LI-ION BATARYA HÜCRESİNİN FARKLI DIŞ ORTAM KOŞULLARINDA ISIL DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Enes BAŞAK

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LI-ION BATARYA HÜCRESİNİN FARKLI DIŞ ORTAM KOŞULLARINDA ISIL DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Enes BAŞAK
502238003

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HİBRİD VE ELEKTRİKLİ TAŞITLAR
ANABİLİM DALI

BURSA- 2025

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LI-ION BATARYA HÜCRESİNİN FARKLI DIŞ ORTAM KOŞULLARINDA ISIL DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Enes BAŞAK

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Anabilim Dalı

Danışman Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu tez çalışmasında, lityum-iyon batarya hücresinin düşük ortam sıcaklıklarında (–5 °C, 0 °C, +5 °C) sergilediği ısıl davranışlar deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada kese tipi bir batarya hücresi, sıcaklığı hassas biçimde kontrol edilebilen bir termal kabin içerisine yerleştirilerek belirlenen sıcaklıklarda şarj ve deşarj testleri yapılmıştır. Şarj süreci sabit akım-sabit voltaj (CC-CV) yöntemiyle, deşarj ise sabit akım (CC) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında hücre yüzey sıcaklıkları hem temaslı (K tipi termokupl) sensörlerle hem de termal kamera ile izlenmiştir. Toplanan sıcaklık verileri; zamana, akıma ve voltaja bağlı olarak grafiksel olarak değerlendirilmiş, hücre yüzeyinde konuma bağlı sıcaklık dağılımları yorumlanmıştır. Bulgular, düşük sıcaklıklarda özellikle şarj sürecinde sıcaklık artışının daha belirgin olduğunu, hücrenin merkezinden katoda doğru yayılan bir ısı transferi yaşandığını ve bu durumun iç direnç artışına bağlı geliştiğini göstermektedir. Ayrıca, voltaj eğrilerinde düşük sıcaklıklarda daha erken voltaj düşüşleri ve artan polarizasyon farkları gözlemlenmiştir. Bu çalışma, düşük sıcaklık koşullarında batarya hücrelerinin performansını ve güvenliğini etkileyen parametrelerin anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen veriler, elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemlerinin düşük sıcaklık senaryolarına göre optimize edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Li-Ion batarya, şarj, deşarj, düşük dış ortam sıcaklıkları

2025, xiii +47 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION THERMAL BEHAVIOURS of a LI-ION BATTERY CELL UNDER DIFFERENT AMBIENT CONDITIONS

Enes BAŞAK

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of

Hybrid and Electrical Vehicles

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

In this thesis, the thermal behaviors of lithium-ion battery cells at low ambient temperatures (-5°C, 0°C, +5°C) were experimentally investigated. In the study, a pouch battery cell was placed in a thermal cabin with precisely controlled temperature and charge and discharge tests were performed at the determined temperatures. The charging process was carried out with the constant current-constant voltage (CC-CV) method, and the discharge was carried out with the constant current (CC) method. During the experiments, cell surface temperatures were monitored with both K-type thermocouple and a thermal camera. The collected temperature data were evaluated graphically depending on time, current and voltage, and the temperature distributions depending on the position on the cell surface were interpreted. The findings show that the temperature increase is more pronounced especially during the charging process at low ambient temperatures, that there is a heat transfer spreading from the center of the cell to the cathode, and that this situation develops due to the increase in internal resistance. In addition, earlier voltage drops and increased polarization differences were observed in the voltage curves at low temperatures. This study aims to contribute to the understanding of the parameters that affect the performance and safety of battery cells under low temperature conditions. The data obtained are important for optimizing battery management systems in electric vehicles according to low temperature scenarios.

Key words: Li-Ion battery, charge, discharge, low operating temperatures

2025, xiii +47 pages.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında desteklenen 22AG001 numaralı Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen, yıllardır birlikte çalışmaktan büyük onur duyduğum, bana yalnızca akademik bilgi değil aynı zamanda mühendislik disiplini ve sorumluluk anlayışı kazandıran değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar her koşulda yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle beni daima güçlü kılan sevgili aileme gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, her zaman yanımda duran, sabrı, sevgisi ve desteğiyle bu süreci benim için anlamlı ve değerli kılan Ayşe Betül ARSLAN'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Enes BAŞAK

29/06/2025

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET…….....	viii
ABSTRACT……...	ix
TEŞEKKÜR……...	x
ŞEKİLLER DİZİNİ……	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ…….....	xiii
1. GİRİŞ ……	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI…….....	4
2.1. Lityum-İyon Bataryaların Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi…….	4
2.2. Lityum-İyon Bataryalarda Isı Üretimi ve Termal Davranış……	6
2.3. Dış Ortam Sıcaklığının Batarya Üzerine Etkisi…….……..	7
2.4. Düşük Dış Ortam Sıcaklıklarında Batarya Şarj/Deşarj Çalışmaları……	9
2.4.1. Şarj sürecine etkisi…….……...	10
2.4.2. Deşarj sürecine etkisi……..	10
2.4.3. Literatür Örnekleri……	11
2.5. Literatürde Kullanılan Diğer Deneysel Yaklaşımlar…….……..	11
3. MATERYAL ve YÖNTEM……...	14
3.1. Deney Düzeneği ve Kullanılan Altyapı……	14
3.1.1.Kullanılan kese tipi Li-Ion hücre özellikleri……...……...	14
3.1.2.Deney ekipmanları…….	16
3.2. Deney Planı…...……...	20
3.3. Verilerin Kaydı ve Analizi……	21
4. BULGULAR……...	22
4.1. -5 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları…….	23
4.1.1. Şarja etkisi…….	23
4.1.2. Deşarja etkisi…….	26
4.2 0 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları……...	29
4.2.1. Şarja etkisi……..……...	29
4.2.2. Deşarja etkisi…….	32
4.3. +5 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları……	34
4.3.1. Şarja etkisi……..……...	34
4.3.2. Deşarja etkisi…….	37
4.4. Farklı Sıcaklıkların Karşılaştırması…….	40
5. TARTIŞMA ve SONUÇ…….	42
KAYNAKLAR……	45
ÖZGEÇMİŞ…….....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

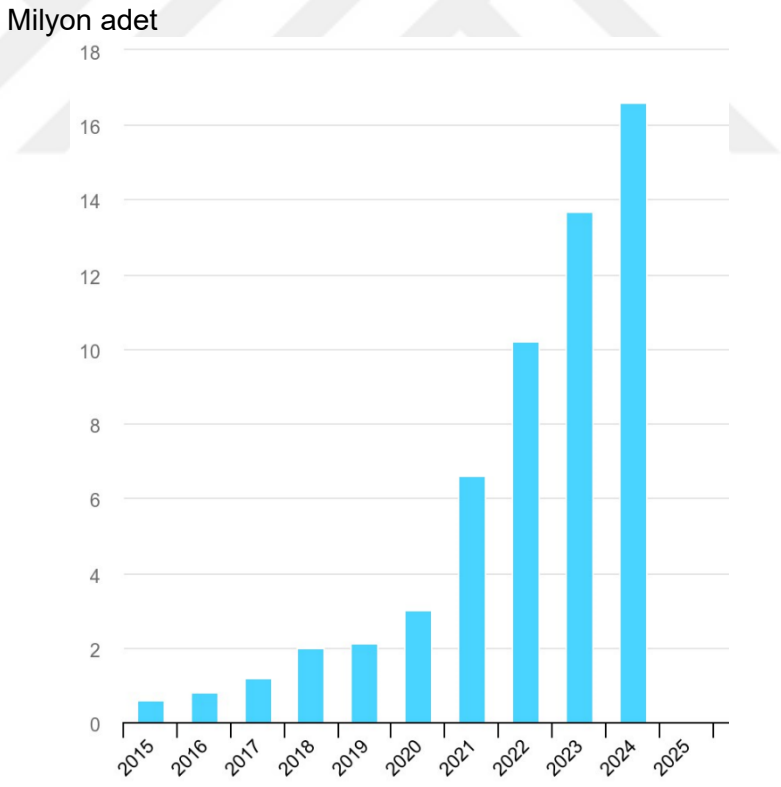
Şekil 1.	2015-2025 yılları arasında satılan elektrikli araçların sayısı……...	1
Şekil 2.	Elektrikli bir araçta batarya yerleşimi…….……..	2
Şekil 3.	Li-Ion batarya hücresinin genel yapısı (Liu vd., 2016)…….	4
Şekil 4.	Deneylerde kullanılan kese tipi batarya hücresi……..……..…….	15
Şekil 5.	Deneylerde kullanılan termal iklimlendirme kabini…….	16
Şekil 6.	Deneylerde kullanılan Testo 890 kamerası……..	18
Şekil 7.	Deneylerde kullanılan çift yönlü güç kaynağı…….	18
Şekil 8.	Çift yönlü güç kaynağının yazılım ekranı……	19
Şekil 9.	Deneylerde kullanılan Hioki LR8450 model cihaz…….	19
Şekil 10.	Batarya hücresi üzerinde sıcaklık sensörleri yerleşimi……	22
Şekil 11.	-5 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri……...	23
Şekil 12.	-5 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri……	25
Şekil 23.	-5 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri……..……	27
Şekil 14.	-5 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği……...	28
Şekil 15.	0 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri……..	30
Şekil 16.	0 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri……	31
Şekil 17.	0 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri…….……..	32
Şekil 38.	0 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği……...	33
Şekil 19.	+5 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel veriler……	35
Şekil 20.	+5 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri…….	36
Şekil 21.	+5 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri……...	38
Şekil 22.	+5 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği……...	39
Şekil 23.	Farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilen deşarj deneylerine ait voltaj-zaman karşılaştırma grafiği……	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 1.	Li-Ion Batarya Hücre Özellikleri……...	15
Çizelge 1.	Deney Protokolü…….	20
Çizelge 2.	Farklı dış ortam koşullarında deşarj esnasında sensörlerin maksimum sıcaklık değerleri……..	41

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarından itibaren artan enerji ihtiyacı ve ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılmasından dolayı çevre kirliliğinin artması ile beraber yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynakların depolanma teknolojisine ilgi artmıştır. Buna bağlı olarak otomotiv sektöründe de fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmak istenmiştir. Günümüze kadar geliştirilmiş batarya ve elektrik motoru teknolojisi otomotiv alanında yerini almıştır ve bu konudaki çalışmalar hız kazanmıştır. Şekil 1.1'de görüleceği üzere elektrikli araçların satışı her geçen yıl artmaktadır. Enerji depolama sistemlerinde ve bu tez çalışmasının da konusu olan elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryalar, sahip oldukları uzun çevrim ömrü, yüksek enerji yoğunluğu, düşük bakım maliyeti gibi avantajları sayesinde otomotiv sektöründe en sık kullanılan batarya tipi olmuştur.



Şekil 4. 2015-2025 yılları arasında satılan elektrikli araçların sayısı (Uluslararası Enerji Ajansı, 2025)

Lityum-iyon bataryaların çalışması çevre koşullarından etkilenir. Etkileyen faktörler ise; çalışma sıcaklığı, şarj ve deşarj akımı, hücre kimyası, iç direnç ve ısı üretimi vb. Bu maddelerden en önemlisi ve en etkili olan ise dış ortam sıcaklığıdır. Dış ortam sıcaklığının düşmesiyle elektrotlar arasındaki iyon hareketliliği azalmaktadır. Elektrokimyasal reaksiyonlar yavaşlamakta ve iç direnç artmaktadır. Bu durum batarya kapasitesinin düşmesine, enerji verimliliğinin azalmasına ve güvenlik sorunlarının gerçekleşme riskini arttırır (Wang ve arkadaşları (2022)). Aynı zamanda ortam sıcaklığına bağlı bir etki olarak, yüksek sıcaklıklarda termal kararsızlığa ve batarya yaşlanmasına sebep olur. Bu durum ise sistem güvenliğine sorun oluşturmaktadır (Safari ve arkadaşları (2011)).



Şekil 2. Elektrikli bir araçta batarya yerleşimi

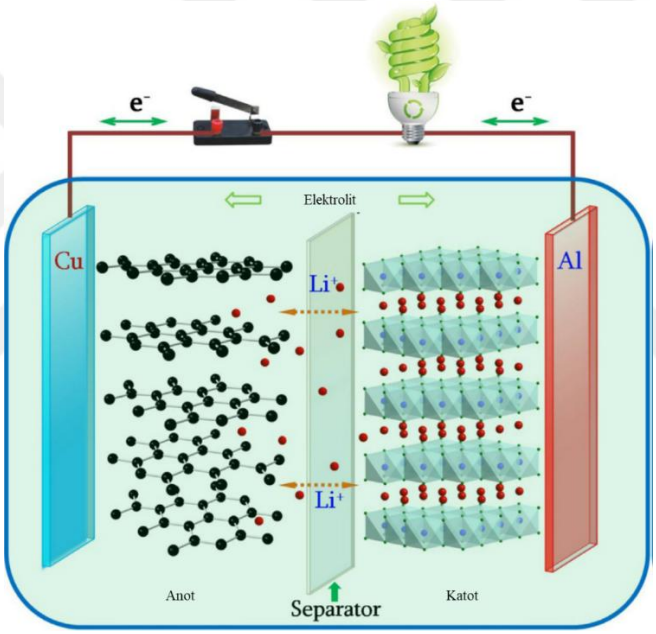
Bu gibi nedenlerden dolayı lityum-iyon bataryaların, farklı dış ortam sıcaklıklarında çalışması sırasında oluşan ısıl ve elektriksel davranışların anlaşılması hem hücre tasarımı hem de batarya yönetim sistemleri (BMS) için kritik öneme sahiptir. Düşük sıcaklık koşullarında bataryaların ısıl karakteristiğinin detaylı olarak incelenmesi, kullanım durumlarında karşılaşılabilecek performans kayıplarının öngörülmesi ve bu kayıpların giderilmesine olanak sağlamaktadır (Wang ve arkadaşları (2022), Safari ve arkadaşları (2011)). Literatürde bu konuda gerçekleştirilmiş çalışmalar, genellikle sıcaklık ile kapasite ilişkisini veya iç direnç değişimlerini ele almakta; ancak ısıl yayılımın doğrudan gözlemlenmesine yönelik çalışmaların sayısı sınırlı kalmaktadır (Wang ve arkadaşları (2022)).

