35,2	2,64	29,3	2,6878	41,83
2,898	35,21	2,5	24,63	2,5799	42,7
2,8004	35,37			2,5	43,42
2,698	36,14				
2,597	36,4				

C/2, C, 3C/2 akımlarında deşarj sırasında ölçüm voltajı ve termal kamera görüntülerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin grafiğı aşadaki gibidir.



Şekil 4.13: Farklı akımlarda şarj - deşarj olurken pil yüzeyindeki ortalama sıcaklık grafiği ve ölçüm voltajı.

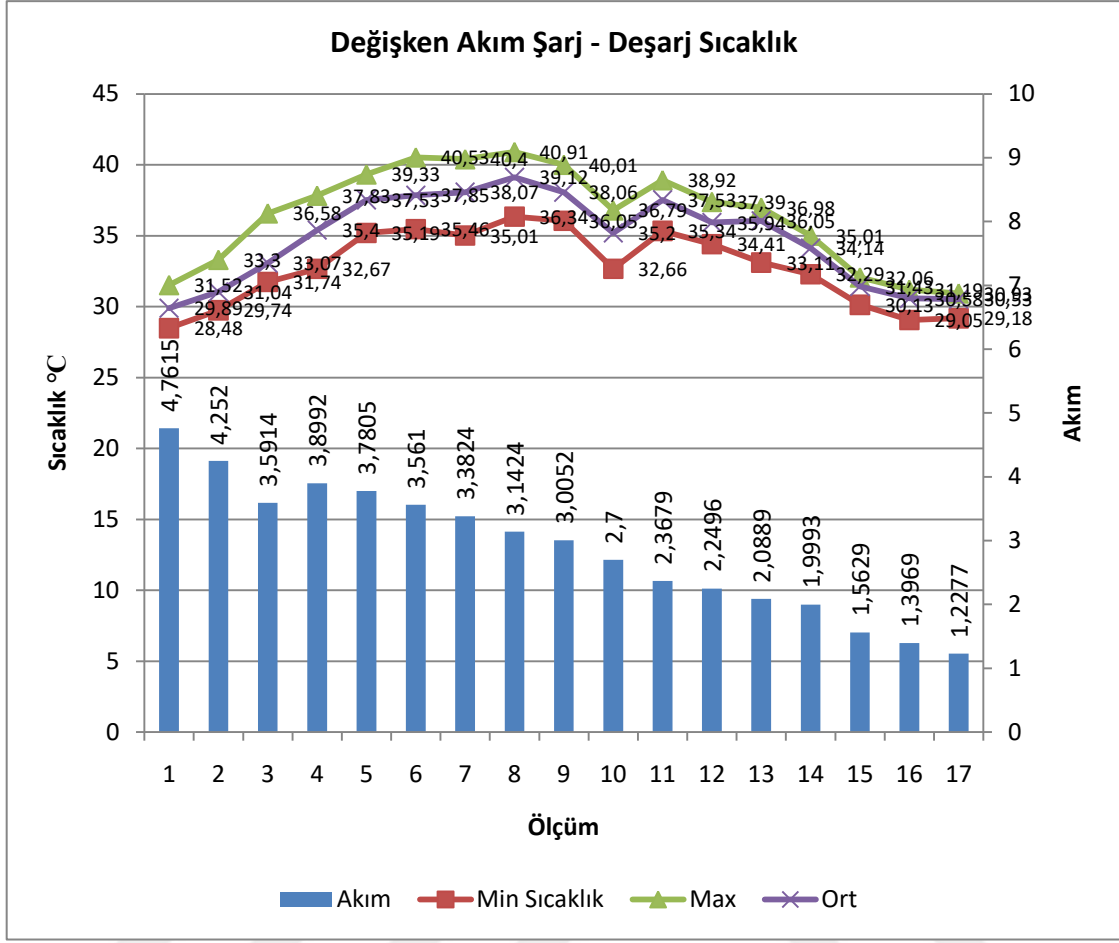
Deneyin son aşamasında değişken akım sabit voltaj ile bir döngü şarj – deşarj sırasında farklı akım değerlerindeki ölçümlerinde gözlemlenen sıcaklık değerleri **Çizelge 4.17**'de verilmiştir.