Bundan dolayı, bu tez çalışması; düşük ortam sıcaklıklarında kese tipi (pouch cell) lityum-iyon batarya hücresinin şarj ve deşarj işlemlerinde ortaya çıkan sıcaklıkları deneysel olarak incelemek ve bu koşullar altında bataryanın davranışını hem elektriksel hem de termal açıdan ortaya koymaktadır. Bu hususta dolayı, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlerde bataryaya ait akım-gerilim (I-V) eğrileri, k tipi ısıl çiftlerinden elde edilen sıcaklık verileri ve termal kamera görüntüleri birlikte değerlendirilmiştir. Bu sayede dış yüzey sıcaklık dağılımı detaylı biçimde analiz edilmiştir (Wang ve arkadaşları (2022), Safari ve arkadaşları (2011)). Deneysel çalışmalar, Bursa Uludağ Üniversitesine bağlı BATEG (Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu) altyapısı kullanılarak yürütülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Lityum-İyon Bataryaların Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi

Lityum-iyon bataryalar, günümüzde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara, uzay uygulamalarından enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir alanda tercih edilen enerji depolama teknolojilerindendir. Bu batarya hücreleri hem hacim hem de ağırlık açısından yüksek enerji yoğunluğu sunmaları, uzun çevrim ömrüne sahip olmaları ve hafif olmaları sayesinde alternatiflerine göre daha avantajlıdır (Zhang, 2006).



Şekil 3. Li-Ion batarya hücresinin genel yapısı (Liu vd., 2016)

Şekil 3'te görüleceği üzere bir lityum-iyon hücresi dört ana bileşenden oluşur: anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot), elektrolit ve ayırıcı (separator). Şarj ve deşarj işlemleri, bu yapılar arasında gerçekleşen lityum iyonu geçişleri üzerinden sağlanır.

Anot (Negatif Elektrot): Genellikle grafit bazlı malzemelerden oluşur. Lityum iyonları şarj sırasında buraya depolanır.

Katot (Pozitif Elektrot): $LiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$ ve NMC gibi aktif malzemelerden oluşur. Deşarj sırasında lityum iyonları buradan anoda doğru geçer.

Elektrolit: Genellikle $LiPF_6$ çözeltisi gibi organik çözücüler içinde çözünmüş lityum tuzları içerir. İyon iletimini sağlar fakat elektron geçişine izin vermez.

Ayırıcı (Seperator): Anot ve katot arasında fiziksel ayrım sağlayarak kısa devreyi engeller. Gözenekli yapısı sayesinde iyon geçişine imkan sağlar.

Şarj ve deşarj süreçlerinde kullanılan önemli bir parametre de C oranı (C-rate) olarak adlandırılır. C oranı, bir bataryanın kapasitesine göre ne kadar hızlı şarj edildiğini veya deşarj edildiğini belirtir. 1C, bataryanın tam kapasitesini 1 saatte boşaltacak (ya da dolduracak) bir akım anlamına gelir. C oranı arttıkça hücre daha hızlı şarj veya deşarj olur. Aynı zamanda ısı üretimi, iç direnç ve kapasite kaybı gibi etkiler de artar. Bu nedenle C oranı, batarya sistemlerinin hem tasarımında hem de güvenli kullanımında önemli bir parametredir (Zhang, 2006).

Lityum iyonlarının anot yüzeyinde gömülmesini sağlayan ve bataryanın uzun çevrim ömrünü destekleyen önemli yapılardan biri de SEI (Solid Electrolyte Interphase) tabakasıdır. SEI, anot ile elektrolit arasındaki ilk birkaç şarjda oluşan ince bir ara tabakadır. Lityum iyonlarının geçişine izin verirken, elektrolit parçalanmasını önler ve elektron akışını engelleyerek hücrenin iç reaksiyonlarını sınırlar. Ancak zamanla kalınlaşarak iç direnci artırabilir ve kapasite kaybına neden olabilir (Liao, 2012).

Bataryanın çalışması sırasında, şarj sürecinde harici enerji kaynağından sağlanan elektronlar dış devre üzerinden anoda ulaşırken, lityum iyonları katottan ayrılarak elektrolit aracılığıyla anoda göç eder. Deşarj sürecinde ise bu süreç tersine döner: iyonlar anottan katoda dönerken, elektronlar dış devreden akarak yükü besler.

Çalışma sıcaklığı bu süreçlerin tamamını etkiler. Özellikle iyon difüzyonu, SEI (Solid Electrolyte Interphase) tabaka oluşumu ve iç direnç değerleri sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. (Liao, 2012), $LiFePO_4$ bazlı hücrelerde sıcaklık değişimlerinin şarj-deşarj davranışına etkilerini incelediği çalışmasında, düşük sıcaklıklarda iyon mobilitesinin azaldığını ve bu nedenle kapasite veriminin düştüğünü belirtmiştir. Aynı çalışmada, sıcaklık arttıkça reaksiyon kinetiğinin hızlandığı ancak aşırı sıcaklıkların hücre güvenliğini tehlikeye attığı vurgulanmıştır.

Özellikle –10 °C'nin altına düşen sıcaklıklarda, lityum iyonlarının elektrot malzemelerine difüzyonu zorlaştığı için lityasyon/delityasyon süreçleri yavaşlamakta ve bu da hem

kapasite azalmasına hem de zararlı lityum birikimlerine yol açmaktadır. (Belgibayeva, 2021), bu bağlamda düşük sıcaklıkta oluşan “lithium plating” olayının, batarya ömrünü kısaltan kritik bir mekanizma olduğunu vurgulamaktadır.

2.2 Lityum-İyon Bataryalarda Isı Üretimi ve Termal Davranış

Lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli çalışması, yalnızca elektrokimyasal verimlilikleriyle değil, aynı zamanda iç ve dış ısı üretimiyle de doğrudan ilişkilidir. Bataryanın şarj ve deşarj süreçlerinde oluşan ısı, hücrenin iç yapısında biriken enerjinin bir parçası olarak ortaya çıkar ve özellikle yüksek akım değerlerinde veya dış ortam sıcaklığı ekstrem seviyelere ulaştığında ciddi sonuçlar doğurabilir (Zhang, 2006).

Isı üretimi, batarya içinde iki ana kaynaktan kaynaklanır:

Reaksiyon Isısı (Entalpi ısısı): Elektrokimyasal reaksiyonlardan doğan endotermik veya ekzotermik ısıdır.

Joule Isısı (Direnç kaynaklı ısı): Akım geçişi sırasında hücrenin iç direnci nedeniyle üretilen ısıdır.

İç direnç; elektrotların, elektrolitin ve SEI tabakasının özelliklerine bağlı olarak şekillenir. Özellikle düşük sıcaklıklarda elektrolitin viskozitesinin artması ve iyon hareketliliğinin azalması, Joule ısısını artırır. Bu da lityum-iyon bataryaların düşük sıcaklıkta hem daha fazla ısınmasına hem de performansının düşmesine neden olur (Belgibayeva, 2021).

Wang ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, farklı ortam sıcaklıklarında (0 °C, 25 °C, 45 °C) bataryaların ısıl yanıtları incelenmiş ve hem ortam sıcaklığı hem de uygulanan akımın batarya yüzey sıcaklığı üzerinde ciddi etkiler oluşturduğu gösterilmiştir. Özellikle düşük sıcaklıkta daha yüksek bir iç direnç oluştuğu için, deşarj esnasında hücre dışı sıcaklık artışının geciktiği ancak iç ısı birikiminin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Sıcaklık artışının önemli sonuçlarından biri de termal kaçak (thermal runaway) riskidir.

Thermal runaway, batarya içinde başlayan ısı artışının, hücre içinde daha fazla reaksiyonu tetikleyerek kontrolsüz şekilde sıcaklığın yükselmesi ve yangın/patlama gibi olaylara yol açmasıdır. Bu durum, özellikle hücre sıcaklığı 80–120 °C aralığını geçtiğinde kritik hale

gelir. Yangınlar genellikle metalik lityumun veya yanıcı elektrolitlerin tutuşmasıyla başlar (Wang ve arkadaşları, 2012).

Bu bağlamda, bataryaların sadece nominal voltaj ve kapasite değerlerine göre değil, aynı zamanda termal performanslarına göre de değerlendirilmesi gerekir. Isıl davranışın izlenmesi ve kontrolü için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir:

-Termal kamera ile yüzey sıcaklığı haritalama,

-Yerleştirilen sıcaklık sensörleriyle gövde içi sıcaklık takibi,

-Matematiksel modelleme ile ısı dağılımı simülasyonu.

Narvaez ve arkadaşları, (2019) tarafından geliştirilen mikrokanal tabanlı soğutma sistemlerinin termal yönetimdeki potansiyeli bu anlamda önemlidir. Mikrokanallar aracılığıyla batarya modüllerinden ısı hızlı bir şekilde uzaklaştırılabilir, bu da özellikle yoğun akımla çalışan sistemlerde ısıl dengeyi sağlayarak hücre güvenliğini artırır.

Sonuç olarak, lityum-iyon bataryalarda sıcaklık kontrolü yalnızca performans artışı için değil, aynı zamanda güvenli çalışma sınırlarının korunması için de kritik öneme sahiptir. Dış ortam sıcaklığının kontrol altında olmadığı uygulamalarda (örneğin elektrikli araçlar, dış ortamda çalışan sistemler), bataryaların ısı üretim profili dikkatle analiz edilmeli ve gerekli soğutma çözümleriyle desteklenmelidir.

2.3 Dış Ortam Sıcaklığının Batarya Üzerine Etkisi

Dış ortam sıcaklığı, lityum-iyon bataryaların kapasite, iç direnç, enerji verimliliği ve ömür gibi temel performans parametreleri üzerinde doğrudan etkilidir. Hem yüksek hem de düşük sıcaklık koşulları, batarya sistemlerinde önemli sapmalara yol açmakta ve hücre davranışlarını kararsız hale getirmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda batarya performansı ciddi ölçüde düşmekte; bu da elektrikli araçlarda, taşınabilir cihazlarda ve dış mekânda kullanılan enerji sistemlerinde sınırlayıcı bir faktör haline gelmektedir (Zhang, (2006)).

Batarya performansını etkileyen dış sıcaklık, doğrudan şu fiziksel süreçlere etki eder:

İyon difüzyonu ve elektrot tepkime kinetiği: Sıcaklık düştükçe iyonların elektrolit içindeki hareketliliği azalır ve elektrotlar arası geçiş zorlaşır.

İç direnç (impedans): Düşük sıcaklıklarda elektrolit viskozitesi artar, iletkenlik azalır ve iç direnç yükselir.

SEI tabakası davranışı: Düşük sıcaklıklarda SEI (solid electrolyte interphase) daha geçirimsiz hale gelir ve anotta lityum birikimi (lithium plating) riskini artırır.

Kapasite kaybı: Deşarj sürecinde elektrotlar yeterince iyon alamadığı için kapasite düşer.

Şarj verimsizliği: Şarj esnasında lityum iyonlarının interkalasyonu yavaşladığı için lityum metali yüzeyde birikebilir.

Chen ve arkadaşları, (2022), düşük sıcaklık koşullarında yapılan deneylerde, bataryaların performans bozulmasının hem yüzey sıcaklıklarına hem de iç yapıya bağlı olduğunu göstermiştir. Mikroskobik gözlemlerle, düşük sıcaklığa maruz kalan elektrotların çatlama ve SEI deformasyonu gibi yapısal hasarlara uğradığı tespit edilmiştir. Bu, yalnızca anlık performans düşüşüne değil, aynı zamanda uzun vadeli kapasite kaybına da neden olmaktadır.

Jaguemont ve ark. (2016), elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların –20 °C altında ciddi şekilde verim kaybına uğradığını ve bu koşullarda kullanılacak sistemlerde ön ısıtma veya termal izolasyon gibi çözümlerin zorunlu olduğunu belirtmiştir. Aynı şekilde Belgibayeva, (2021), 0 °C altında şarj edilen bataryalarda SEI tabakasının geçirimsiz hale geldiğini, bunun da lityum iyonlarının anot içine geçmesini engellediğini ve lityum plating riskini artırdığını göstermiştir.

Aris & Shabani (2017), -15 °C ile +25 °C arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleştirdiği deneylerde, düşük sıcaklıklarda bataryaların kapasitesinde %20'ye varan düşüş ve iç dirençte çarpıcı artış gözlemlemiştir. Ayrıca sıcaklık düşüşüne paralel olarak hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımının homojenliğinin bozulduğu ve bu nedenle bazı bölgelerde lokal aşırı soğuma/kızışma oluştuğu tespit edilmiştir.

Ning ve ark. (2004), yüksek akım ve düşük sıcaklık kombinasyonunun batarya ömrü üzerindeki etkisini incelemiş ve çevrim sayısı arttıkça kapasite düşüşünün hızlandığını raporlamıştır. Bu çalışmada, özellikle soğuk ortamlarda yüksek C oranlarıyla yapılan deşarjların SEI yapısını bozarak anot yüzeyinde lityum metal birikimi oluşturduğuna dikkat çekilmiştir.

Özetle, düşük sıcaklık ortamlarında batarya hücrelerinin çalışması sırasında;

- Kapasite düşüşü,
- İç direnç artışı,
- Tepkime yavaşlaması,
- Lityum plating,
- Termal dengesizlik gibi sorunlar ortaya çıkmakta ve bu da sistem performansını doğrudan sınırlamaktadır.

Bu etkilerin kontrol altına alınabilmesi için ya hücre tasarımında sıcaklık adaptasyonu yapılmalı ya da çevresel olarak termal yönetim sistemleri kullanılmalıdır. Bu bağlamda termal kabin içi testler, dış ortam sıcaklıklarının etkisini sistematik şekilde analiz etmek için güvenilir bir yöntem sunmaktadır.

2.4 Düşük Dış Ortam Sıcaklıklarında Batarya Şarj/Deşarj Çalışmaları

Lityum-iyon bataryaların düşük sıcaklık koşullarında gösterdiği şarj ve deşarj davranışları, batarya sistemlerinin hem verimliliğini hem de güvenliğini belirleyen temel parametrelerdendir. Çoğu ticari Li-ion hücre, optimum performans için 20–40 °C aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu aralığın altına inildiğinde, bataryanın şarj-deşarj süreçleri çeşitli fiziksel ve kimyasal sınırlamalara takılır. Özellikle -10 °C ve altı sıcaklıklarda, lityum iyonlarının elektrot malzemelerine geçişi yavaşlamakta, iç direnç artmakta ve buna bağlı olarak hem kapasite hem de enerji verimi belirgin şekilde düşmektedir.

2.4.1 Şarj sürecine etkisi

Düşük sıcaklıkta şarj işlemi, batarya güvenliği açısından en kritik konudur. Anot yüzeyinde iyonların yeterince hızlı interkale olamaması nedeniyle, iyonlar elektronlarla yüzeyde birleşerek metalik lityum (Li plating) oluşturur. Bu durum, bir yandan aktif lityum kaybı nedeniyle kapasiteyi azaltırken, diğer yandan hücre içi kısa devre riskini artırır Belgibayeva (2021), Jaguemont ve ark. (2016).

Belgibayeva (2021)çalışmasında, 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda şarj edilen hücrelerde bu riskin açıkça arttığını ve sürekli çevrimde bu metalik tabakanın kalıcı hasara neden olduğunu bildirmiştir.

Jaguemont ve ark. (2016) ise düşük sıcaklıklarda kullanılan araç bataryalarında, bu metalik birikimin zamanla dendritik yapılara dönüşerek separator katmanına kadar ilerlediğini ve potansiyel olarak termal kaçak (thermal runaway) durumuna zemin hazırladığını vurgulamaktadır.

2.4.2 Deşarj sürecine etkisi

Deşarj esnasında düşük sıcaklığın etkisi daha çok kapasite ve enerji çıkışı üzerinden ortaya çıkar. Elektrotlar arası iyon difüzyonu yavaşlar, SEI tabakası daha geçirimsiz hale gelir ve elektrolitin iletkenliği düşer. Aris ve Shabani (2017) , –15 °C'de gerçekleştirilen deşarj deneylerinde batarya kapasitesinde %20–25 arası azalma gözlemlemiş; buna ek olarak iç dirençte belirgin bir artış olduğunu raporlamıştır. Bu durum, özellikle ani yüksek güç ihtiyacının olduğu elektrikli araç uygulamalarında performans kaybına neden olur.

Ning ve ark. (2004), düşük sıcaklık koşullarında yüksek deşarj oranları (high C-rate) uygulandığında, anot yüzeyinde iyon dengesizliği oluştuğunu ve bu dengesizliğin SEI tabakasında bozulma ve aktif malzeme kaybı yarattığını belirtmiştir. Bu, kapasite düşüşünün kalıcı hale gelmesinde etkili bir faktördür.

2.4.3 Literatür örnekleri

Alipour ve ark. (2023), yüksek kapasiteli pouch hücreleri -20 °C ila 40 °C arasında test ederek, düşük sıcaklıklarda özellikle şarj işlemi sırasında verimin hızlı düştüğünü, ancak deşarj performansının da sıcaklıkla birlikte kademeli olarak azaldığını göstermiştir. Çalışmada, –10 °C'de şarj süresinin normal sıcaklıklara göre %50 daha uzun sürdüğü ve bu sırada hücre iç sıcaklığının, dış ortamdan izole biçimde yükseldiği gözlemlenmiştir.

Zhang, (2006), ticari $LiCoO_2$ temelli hücreleri kullanarak yaptığı çalışmada, düşük sıcaklığın neden olduğu kinetik yavaşlamanın hem elektrot hem de elektrolit tarafında aynı anda gerçekleştiğini, bu yüzden hem şarj hem de deşarj süresinin uzadığını belirtmiştir.

Düşük sıcaklık koşullarında şarj ve deşarj işlemleri:

- Hücre içi kinetik süreçleri yavaşlatır,
- Elektrot/elektrolit arayüzünde potansiyel farkını artırır,
- Kapasite ve enerji verimliliğinde belirgin düşüşe neden olur,
- Güvenlik riski oluşturan lityum birikimini tetikler.

Bu nedenle dış ortam sıcaklığının kontrol edilemediği sistemlerde ön ısıtma, pasif/aktif ısıl yönetim, düşük C-rate kullanımı ve özel elektrolit tasarımı gibi stratejiler önerilmektedir.

2.5 Literatürdeki Kullanılan Diğer Deneysel Yaklaşımlar

Lityum-iyon bataryaların düşük sıcaklık koşullarındaki davranışlarını inceleyen çalışmalarda, sadece sıcaklık ölçümüyle sınırlı kalınmamış; aynı zamanda hücre performansı, iç direnç, kapasite düşüşü ve termal denge gibi parametreleri de analiz eden farklı deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, batarya sistemlerinin gerçek kullanım senaryolarına daha yakın koşullarda test edilmesine olanak sağlamaktadır.

Çoğu çalışmada, farklı C-rate değerlerinde kapasite ölçümü yapılarak sıcaklığın kapasite üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu testlerde batarya, sabit sıcaklıkta sabit akımla (örneğin 0.5C, 1C) tamamen şarj ve deşarj edilir ve ardından çıkarılan kapasite hesaplanır.

Zhang, (2006), 18650 $LiCoO_2$ temelli hücreler üzerinde yaptığı çalışmada, 0 °C ve altında kapasitenin %30'a varan oranda düştüğünü raporlamış, bu etkinin özellikle 1C ve üzeri oranlarda daha belirgin olduğunu belirtmiştir. Aynı çalışmada sıcaklık düşüşüyle birlikte iç dirençte de yükselme gözlemlenmiştir.

Ning ve ark. (2004), yüksek deşarj oranlarının düşük sıcaklıkta SEI tabakasında bozulmaya neden olduğunu ve kapasite kaybını hızlandırdığını göstermiştir.

Bataryaların düşük sıcaklık davranışları yalnızca kapasiteyle sınırlı değildir. İç direnç (Rint) ve elektrokimyasal empedans spektrumu (EIS) gibi veriler, hücre içi reaksiyonların hızını ve iyon hareketliliğini doğrudan ortaya koyar.

EIS yöntemiyle yapılan testlerde bataryaya farklı frekanslarda küçük genlikli alternatif akımlar uygulanır ve elde edilen empedans değerlerinden; SEI tabakası direnci, yük transfer direnci ve difüzyon katsayıları hesaplanabilir.

Chen ve ark. (2022), -10 °C'de yapılan EIS analizinde yük transfer direncinin 25 °C'ye göre 3 kat arttığını ve bu artışın lityum iyonlarının anot içerisine geçişini belirgin şekilde yavaşlattığını bildirmiştir.

Bazı çalışmalar, düşük sıcaklık koşullarında bataryanın sadece anlık performansını değil, uzun vadeli yaşlanma etkilerini de analiz etmiştir. Bu kapsamda hücreler –10 °C gibi ortam sıcaklıklarında onlarca çevrim boyunca test edilmiş, kapasite ve iç dirençteki değişimler zamanla karşılaştırılmıştır.

Belgibayeva, (2021), 50 çevrim sonunda 0 °C'de çalışan hücrelerin kapasitesinde %15 oranında kalıcı düşüş gözlemlemiş ve bunun SEI kalınlaşması ile lithium plating kaynaklı olduğunu açıklamıştır. Bu testlerde, çevrim başına kapasite düşüş hızının sıcaklıkla doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmıştır.

Düşük sıcaklık testlerinde bazı araştırmacılar yalnızca hücre davranışlarını gözlemlemekle kalmamış, aynı zamanda ısı yalıtımı, ön ısıtma ve aktif ısıl yönetim sistemlerinin etkisini de test etmiştir.

Zhang, (2006), -20 °C ortamda kullanılan hücrelerin üzerine yalıtım malzemeleri yerleştirildiğinde sıcaklık düşüşünün yavaşladığını ve sıcaklık dengesi sağlanabildiğini göstermiştir. Diğer taraftan bazı çalışmalarda ön ısıtmalı sistemler kullanılarak şarj işlemi başlamadan önce hücrenin ideal sıcaklığa getirilmesinin lityum plating'i büyük ölçüde azalttığı gösterilmiştir Jaguemont ve ark. (2016).

Jaguemont ve ark. (2016), gerçek bir elektrikli araç sisteminde batarya paketini -15 °C ve -20 °C ortamda çalıştırarak araç içi veri kayıt sistemleriyle sıcaklık, voltaj ve kapasite takibi yapmıştır. Bu çalışma, laboratuvar ortamında elde edilen bulguların saha koşullarında nasıl değiştiğini göstermek açısından önemli bir referanstır.

Tahirağaoğlu ve ark. (2024), kese tipi Li-ion batarya hücresinin davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Batarya hücresinin anot ve katot bölgeleri arasında sıcaklık farkı olduğunu ve bu farkın akım yoğunluğu dağılımı ve iç dirençten kaynaklanan ısı üretimiyle ilişkili olduğunu, özellikle deşarj sırasında katot tarafının anota göre daha yüksek sıcaklığa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sevilgen ve ark. (2023), LTO tipi prizmatik batarya modülü için tasarladıkları farklı soğutma kanallarının batarya modülü üzerindeki etkisi için yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, yüksek c-oranı ile yapılan deşarjlarda yüksek sıcaklıkların oluştuğunu ve batarya paketinin soğutma ihtiyacı olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışma batarya hücresi ve modülünün yüksek c-oranı ile yapılan deşarjlarda sıcaklığın bir risk faktörü olduğunu göstermektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, kese tipi bir lityum-iyon batarya hücresinin farklı düşük çevresel sıcaklık koşulları altında sabit akım (C-rate) ile şarj ve deşarj edilmesi sonucunda oluşan sıcaklık değişimleri deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar, Bursa Uludağ Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Geliştirme Platformu (BATEG) laboratuvar altyapısından faydalanılarak yürütülmüştür. Kullanılan batarya hücresi, otomotiv uygulamalarında sıklıkla tercih edilen yüksek enerji yoğunluklu kese tipi bir lityum-iyon hücredir. Bu hücreye sabit şarj ve deşarj akımı uygulanarak, farklı ortam sıcaklıklarında termal davranışı gözlemlenmiştir.

Deneyler sırasında batarya hücresi 1c oranı ile şarj-deşarj işlemi yapılmıştır ve –5 °C, 0 °C ve 5 °C olmak üzere üç farklı çevresel sıcaklık koşuluna tabi tutulmuştur. Bu sıcaklık ortamları, termal iklimlendirme kabini kullanılarak sağlanmıştır. Batarya hücresinin yüzey sıcaklık dağılımını izleyebilmek amacıyla, yüksek hassasiyetli Testo 890 kızılötesi (IR) termal kamera kullanılmıştır. Kızılötesi ölçümleri kıyaslamak amacıyla batarya hücre yüzeyinin farklı bölgelerine yerleştirilen K tipi ısıl çift ile referans sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Termal kamera verileri, bu sensörlerden alınan veriler ile kalibre edilmiştir. Daha sonrasında ölçüm verileri farklı dış ortam sıcaklıklarına ve farklı akımlara göre incelenmiştir.

3.1 Deney Düzeneği ve Kullanılan Altyapı

3.1.1 Kullanılan kese tipi Li-Ion hücre özellikleri

Bu çalışmada, yüksek enerji yoğunluğuna sahip pouch tipi bir lityum-iyon batarya hücresi kullanılmıştır. Hücre, otomotiv uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen nikel-mangan-kobalt (NMC) bazlı katot kimyasına ve grafit anot yapısına sahiptir.

Çizelge 3. Li-Ion Batarya Hücre Özellikleri

Batarya Hücre Tipi	Kese Tipi (Pouch Cell) Hücre
Hücre Kimyası	NMC
Çalışma Sıcaklık Aralığı	–20 °C / +55 °C
Kapasite	73 Ah
Nominal Gerilim	3.65 V
Maksimum Gerilim	4.2 V
Minimum Gerilim	2.75 V
Boyutlar	294 mm x 103 mm x 14.5 mm
Ağırlık	953 gram
Hacimsel Enerji Yoğunluğu	642 Wh/L

Çalışma sıcaklık aralığı olarak –20 °C ila +55 °C arasında kullanıma olanak sağlanmaktadır. Ancak bu tez kapsamında yapılan deneylerde –5 °C, 0 °C ve 5 °C ortam sıcaklıkları incelenmiştir.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan kese tipi batarya hücresi.

Hücrenin kese tipi yapısı sayesinde, yüzey sıcaklığının izlenmesini kolaylaştıran geniş ve düz bir yüzeye sahiptir. Bu özellik, kızılötesi termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca yüksek kapasitesi sayesinde, düşük C-rate değerlerinde bile anlamlı sıcaklık değişimleri gözlemlenebilmiş ve deneysel analizler için uygun bir zemin oluşturulmuştur.

3.1.2 Deney ekipmanları

Termal İklimlendirme Kabini: Deneysel çalışmalarda, batarya hücresinin farklı çevresel sıcaklık koşulları altındaki davranışını inceleyebilmek amacıyla, sıcaklık kontrollü bir termal iklimlendirme kabini kullanılmıştır. Bu kabin, –40 °C ila +150 °C aralığında çalışma kapasitesine sahiptir ve içerisinde homojen sıcaklık dağılımı sağlayan güçlü bir hava sirkülasyon sistemine sahiptir.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan termal iklimlendirme kabini.

Çalışma kapsamında, batarya hücresi –5 °C, 0 °C ve 5 °C olmak üzere üç farklı ortam sıcaklığında test edilmiştir. Kabin içerisindeki sıcaklık, test boyunca sabit tutulmuş ve gerçek zamanlı olarak izlenmiştir.

K Tipi Temaslı Isıl Çift: Termal kamera ile elde edilen yüzey sıcaklığı verilerinin doğruluğunu artırmak ve kalibrasyon amacıyla, deneylerde K tipi temaslı sıcaklık sensörleri (ısıl çiftler) kullanılmıştır. Bu sensörler, batarya hücresinin belirlenen noktalarına doğrudan temas ettirilerek yerleştirilmiş ve lokal sıcaklık değerlerinin sürekli olarak izlenmesine olanak sağlamıştır.

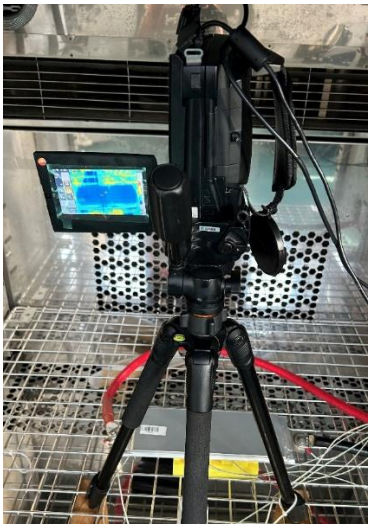
K tipi ısıl çiftler, kullanımı yaygın olan ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilen termokupl türlerindendir. Deneylerde kullanılan K tipi sensörler, –25 °C ile +200 °C aralığında çalışabilmekte olup, ±0.01 °C düzeyinde yüksek hassasiyetle sıcaklık ölçümü yapabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde, batarya yüzeyindeki ani sıcaklık değişimlerini ve bölgesel farklılıkları güvenilir şekilde tespit etmek mümkün olmuştur.

Deney esnasında batarya üzerinde 5 adet ısıl çift kullanılmıştır. Bunlardan ikisi kutup başlarında, bir tanesi batarya hücresinin ortasında ve diğer iki ısıl çift de ortadakinin iki yanına konumlandırılmıştır.

Sensör verileri, Testo 890 kızılötesi termal kameranın ölçümleriyle karşılaştırılmış ve cihazın sıcaklık okumaları bu temaslı referans sensörlerle kalibre edilmiştir. Böylece yüzey sıcaklığına ilişkin verilerin doğruluğu artırılmış, ölçüm güvenilirliği sağlanmıştır.