Çizelge 4.17: Değişken akım sabit voltajda şarj- deşarj sırasında gözlemlenen sıcaklık değerleri.

Akım	Minimum Sıcaklık °C	Maksimum Sıcaklık °C	Ortalama Sıcaklık °C
4,7615	28,48	31,52	29,89
4,252	29,74	33,3	31,04
3,5914	31,74	36,58	33,07

3,8992	32,67	37,83	35,4
3,7805	35,19	39,33	37,53
3,561	35,46	40,53	37,85
3,3824	35,01	40,4	38,07
3,1424	36,34	40,91	39,12
3,0052	36,05	40,01	38,06
2,7	32,66	36,79	35,2
2,3679	35,34	38,92	37,53
2,2496	34,41	37,39	35,94
2,0889	33,11	36,98	36,05
1,9993	32,29	35,01	34,14
1,5629	30,13	32,06	31,43
1,3969	29,05	31,19	30,58
1,2277	29,18	30,93	30,53

Değişken akım sabit voltaj kullanılarak yapılan şarj – deşarj işleminde termal kamera ile pil yüzeyinden oluşan minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerlerinin grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.14: Değişken akım sabit voltajda şarj- deşarj sırasında gözlemlenen sıcaklık değerleri

Gerçekleştirilen ölçümler ve termal görüntüleme analizleri, lityum iyon pilin şarj sürecinde sıcaklık profilinin belirgin bir değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Şarjın başlangıcında, pilin iç direncindeki artışa bağlı olarak Joule ısınması artmış ve buna paralel olarak yüzey sıcaklığı yükselmiştir. Şarj işleminin sonlarına doğru ise, pilin doluluk oranına bağlı olarak iç direncin azalmasıyla birlikte Joule ısınması da azalmış, sonuç olarak yüzey sıcaklığında düşüş gözlemlenmiştir. Aynı şekilde deşarj işlemi sırasında da aynı durum gözlemlenmiştir. Pil deşarj olmaya başladığında pil sıcaklığı artmış, pil doluluk oranına paralel olarak sıcaklıkta da bir düşüş gözlemlenmiştir.

4.2. Araştırmanın Sınırlamaları ve Gelecekteki Araştırma Önerileri

Günlük hayatta kullandığımız pillerin, sabit bir ortamda laboratuvar koşullarında test edilmesiyle gerçek dünya kullanım koşulları arasındaki fark, önemli bir noktadır.

Telefonumuzu sürekli kontrol ederken, bir tablette video izlerken veya bir elektrikli araçla şehir trafiğinde giderken karşılaştığımızda, pil üzerindeki yük sürekli değişir. Bir anda yüksek bir akım çekilirken, bir sonraki anda ise neredeyse hiç akım çekilmeyebilir. Bu durum, pilin iç direnci ve sıcaklığı üzerinde doğrudan etkiler yaratır.

Sabit akımla şarj ve deşarj ise daha kontrollü bir ortamda yapılan bir testtir. Burada, pile sabit bir akım uygulanır ve pilin davranışı bu koşullar altında incelenir. Bu deney pilin temel özelliklerini belirlemek için önemlidir ancak gerçek dünya kullanımını tam olarak yansıtmaz.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nikelce zengin lityum-nikel-manganez-kobalt oksit (NMC) kimyasallı pil şarj –deşarj düzenğinde $C/2$, C ve $3C/2$ akımlarında şarj –deşarj işlemi yapıldı. Isısal değişimleri farklı voltaj değerlerinde termal kamera ile ölçüldü. Termal kamera görüntülerinden pil yüzeyinin minimum, maksimum ve ortalama sıcaklıkları tespit edilip sıcaklık değişimleri not edildi. Elde edilen veriler karşılaştırıldı.

En yüksek sıcaklık artışları, $3C/2$ şarj akımında gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yüksek şarj akımlarının pil içinde daha fazla ısı üretimine neden olduğunu göstermektedir. Termal kamera görüntülerinden elde edilen sıcaklık dağılım haritaları, sıcaklığın pilin merkezi bölgesinde daha yüksek olduğunu ve şarj akımının artmasıyla bu farkın daha belirgin hale geldiğini göstermiştir. $C/2$ şarj akımında ise sıcaklık artışı daha düşük olmuş ve sıcaklık dağılımı daha homojen olmuştur. Bu sonuçlar, daha düşük şarj akımlarının pilin termal stresini azaltarak pil ömrünü uzatabileceğini düşündürmektedir.