Termal Kamera: Batarya yüzey sıcaklıklarının homojenliğini değerlendirmek ve farklı çevresel sıcaklık koşullarında oluşan termal değişimleri detaylı olarak gözlemlemek amacıyla, deneylerde kızılötesi (IR) termal görüntüleme teknolojisinden faydalanılmıştır. Bu kapsamda, yüksek çözünürlüklü Testo 890 model termal kamera kullanılmıştır.

Testo 890 termal kamera, batarya yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyonu algılayarak, yüzey sıcaklık dağılımını temassız bir şekilde ölçmekte ve görselleştirmektedir. Cihaz, 640 × 480 piksel termal görüntü çözünürlüğü ve ±2 °C mutlak sıcaklık doğruluğuna sahiptir ve 40 mK (0.04 °C) düzeyindeki termal hassasiyete sahiptir.



Şekil 6. Deneylerde kullanılan Testo 890 kamerası.

Testo 890 ile elde edilen bu veriler, hücre yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımının analizi ve farklı sıcaklık koşullarında hücre davranışının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

Çift Yönlü (Bi-Directional) Güç Kaynağı: Deneylerde batarya hücresini kontrollü şekilde şarj ve deşarj etmek için programlanabilir çift yönlü güç kaynağı kullanılmıştır. Bu güç kaynağının enerji verme modu ile batarya hücresi şarj edilebilmiş, enerji alma modu ile de batarya hücresine deşarj modu uygulanarak sabit akım değerlerinde batarya hücresindeki yük boşaltılmıştır.

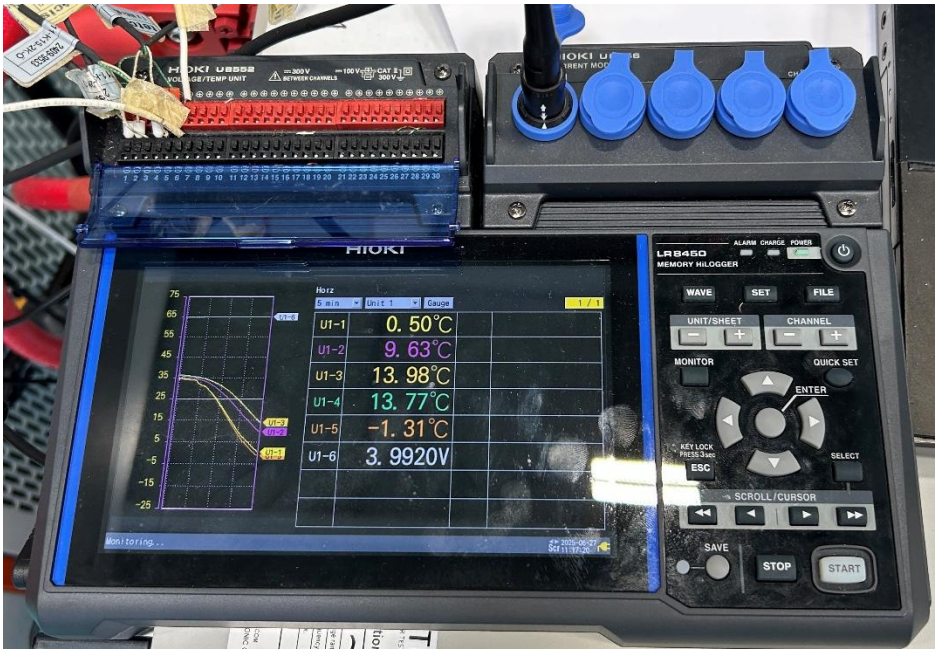


Şekil 7. Deneylerde kullanılan çift yönlü güç kaynağı.



Şekil 8. Çift yönlü güç kaynağının yazılım ekranı.

Veri Kaydedici (Data Logger): Deneyler esnasında yüzey sıcaklıkları ve elektriksel büyüklüklerin kayıt altına alınmasında çok kanallı veri kayıt sistemi olan Hioki LR8450 model veri kaydedici cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz 1 ms'ye kadar veri kayıt aralığına sahip olup, hızlı değişen sıcaklık ve gerilim değerlerinin doğru biçimde izlenmesine ve kaydedilmesine olanak sağlamıştır. Sıcaklık ölçümleri için



Şekil 9. Deneylerde kullanılan Hioki LR8450 model cihaz.

3.2 Deney Planı

Çizelge 4. Deney Planı

Deney Numarası	Deney Tipi	Dış Ortam Sıcaklığı	Şarj Akımı	Şarj Durma Akımı	Deşarj Akımı	Deşarj Durma Voltajı
Deney 1	Şarj	-5 °C	73.0 A	3.65 A	-	-
Deney 2	Deşarj	-5 °C	-	-	73.0 A	2.75 V
Deney 3	Şarj	0 °C	73.0 A	3.65 A	-	-
Deney 4	Deşarj	0 °C	-	-	73.0 A	2.75 V
Deney 5	Şarj	+5 °C	73.0 A	3.65 A	-	-
Deney 6	Deşarj	+5 °C	-	-	73.0 A	2.75 V

Çizelge 2'de sunulan deney protokolünde de görüleceği üzere, kese tipi Li-Ion batarya hücresi, termal iklimlendirme kabini aracılığıyla sırasıyla -5 °C, 0 °C, +5 °C olmak üzere üç farklı dış ortam koşulunda incelenmiştir. Deneyler, hücre üzerinde yer alan sensör sıcaklıkları ve termal kamera verileri, ortam sıcaklığına eriştiğinde, kararlı koşullar oluştuğunda başlatılmıştır. Deneyler 1C oranına karşılık gelen 73 amper seviyesinde yapılmıştır.

Batarya hücrelerini %20 ve %80 doluluk oranlarında kullanmak, bataryanın ömrü ve kararlılığı açısından önemlidir. Fakat farklı dış ortam sıcaklıklarında batarya voltaj eğrisi lineer olarak hareket etmediğinden dolayı ve iç dirençleri değiştiğinden dolayı %20 ve %80 doluluk noktalarını tayin etmek zordur. Bundan dolayı bu çalışmada şarj deneyleri %0 ve %100 doluluk oranları arasında, deşarj deneyleri de %100 ve %0 doluluk oranları arasında yapılmıştır.

Batarya hücresi kararlı koşullara geldiğinde 1C oranı ile şarj işlemi başlamakta olup, şarj akımını kesme sınır koşulu olarak da 3.65 amper değeri girilmiştir.

Batarya şarj olduktan sonra deşarj deneylerine başlamak için elektronların hareketinin azalması, voltaj değerinin stabil hale gelmesi için ve şarj esnasında ısı üretimine sahip olan batarya sıcaklığının tekrar ortam koşullarına dönmesi için 1 saat beklenmiştir.

Ardından 1C oranı ile deşarj deneyi yapılmıştır. Deşarj deneyinin durma sınır koşulu olarak 2.75 V değeri girilmiştir.

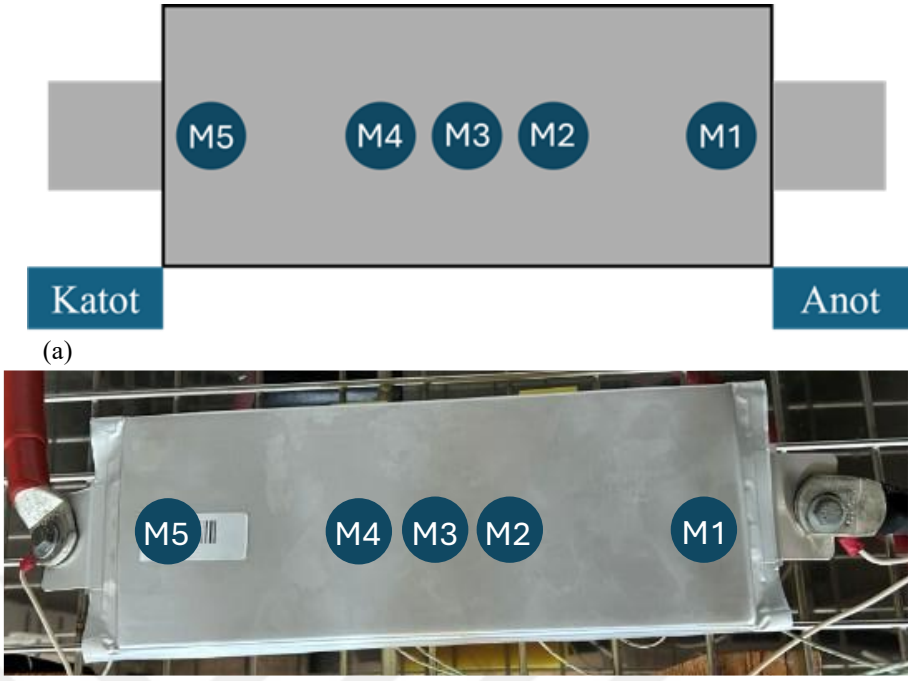
Bu deneyler esnasında sıcaklık sensörleri, akım/voltaj sensörleri ve termal kamera verileri kaydetmektedir.

3.3 Verilerin Kaydı ve Analizi

Deneyler esnasında veri kaydı üç farklı metot ile yapılmıştır. İlk olarak batarya hücresi üzerinde, anot ve katot kutup başlarına temas etmek üzere birer adet, bataryanın üzerine temas etmek üzere 3 adet, toplamda 5 adet k tipi temaslı ısıl çifti ile sıcaklık verileri veri kayıt cihazı üzerinden alınmıştır. Eşzamanlı olarak termal kamera batarya üzerinden sıcaklık kaydı yapmaktadır. Bunlara ek olarak, çift yönlü güç kaynağı üzerinden de sıcaklık ve voltaj değerleri kaydedilmiştir.

Batarya hücresi termal iklimlendirme kabinine yerleştirildikten sonra üzerine Şekil 10'daki konumlara K tipi temaslı ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Yerleşimler, kutup başlarına yakın konumlara birer tane ve batarya hücresinin orta kısmına denk gelen bölgeye 3 tane olmak üzere toplam 5 ısıl çift yerleştirilmiştir.

Sonrasında termal iklimlendirme kabini içerisine termal kamera kurulumu yapılmış olup ardından termal iklimlendirme kabini kapatılıp hedef dış ortam sıcaklığına şartlandırılmıştır. Batarya hücresinden alınan veriler hedef dış ortam sıcaklığında eşit sıcaklık verisi verdiği zaman deneylere başlanmıştır.



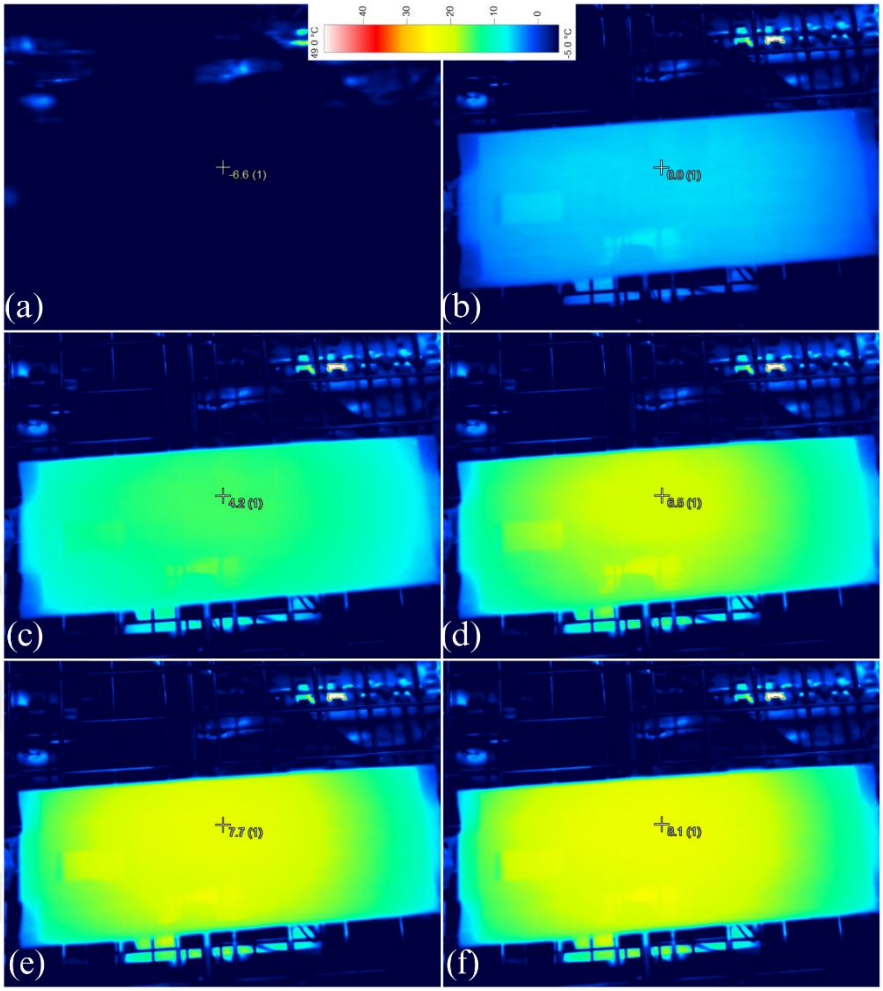
Şekil 10. Batarya hücresi üzerinde sıcaklık sensörleri yerleşimi: (a) şema üzerinden sensör yerleşimi, (b) batarya hücresi üzerinden sensör yerleşimi.

4. BULGULAR

4.1 -5 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları

4.1.1 Şarja etkisi

-5 °C dış ortam sıcaklığı ve 1C (73 Ah) oranında yapılan şarj deneyinde, batarya hücresi başlangıçta ortam sıcaklığına (-5 °C) yakın seyrederken hücre içi reaksiyonlarının başlamasıyla beraber sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Termal kamera ile alınan Şekil 11'deki görüntülerde görüleceği üzere özellikle hücrenin orta bölgelerinde belirgin bir sıcaklık birikimi oluştuğu gözlemlenmiştir.

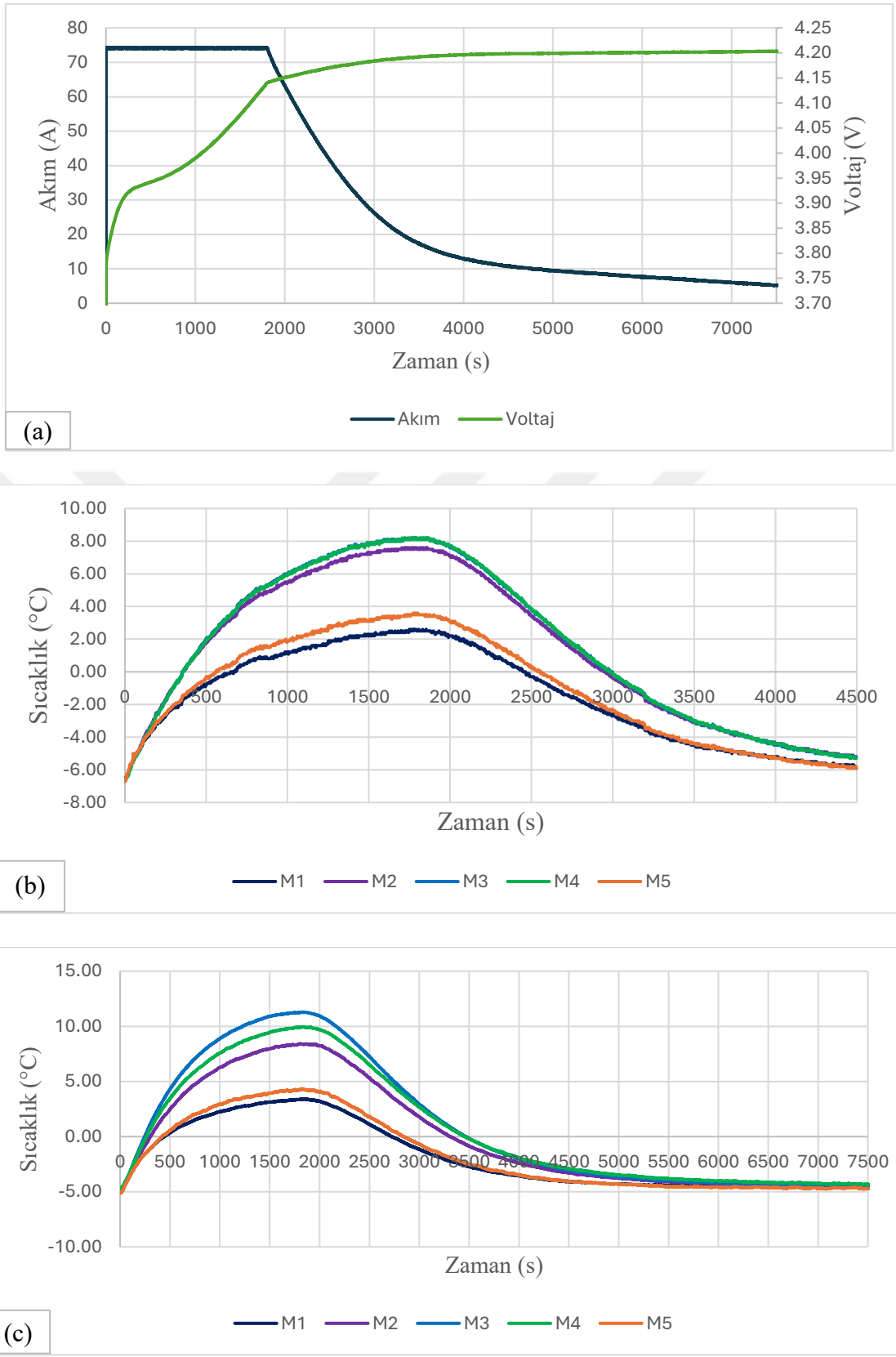


Şekil 51. -5 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri: (a) 0. Saniye, (b) 360. Saniye, (c) 720. Saniye, (d) 1080. Saniye, (e) 1440. Saniye, (f) 1800. Saniye.

-5 °C dış ortam koşullarında yapılan şarj deneyi yaklaşık olarak 7100 saniye sürmüştür. Deney süresince sıcaklık artışı özellikle ilk 1800 saniyede daha hızlı gerçekleşmiş, Şekil 11(b) ve Şekil 11(c)'de görülebileceği gibi başlangıçta -5 °C olan yüzey sıcaklığı, batarya hücresinin orta bölgesinde 4 °C civarlarına, kutup başlarına yakın bölgelerde ise 2 °C civarlarına ulaşmıştır. Şekil 11(a)'da şarj deneyinin başlangıcında batarya hücresi ortam sıcaklığında bulunmaktadır. Şekil 11(c)'de batarya hücresi 1C oranı ile şarj olduğu esnada ısınma oluştuğu ve ısınmanın batarya hücresinin orta bölgesinde başladığı gözlemlenmektedir. Şekil 11(f)'de 1C oranındaki sabit akım azalmadan hemen öncesinde şarj esnasında batarya hücresinin ulaştığı en yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. Deneyin 2000. saniyesine doğru batarya hücresi, şarj için hedef akım

olan 4.2 volt değerine yaklaştığından dolayı Şekil 12(a)'da görüleceği üzere akım değeri güç ünitesi tarafından kademeli olarak azaltılmaya başlanmıştır. Akım değerinin düşmeye başlamasıyla beraber sıcaklık artışı yavaşlamış, deneyin ilerleyen saniyelerinde ise sıcaklıklarda düşüş eğilimi gözlemlenmiştir.

Şekil 12(c)'de görüleceği üzere deneyin 1794. Saniyesinde bataryanın ortasındaki bölge 11,23 °C'ye gelerek en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Bu esnada katot 4,22 °C ve anot da 3,37 °C olarak ölçülmüştür. Deneyin 1794. saniyesinde katot ve anot arasında 0,85 °C sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu da batarya hücresinin ısı üretiminin, hücre merkezinde başladığını, zamanla genişleyerek yüzeye yayıldığını, katot bölgesinin anot bölgesine oranla daha sıcak olduğunu göstermektedir.

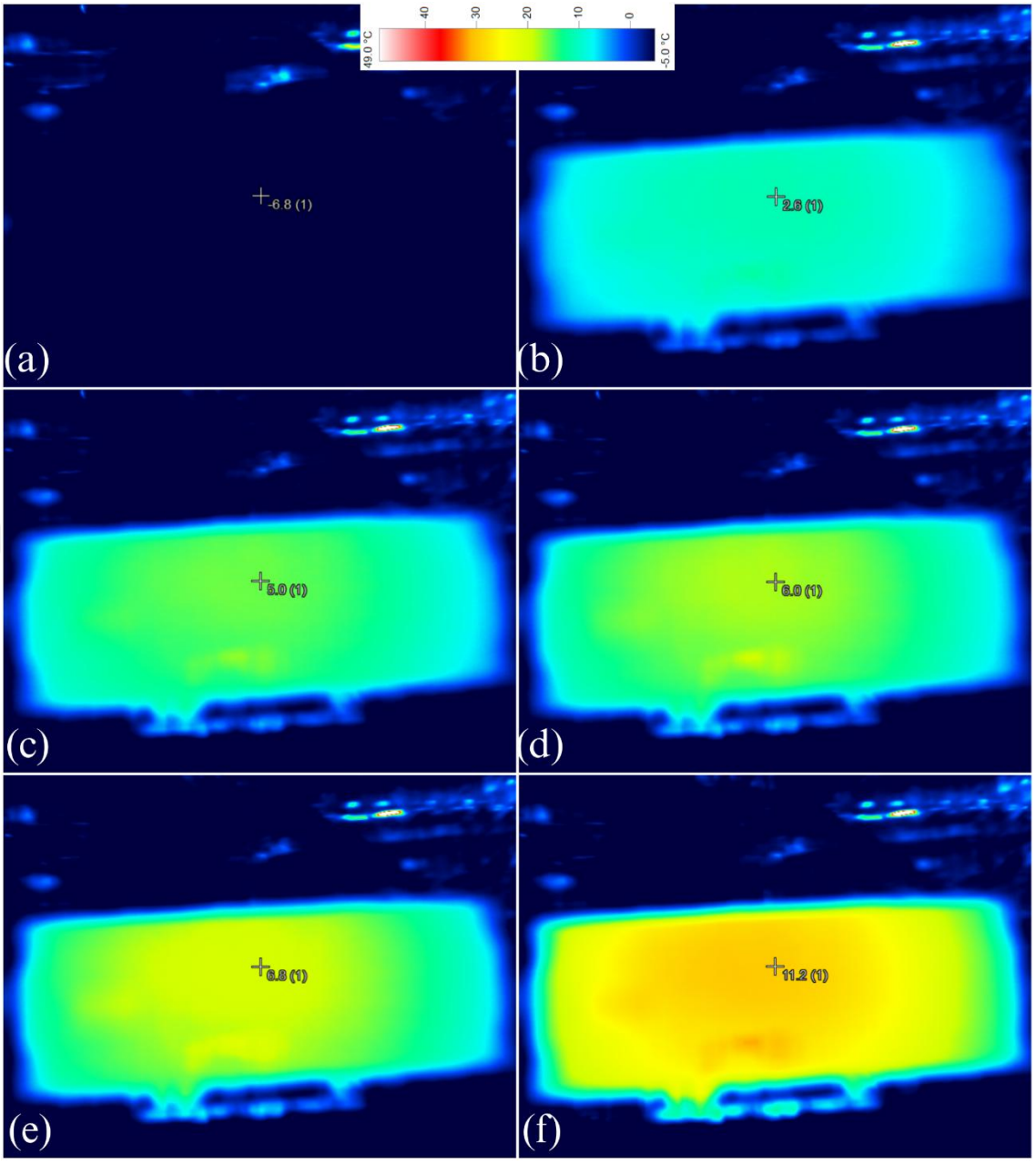


Şekil 12. -5 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri: (a) akım ve voltaj grafiği, (b) termal kamera sıcaklık verileri, (c) ısıl çift sıcaklık verileri.

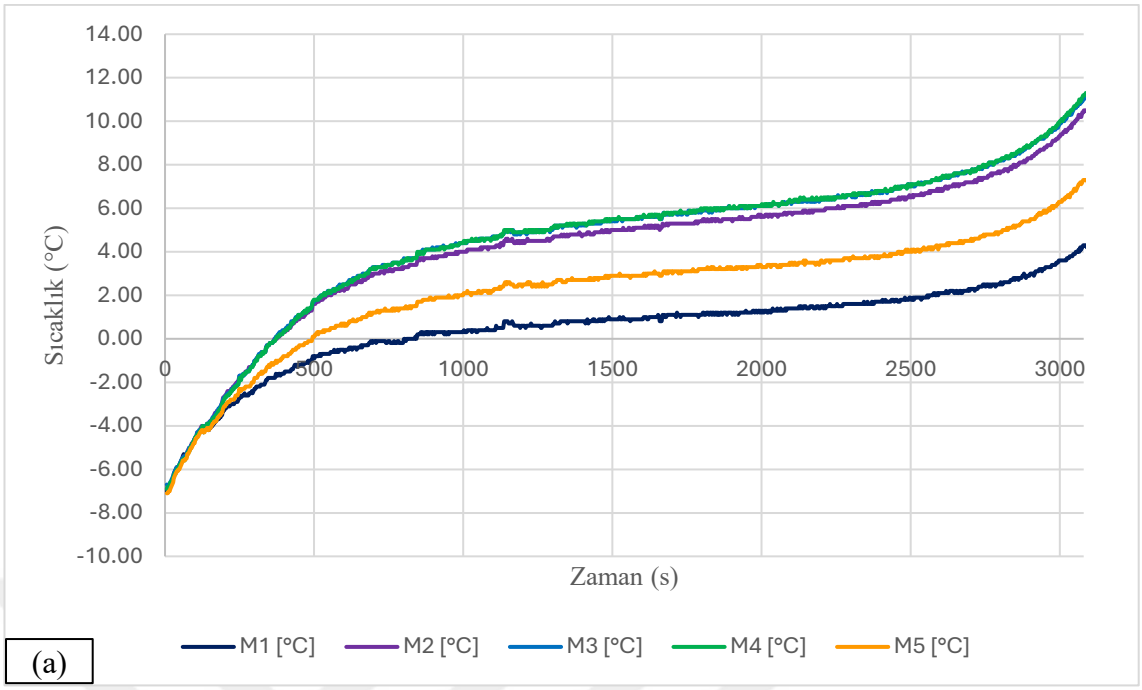
4.1.2 Deşarja etkisi

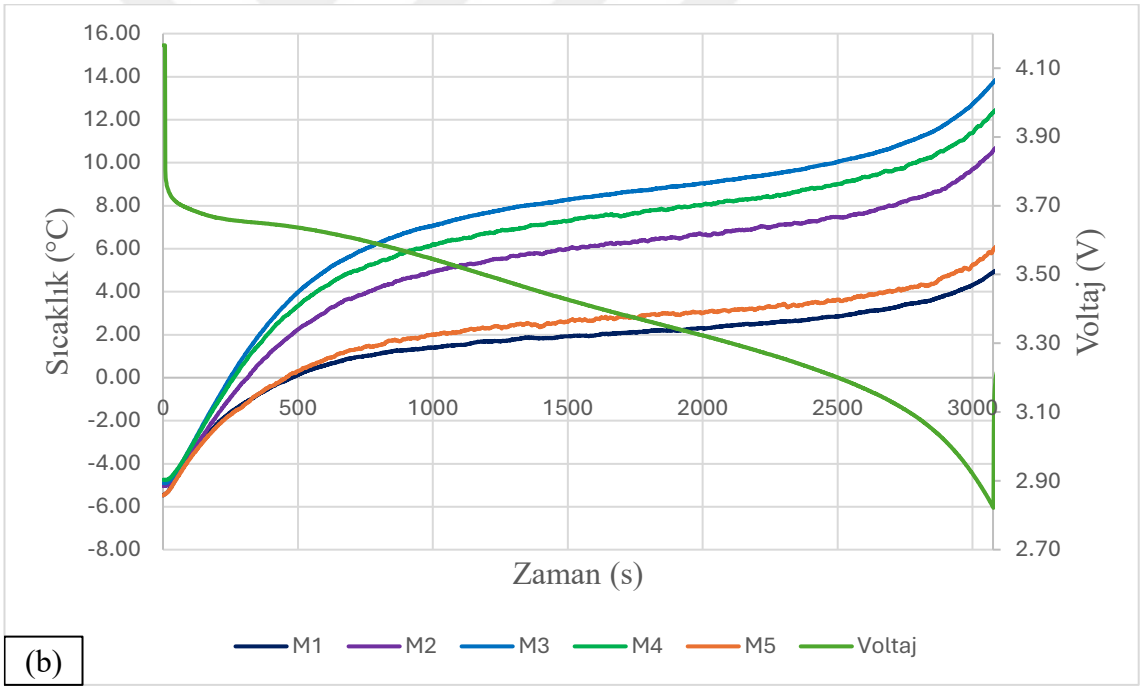
-5 derece dış ortam sıcaklığında sabit 1C oranında (73 Ah) akım verilerek deşarj edilmiştir ve 3000 saniye sürmüştür. Şekil 14'teki görseller deney esnasında termal kamera tarafından kaydedilmiş olup sıcaklık artışının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 14(b), Şekil 15(a) ve Şekil 15(b)'de gözlemlenebileceği üzere deneyin başlangıcında batarya hücresinde hızlı bir sıcaklık artışı gözlemlenmiş ve bu sıcaklık artışı ağırlıklı olarak hücrenin orta bölgesinde gerçekleşmiştir. 1200 ve 2400. saniyeler arasında, Şekil 14(c) ve Şekil 14(e)'de görülebileceği gibi sıcaklık hücre yüzeyine yayılmış durumdadır. Şekil 15(a) ve Şekil 15(b)'de görüleceği üzere hücre yüzeyindeki sıcaklık artış hızı yavaşlamış ve plato benzeri neredeyse sabit sıcaklıklarda seyretmiştir ve bu durum 2400. saniyelere kadar devam etmiştir. Deneyin son aşamasında sıcaklık yeniden artış göstermiştir. Bu artışı, batarya hücresindeki voltajının Şekil 15(b)'de görüldüğü üzere düşmesinden, buna bağlı olarak elektrokimyasal reaksiyonların veriminin azalmasından, elektrot yüzeyinde elektron taşınımının yavaşlamasından, kutup direncinin yükselmesinden ve termal birikimin artmasından kaynaklandığıyla açıklayabiliriz.