Yapılan çalışma, farklı kimyasal özelliklere sahip diğer pillerin aynı akım değerlerinde şarj –deşarj edilip sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması daha doğru kimyasal yapıya sahip pillerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Armand, M.** (1980). " Intercalation Electrode" in Materials for Advanced Batteries. NATO CONFERENCE SERIES, Series VI: Material Science,
- Bagotsky, V. S.** (2011). Fuel cells, batteries, and the development of electrochemistry. *Journal of solid state electrochemistry*, 15, 1559-1562.
- Balakrishnan, N. T., Das, A., Jishnu, N., Raphael, L. R., Joyner, J. D., Ahn, J.-H., Jabeen Fatima, M., & Prasanth, R.** (2021). The Great History of Lithium-Ion Batteries and an Overview on Energy Storage Devices. *Electrospinning for Advanced Energy Storage Applications*, 1-21.
- Blomgren, G. E.** (2016). The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), A5019.
- Bloom, I., Cole, B., Sohn, J., Jones, S. A., Polzin, E. G., Battaglia, V. S., Henriksen, G. L., Motloch, C., Richardson, R., & Unkelhaeuser, T.** (2001). An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of power sources*, 101(2), 238-247.
- Brandt, K.** (1994). Historical development of secondary lithium batteries. *Solid State Ionics*, 69(3-4), 173-183.
- Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J.-M.** (2012). Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. *Nature materials*, 11(1), 19-29.
- Daniel, C., & Besenhard, J. O.** (2012). *Handbook of battery materials*. John Wiley & Sons.
- Doh, C.-H., Ha, Y.-C., & Eom, S.-w.** (2019). Entropy measurement of a large format lithium ion battery and its application to calculate heat generation. *Electrochimica Acta*, 309, 382-391.
- Drake, S., Martin, M., Wetz, D., Ostanek, J., Miller, S., Heinzl, J., & Jain, A.** (2015). Heat generation rate measurement in a Li-ion cell at large C-rates through temperature and heat flux measurements. *Journal of power sources*, 285, 266-273.
- Duan, X., & Naterer, G.** (2010). Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(23-24), 5176-5182.
- Dumé, I.** (2023). *Lithium-ion batteries break energy density record*. Erişim: 15.10.2024 <https://physicsworld.com/a/lithium-ion-batteries-break-energy-density-record/>
- Enache, B., Lefter, E., & Cepisca, C.** (2014). Batteries for Electrical Vehicles: A Review. *Autonomous Vehicles*, 409-429.
- Eshetu, G. G., Grugeon, S., Kim, H., Jeong, S., Wu, L., Gachot, G., Laruelle, S., Armand, M., & Passerini, S.** (2016). Comprehensive insights into the reactivity of electrolytes based on sodium ions. *ChemSusChem*, 9(5), 462-471.
- Fabrizzi, L.** (2019). Strange case of Signor Volta and Mister Nicholson: how electrochemistry developed as a consequence of an editorial misconduct. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(18), 5810-5822.
- Fong, R., Von Sacken, U., & Dahn, J. R.** (1990). Studies of lithium intercalation into carbons using nonaqueous electrochemical cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 137(7), 2009.
- Galvani, L., & Roller, D. H.** (1954). Commentary on the effect of electricity on muscular motion. *American Journal of Physics*, 22(1), 40-40.
- Griffith, K. J., Harada, Y., Egusa, S., Ribas, R. M., Monteiro, R. S., Von Dreele, R. B., Cheetham, A. K., Cava, R. J., Grey, C. P., & Goodenough, J. B.** (2020).