Tablo 15(c)'de görüleceği üzere, deney sonunda en sıcak bölge, batarya hücresinin ortasında yer alan bölge ve 13,77 °C olarak ölçülmüştür. Katot 5,82 °C ölçülürken anot ise 5,68 °C olarak ölçülmüştür. Anot ve katot arasında deney sonunda 0,14 °C sıcaklık farkı oluşmuştur.



Şekil 63. -5 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri: (a) 0. Saniye, (b) 600. Saniye, (c) 1200. saniye, (d) 1800. Saniye, (e) 2400. Saniye, (f) 3000. Saniye.





Şekil 14. -5 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği: (a) termal kamera sıcaklık verileri, (b) ısıl çift sıcaklık ve voltaj verileri.

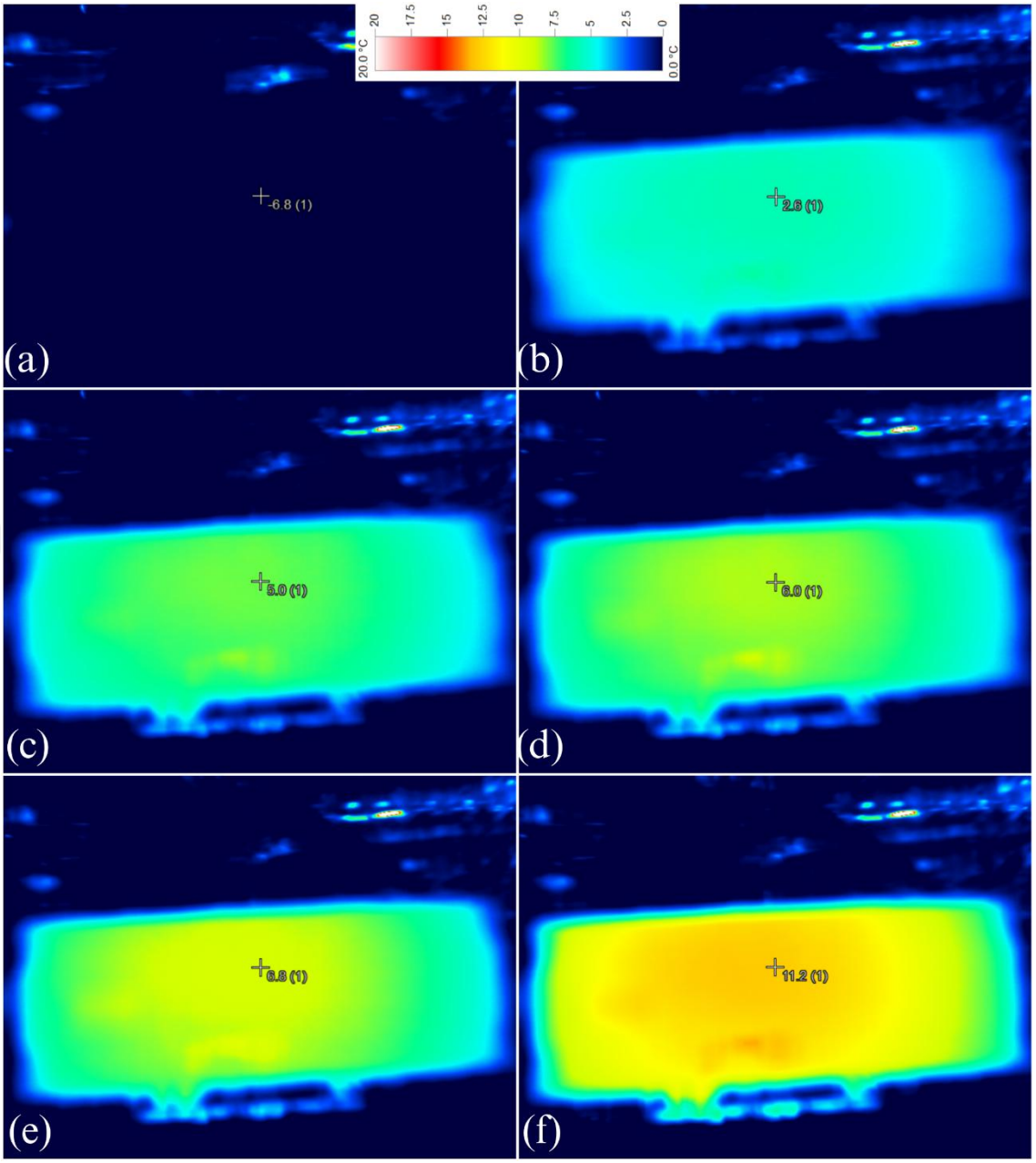
4.2 0 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları

4.2.1 Şarja etkisi

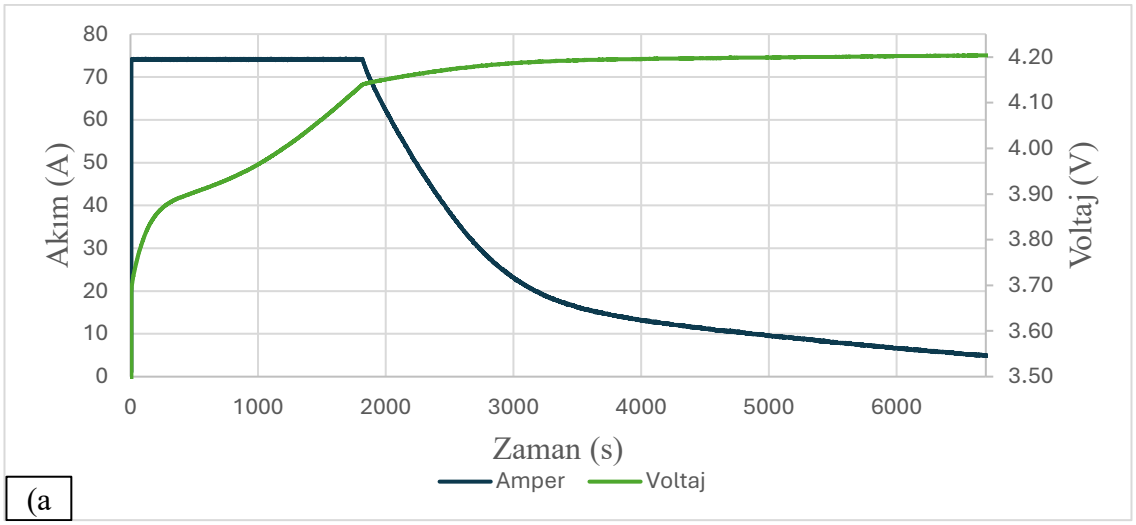
0 °C dış ortam sıcaklığında gerçekleştirilen şarj deneyinde batarya hücresi sabit akım-sabit voltaj yöntemine uygun olarak yaklaşık 6700 saniye boyunca şarj edilmiştir. Termal kameradan alınan görseller Şekil 15'de verilmiş olup sırasıyla 0, 360, 720, 1080, 1440, 1800. saniyelere ait sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 16(a) deney esnasında batarya hücresine uygulanan akımı ve voltaj değerini, Şekil 16(b) termal kameradan elde edilen sıcaklık verilerini, Şekil 16(c) ise temaslı ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık verilerini göstermektedir. Görseller ve grafikler şarj süreci esnasında batarya hücresinin yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimlerini net bir şekilde göstermektedir. Başlangıçta sıcaklık değeri ortam sıcaklığına yakın seviyelerdeyken sabit akım evresinde uygulanan 1C oranı (73 Ah) akımın etkisiyle batarya hücresi yüzeyinde sıcaklık hızlı biçimde yükselmiştir. 1500. saniye civarında hücre yüzey ısısının en yüksek noktaya ulaştığını, ardından hücre voltaj değeri hedef voltaj değerine yaklaştığından dolayı, sabit akım yerine sabit voltaj uygulanmaya başlanmasından kaynaklı sıcaklık artışında önce yavaşlama, ardından da sıcaklıklarda düşme gözlemlenmiştir.

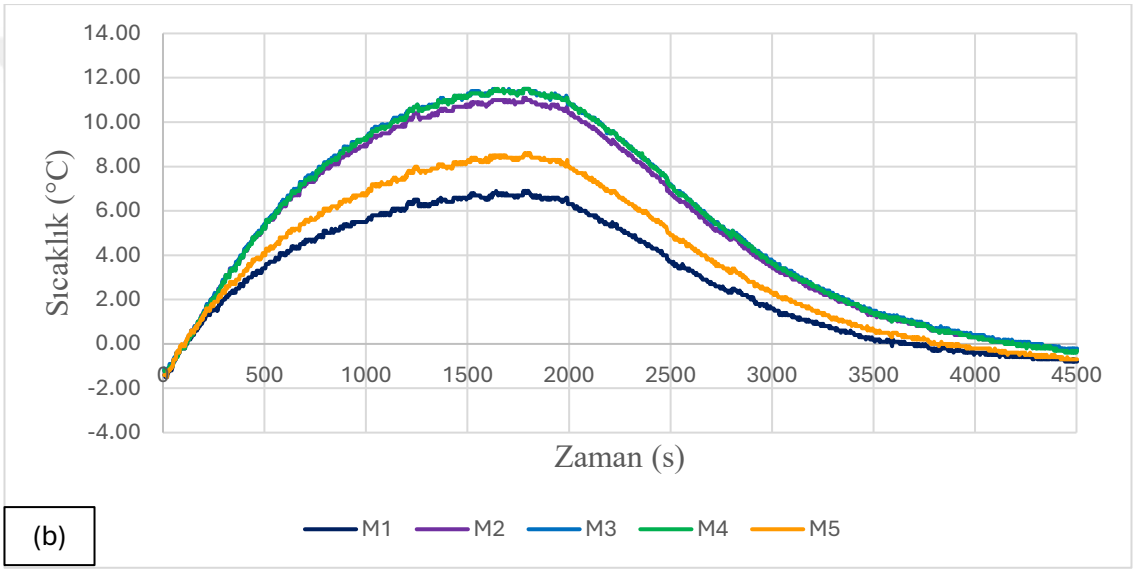
Deneyin sonlarına doğru Şekil 16(b) ve Şekil 16(c)'de görüleceği üzere 3500. saniye civarlarında sıcaklık durağanlaşmaya, dış ortam koşullarına yakın bir bölgede sabit gitmeye başlamaktadır. Bu durum, Şekil 16(a)'daki gibi gittikçe azalan akım değerinden dolayı hücre içi ısı üretiminin yavaşlaması ve dış ortamla dengeye gelmeye başladığını göstermektedir.

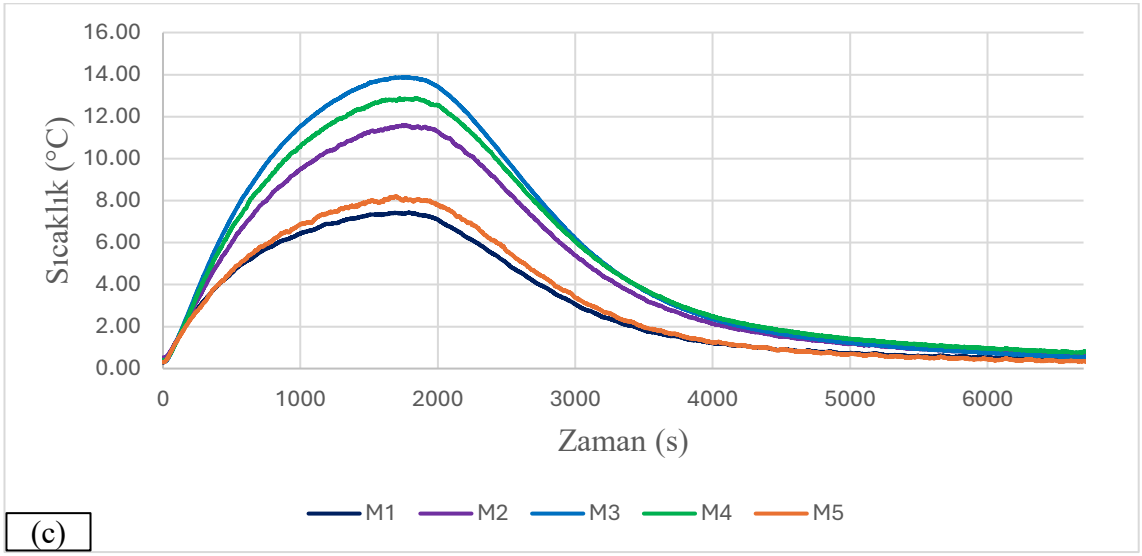
Şekil 16(c)'de görüleceği üzere en yüksek yüzey sıcaklığı, deneyin 1701. saniyesinde hücrenin ortasındaki bölgede 11,4 °C olarak ölçülmüştür. Bu zaman adımında katot 8,4 °C, anot ise 6,7 °C olarak ölçülmüştür. Anot ve katot arasında 1,7 °C sıcaklık farkı bulunmaktadır.



Şekil 15. 0 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel veriler: (a) 0. Saniye, (b) 360. Saniye, (c) 720. Saniye, (d) 1080. Saniye, (e) 1440. Saniye, (f) 1800. Saniye.





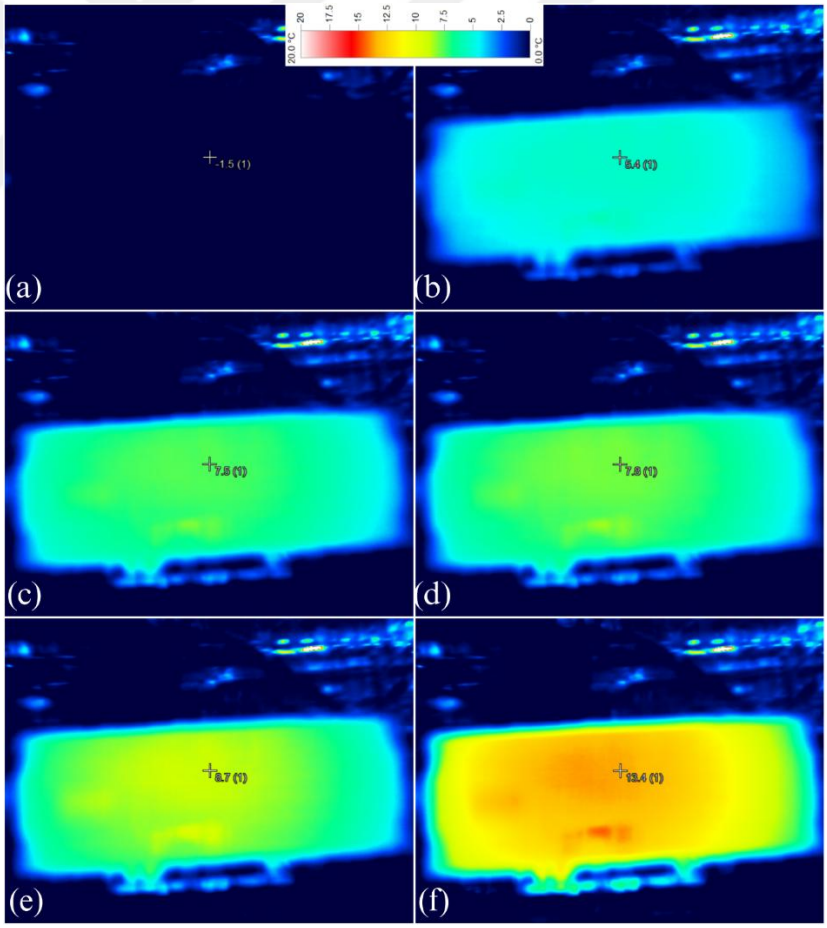


Şekil 16. 0 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri: (a) akım ve voltaj grafiği, (b) termal kamera sıcaklık verileri, (c) ısıl çift sıcaklık verileri.

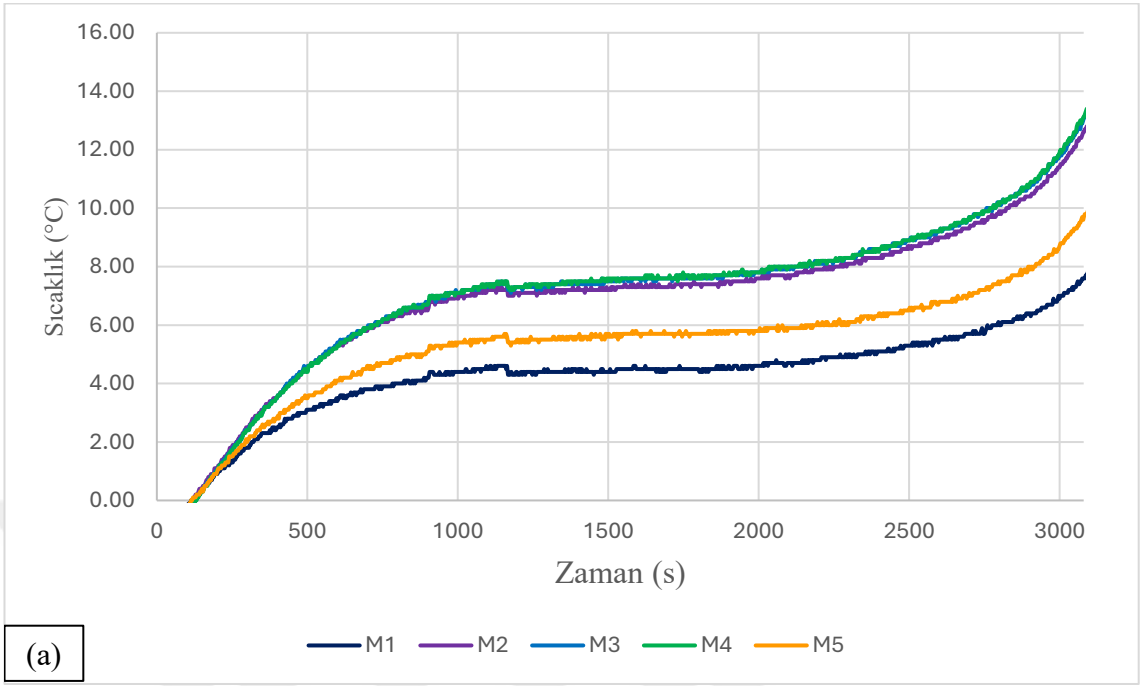
4.2.2 Deşarja etkisi

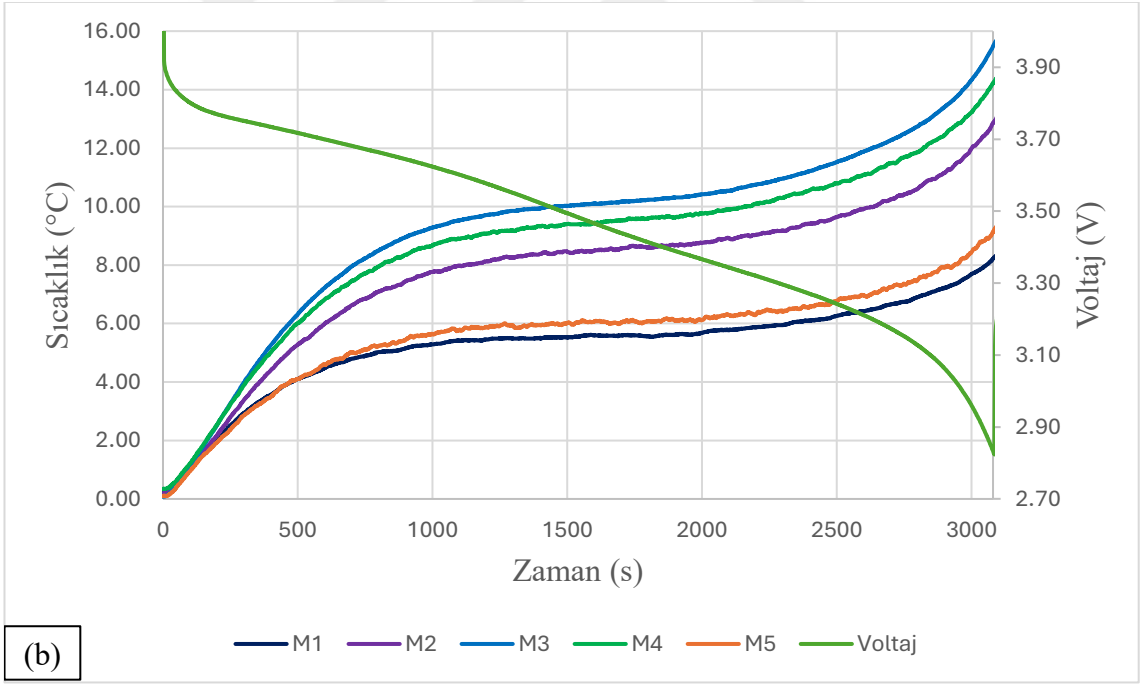
Batarya hücresine 0 °C dış ortam sıcaklığında, 1C oranında deşarj oranı uygulanarak 3080 saniye boyunca deşarj işlemi uygulanmıştır. Şekil 18'de zamana bağlı olarak termal kamera üzerinden alınan sıcaklık verileri ile zamana bağlı sıcaklık dağılımı görülmekte olup, Şekil 19'da sıcaklıkların ve voltajın zamana bağlı değişimi görülmektedir.

Sıcaklık değerleri deşarj esnasında ilk 1000 saniyede hızlı bir artış göstererek hücrenin orta bölgesinde ortalama 10,5 °C olarak ölçülmüştür. Bu esnada katot bölgesi 5,98 °C iken anot bölgesi de 5,51 °C olarak ölçülmüştür. Şekil 19(b)'de görüleceği üzere deney sonunda hücrenin orta bölgesi 15,6 °C olarak ölçülmüştür. Katot bölgesi 9,13 °C olarak, anot bölgesi ise 8,22 °C olarak ölçülmüştür. Aralarında 0,91 °C sıcaklık farkı bulunmaktadır.



Şekil 17. 0 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri: (a) 0. Saniye, (b) 600. Saniye, (c) 1200. Saniye, (d) 1800. Saniye, (e) 2400. Saniye, (f) 3080. Saniye.





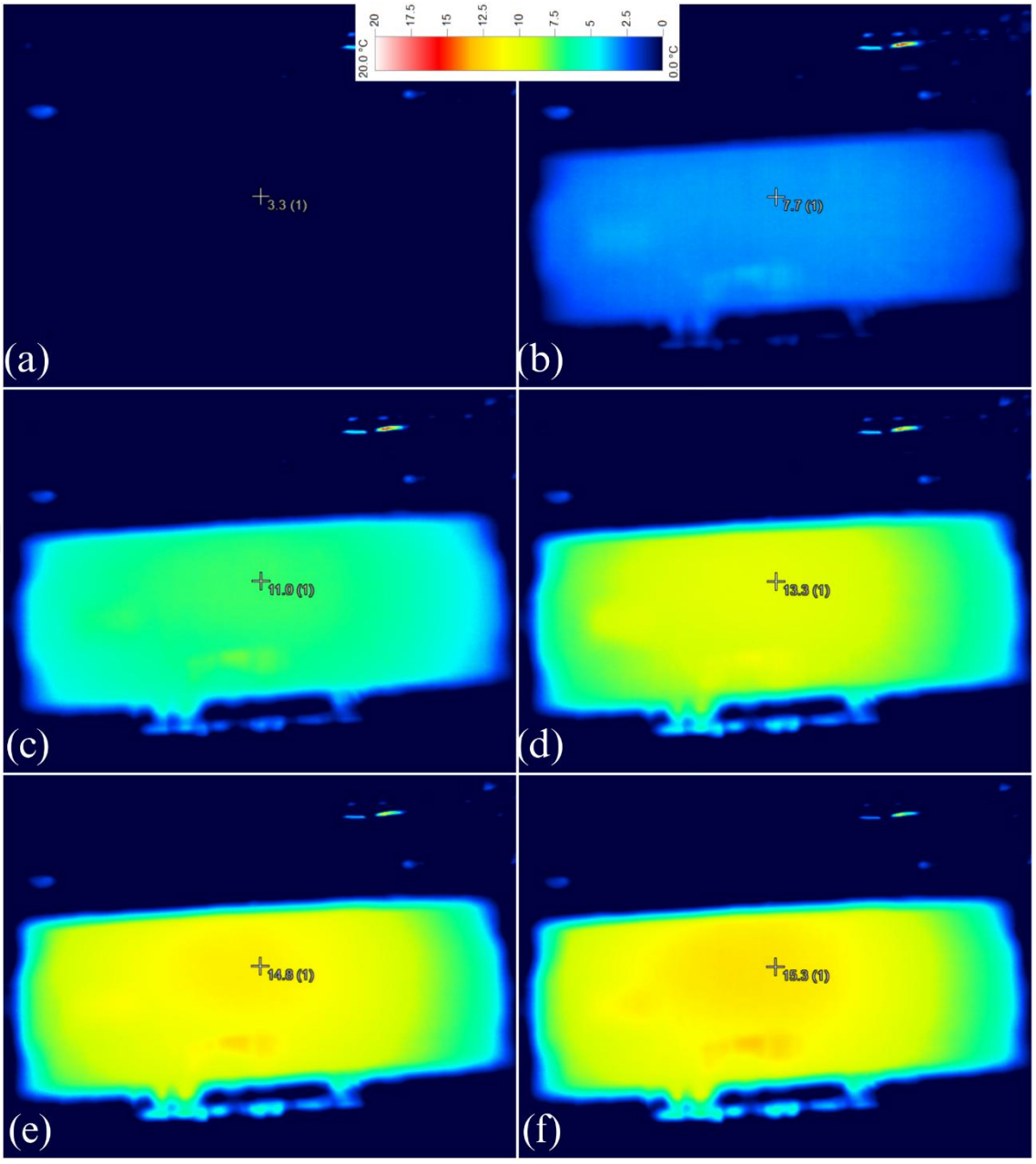
Şekil 78. 0 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği: (a) termal kamera sıcaklık verileri, (b) ısıl çift sıcaklık ve voltaj verileri.