- Titanium niobium oxide: from discovery to application in fast-charging lithium-ion batteries. *Chemistry of Materials*, 33(1), 4-18.
- Gu, W. B., & Wang, C. Y.** (2000). Thermal-electrochemical modeling of battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V.** (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1513-1522.
- Ji, Y., Zhang, Y., & Wang, C.-Y.** (2013). Li-ion cell operation at low temperatures. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(4), A636.
- Jiang, S., & Song, Z.** (2022). A review on the state of health estimation methods of lead-acid batteries. *Journal of power sources*, 517, 230710.
- Jiao, S., Zheng, J., Li, Q., Li, X., Engelhard, M. H., Cao, R., Zhang, J.-G., & Xu, W.** (2018). Behavior of lithium metal anodes under various capacity utilization and high current density in lithium metal batteries. *Joule*, 2(1), 110-124.
- Julien, C., Mauger, A., Vijn, A., Zaghbi, K., Julien, C., Mauger, A., Vijn, A., & Zaghbi, K.** (2016). *Lithium batteries*. Springer.
- Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C.-S.** (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of power sources*, 180(2), 909-916.
- Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C.-S.** (2009). Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery. *Journal of power sources*, 189(1), 841-846.
- Kumar, R., & Chavan, S.** (2022). Thermal Investigation of Cylindrical Lithium-ion Batteries for Different Loading using Experimental and Numerical Techniques. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(12), 120504.
- Kurzweil, P.** (2010). Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of power sources*, 195(14), 4424-4434.
- Lazzari, M., & Scrosati, B.** (1980). A cyclable lithium organic electrolyte cell based on two intercalation electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 127(3), 773.
- Leclanché, G.-L.** (1866). New Form of Galvanic Battery. *Compt. rend*, 83, 54 -56.
- Lewis, G. N.** (1916). The atom and the molecule. *Journal of the American Chemical Society*, 38(4), 762-785.
- Linden, D.** (1995). Handbook of batteries. Fuel and energy abstracts,
- Lu, X., & Anariba, F.** (2014). Fostering innovation through an active learning activity inspired by the Baghdad battery. *Journal of Chemical Education*, 91(11), 1929-1933.
- Luo, Y., Gao, X., Dong, M., Zeng, T., Chen, Z., Yang, M., Huang, Z., Wang, R., Pan, F., & Xiao, Y.** (2023). Exploring the structural properties of cathode and anode materials in Li-ion battery via neutron diffraction technique. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 42(5), 100032.
- Lyu, Y., Wu, X., Wang, K., Feng, Z., Cheng, T., Liu, Y., Wang, M., Chen, R., Xu, L., & Zhou, J.** (2021). An overview on the advances of LiCoO₂ cathodes for lithium-ion batteries. *Advanced Energy Materials*, 11(2), 2000982.
- Mevawalla, A., Shabeer, Y., Tran, M. K., Panchal, S., Fowler, M., & Fraser, R.** (2022). Thermal modelling utilizing multiple experimentally measurable parameters. *Batteries*, 8(10), 147.
- Mizushima, K., Jones, P., Wiseman, P., & Goodenough, J. B.** (1980). Li_xCoO₂ (0 < x < 1): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783-789.

- Nagasubramanian, G.** (2001). Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures. *Journal of applied electrochemistry*, 31, 99-104.
- Nagaura, T.** (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries & Solar Cells*, 9, 209.
- Nakajima, K. S. Y. a. T.** (1987). *Secondary battery*. U. S. Pat.
- None, N.** (2016). *FY2015 Energy Storage R&D Annual Progress Report*.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö.** (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.
- Panchal, S., Gudlanarva, K., Tran, M.-K., Herdem, M. S., Panchal, K., Fraser, R., & Fowler, M.** (2022). Numerical simulation of cooling plate using K-epsilon turbulence model to cool down large-sized graphite/LiFePO₄ battery at high C-rates. *World Electric Vehicle Journal*, 13(8), 138.
- Pavlov, D., Kirchev, A., Stoycheva, M., & Monahov, B.** (2004). Influence of H₂SO₄ concentration on the mechanism of the processes and on the electrochemical activity of the Pb/PbO₂/PbSO₄ electrode. *Journal of power sources*, 137(2), 288-308.
- Rouxel, J., Danot, M., & Bichon, M.** (1971). Les composites intercalaires Na_xTiS₂. Etude générale des phases Na_xTiS₂ et K_xTiS₂. *Bull. Soc. Chim*, 11, 3930-3936.
- Scrosati, B.** (2011). History of lithium batteries. *Journal of solid state electrochemistry*, 15(7), 1623-1630.
- Slater, M. D., Kim, D., Lee, E., & Johnson, C. S.** (2013). Sodium-ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 23(8), 947-958.
- Song, K., Agyeman, D. A., Park, M., Yang, J., & Kang, Y. M.** (2017). High-energy-density metal–oxygen batteries: Lithium–Oxygen batteries vs Sodium–Oxygen batteries. *Advanced Materials*, 29(48), 1606572.
- Srinivasan, R., Carkhuff, B. G., Butler, M. H., & Baisden, A. C.** (2011). Instantaneous measurement of the internal temperature in lithium-ion rechargeable cells. *Electrochimica Acta*, 56(17), 6198-6204.
- Sun, Y., Zhao, W., Wang, X., Gao, M., Yang, X., Zhang, K., Zhao, H., Bai, Y., & Wu, C.** (2022). Progress of carbon and Metal-Based Three-Dimensional materials for Dendrite-Proof and Interface-Compatible lithium metal anode. *Applied Surface Science*, 598, 153785.
- Tarascon, J.** (2016). The Li-ion battery: 25 years of exciting and enriching experiences. *The Electrochemical Society Interface*, 25(3), 79.
- Thomas, K. E., & Newman, J.** (2003). Heats of mixing and of entropy in porous insertion electrodes. *Journal of power sources*, 119, 844-849.
- Trasatti, S.** (1999). 1799–1999: Alessandro Volta's 'Electric Pile'. *Journal of electroanalytical chemistry*, 1(460), 1-4.
- Van den Bossche, P., Vergels, F., Van Mierlo, J., Matheys, J., & Van Autenboer, W.** (2006). SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of power sources*, 162(2), 913-919.
- Volta, A.** (1923). *Le Opere di Alessandro Volta (Vol. II)*. Milano, Ho.
- Wang, X., Wang, X., & Lu, Y.** (2019). Realizing high voltage lithium cobalt oxide in lithium-ion batteries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(24), 10119-10139.
- Whittingham, M. S.** (1978). Chemistry of intercalation compounds: Metal guests in chalcogenide hosts. *Progress in Solid State Chemistry*, 12(1), 41-99.

- Whittingham, M. S.** (2004). Lithium batteries and cathode materials. *Chemical reviews*, 104(10), 4271-4302.
- Wu, B., Yufit, V., Marinescu, M., Offer, G. J., Martinez-Botas, R. F., & Brandon, N. P.** (2013). Coupled thermal–electrochemical modelling of uneven heat generation in lithium-ion battery packs. *Journal of power sources*, 243, 544-554.
- Wu, C., Wu, L., Qiu, C., Yang, J., Yuan, X., Cai, Y., & Shi, H.** (2023). Experimental and numerical studies on lithium-ion battery heat generation behaviors. *Energy reports*, 9, 5064-5074.
- Xiao, Y., Wang, Y., Bo, S.-H., Kim, J. C., Miara, L. J., & Ceder, G.** (2020). Understanding interface stability in solid-state batteries. *Nature Reviews Materials*, 5(2), 105-126.
- Xie, Y., Shi, S., Tang, J., Wu, H., & Yu, J.** (2018). Experimental and analytical study on heat generation characteristics of a lithium-ion power battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 884-894.
- Yazami, R., & Touzain, P.** (1983). A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators. *Journal of power sources*, 9(3), 365-371.
- Yoo, G.-W., Jang, B.-C., & Son, J.-T.** (2015). Novel design of core shell structure by NCA modification on NCM cathode material to enhance capacity and cycle life for lithium secondary battery. *Ceramics International*, 41(1), 1913-1916.
- Yoshino, A.** (2012). The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), 5798-5800.
- Zhang, J., Wu, B., Li, Z., & Huang, J.** (2013). Simultaneous estimation of multiple thermal parameters of large-format laminated lithium-ion batteries. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC),
- Zhang, J., Yang, X.-G., Sun, F., Wang, Z., & Wang, C.-Y.** (2020). An online heat generation estimation method for lithium-ion batteries using dual-temperature measurements. *Applied Energy*, 272, 115262.
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G.** (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 89, 292-308.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İsmail Demir

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Yüzüncüyıl Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü
- **Pedagojik Formasyon:** 2014, İnönü Ünivesitesi, Eğitim Fakültesi

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014 yılından günümüze Malatya Yeşilyurt Belediyesi bünyesinde sınavlara hazırlık kurslarında Matematik Öğretmeni olarak çalışmaktadır.