4.3 +5 °C Ortam Sıcaklığında Şarj ve Deşarj Sonuçları

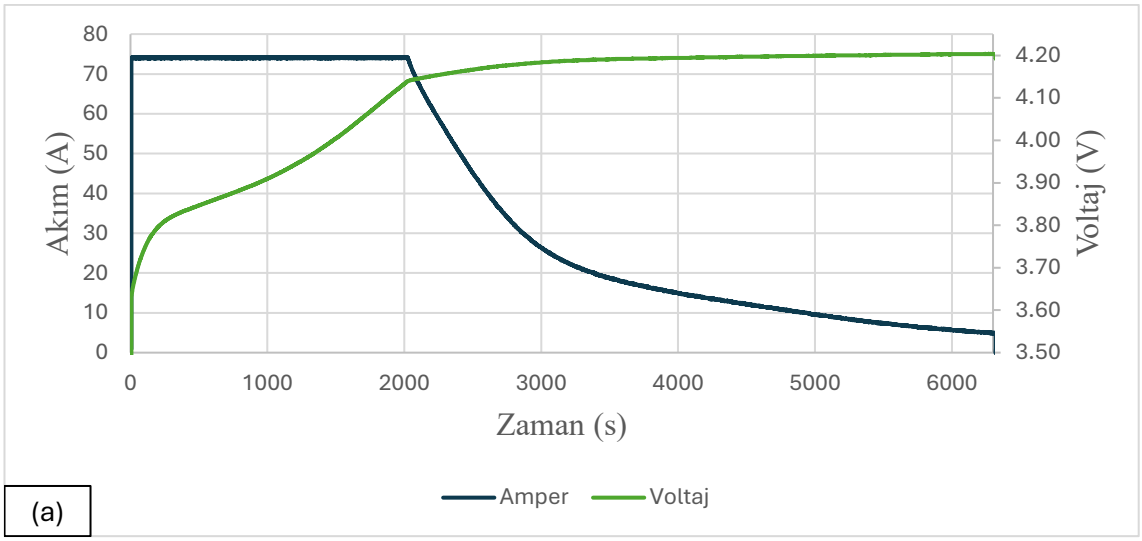
4.3.1 Şarja etkisi

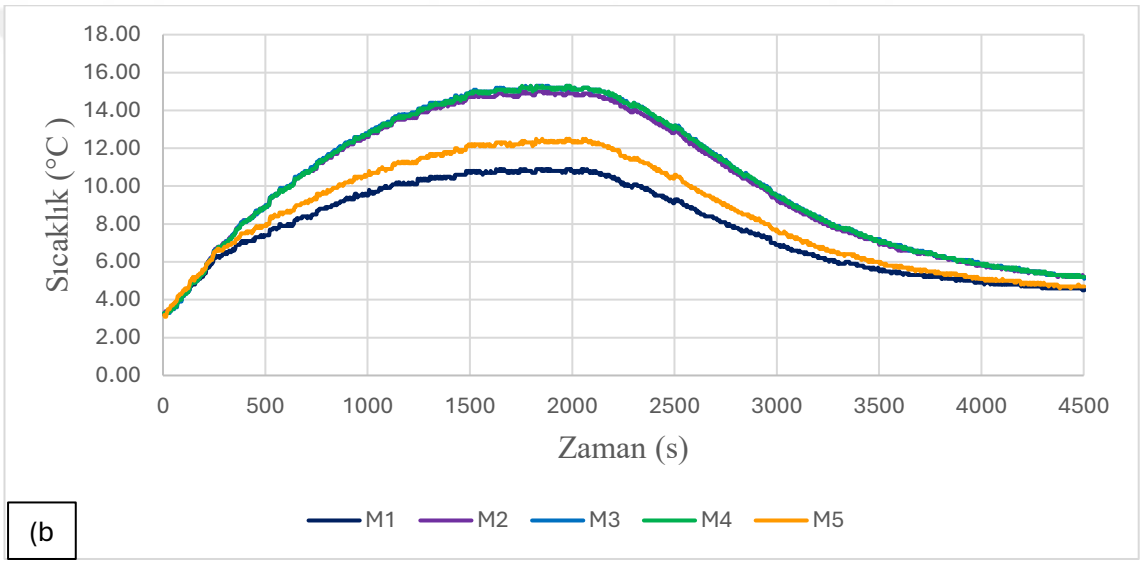
+5 °C dış ortam sıcaklığında gerçekleştirilen şarj deneyinde batarya hücresi sabit akım-sabit voltaj yöntemine uygun olarak yaklaşık 6300 saniye boyunca şarj edilmiştir. Termal kameradan alınan görseller Şekil 20'de verilmiş olup sırasıyla 0, 750, 1500, 2100, 3000, 4200. saniyelere ait sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 20(a) deney esnasında batarya hücresine uygulanan akımı ve voltaj değerini, Şekil 20(b) termal kameradan elde edilen sıcaklık verilerini, Şekil 20(c) ise temaslı ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık verilerini göstermektedir. Başlangıçta sıcaklık değeri ortam sıcaklığına yakın seviyelerdeyken sabit akım evresinde uygulanan 1C oranı (73 Ah) akımın etkisiyle batarya hücresi yüzeyinde sıcaklık hızlı biçimde yükselmiştir. Şekil 19'da görüleceği üzere deneyin başlangıcından itibaren ilk 1800 saniye batarya hücresinde sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık değeri 1800. saniyede 17,23 °C olarak ölçülmüştür. Bu esnada katot 12,38 °C, anot bölgesi de 11,78 °C olarak ölçülmüştür. Katot ve anot arasında 0,6 °C fark gözlemlenmiştir.

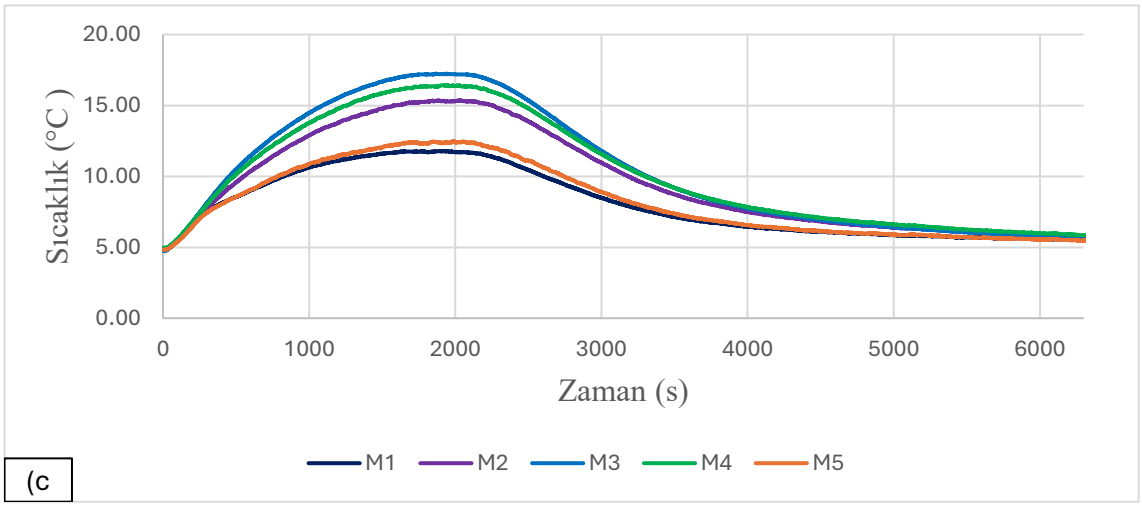
Şekil 20(a)'da görüleceği üzere 2000. saniyeye kadar sabit akım ile şarj olurken sonrasında sabit voltaja geçilmesi ile akım değeri kontrollü olarak düşmüştür ve bu akım düşüşü, sıcaklıklarda da azalmaya sebep olmuştur.



Şekil 19. +5 °C 1C oranı ile şarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel veriler: (a) 0. Saniye, (b) 360. Saniye, (c) 720. Saniye, (d) 1080. Saniye, (e) 1440. Saniye, (f) 1800. Saniye.





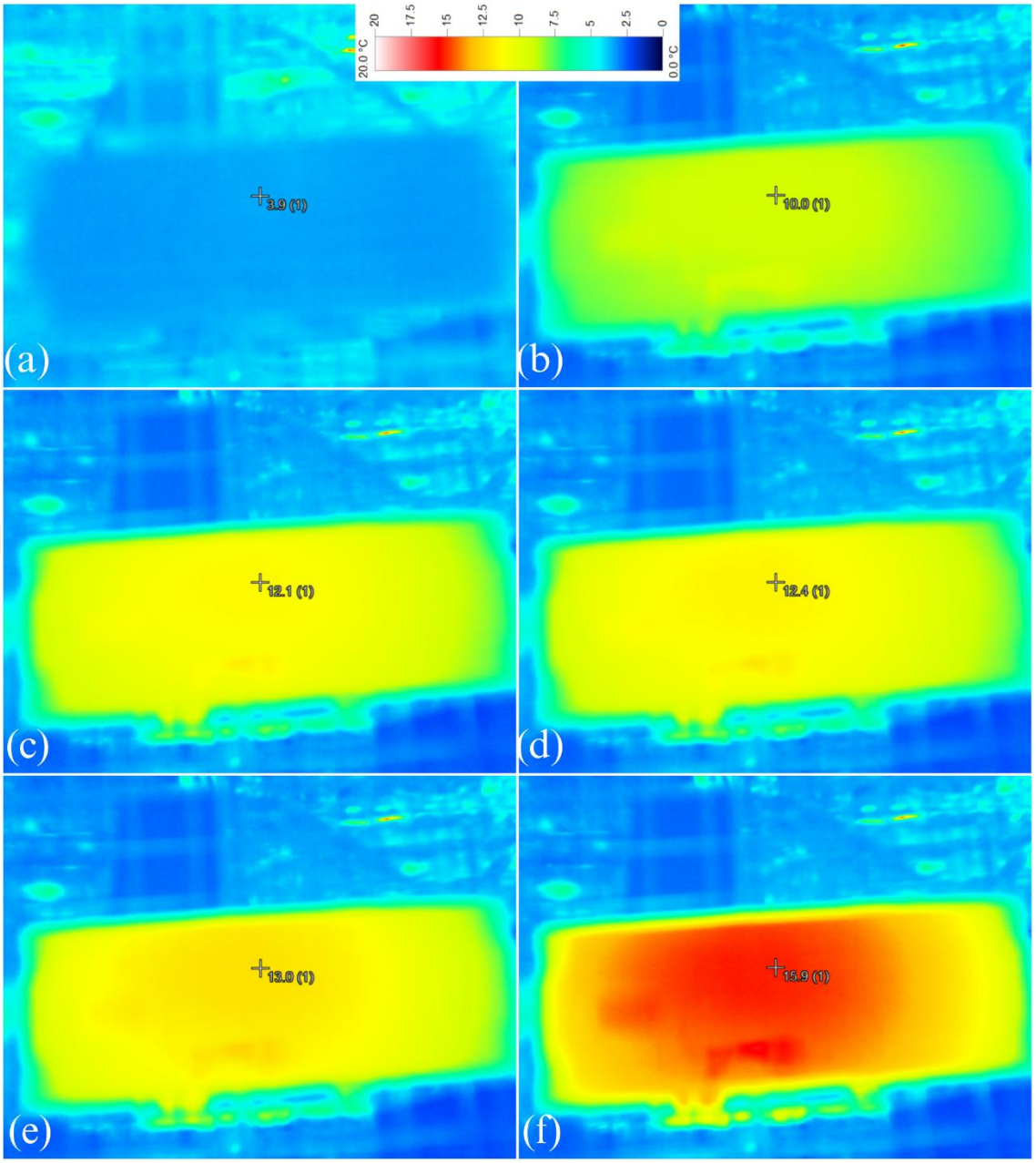


Şekil 20. +5 °C 1C oranı ile şarj deneyine ait zamana bağlı grafikleri: (a) akım ve voltaj grafiği, (b) termal kamera sıcaklık verileri, (c) ısıl çift sıcaklık verileri.

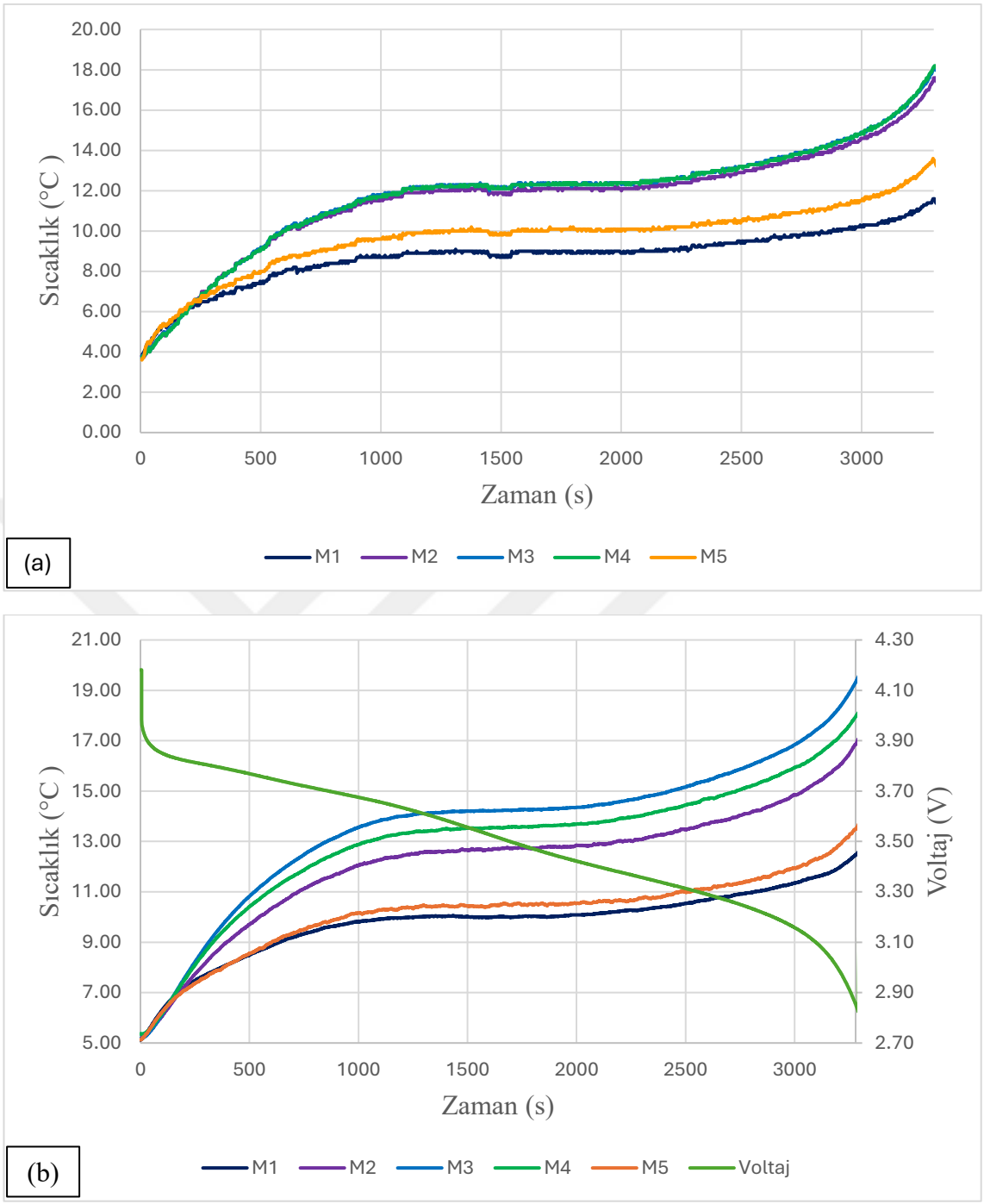
4.3.2 Deşarja etkisi

+5 °C dış ortam sıcaklığında gerçekleştirilen deşarj deneyinde, batarya hücresi yaklaşık 3280 saniye boyunca sabit 1C oranında (73 Ah) deşarj edilmiştir. Termal kameradan elde edilen görüntüler Şekil 22'de, termal kamera ve veri kaydediciden elde edilen sıcaklık verileri de Şekil 23'te sunulmaktadır. Ölçüm verileri incelendiğinde, deşarj işleminin başlangıç fazında sıcaklık artışının özellikle ilk 900 saniye içerisinde oldukça belirgin olduğu ve hızla yükseldiği gözlemlenmiştir. 1000 ve 2500. saniyeler arasında sıcaklık değerleri sabit değerlerde gittiği gözlemlenmiştir. 2500. saniyeden sonrasında batarya hücresi yüzey sıcaklığında yeniden bir artış gözlemlenmiş ve en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu artış deşarj işleminin sonuna doğru hücre iç direncinin artması ve iyonik iletimin zorlaşması ile ilişkilidir.

Deney sonunda batarya hücresinin en sıcak bölgesi 19,15 °C olarak ölçülmüştür. Bu esnada katot 13,48 °C, anot ise 12,39 °C olarak ölçülmüştür. Anot ve katot arasında 1,09 °C sıcaklık farkı gözlemlenmiştir.



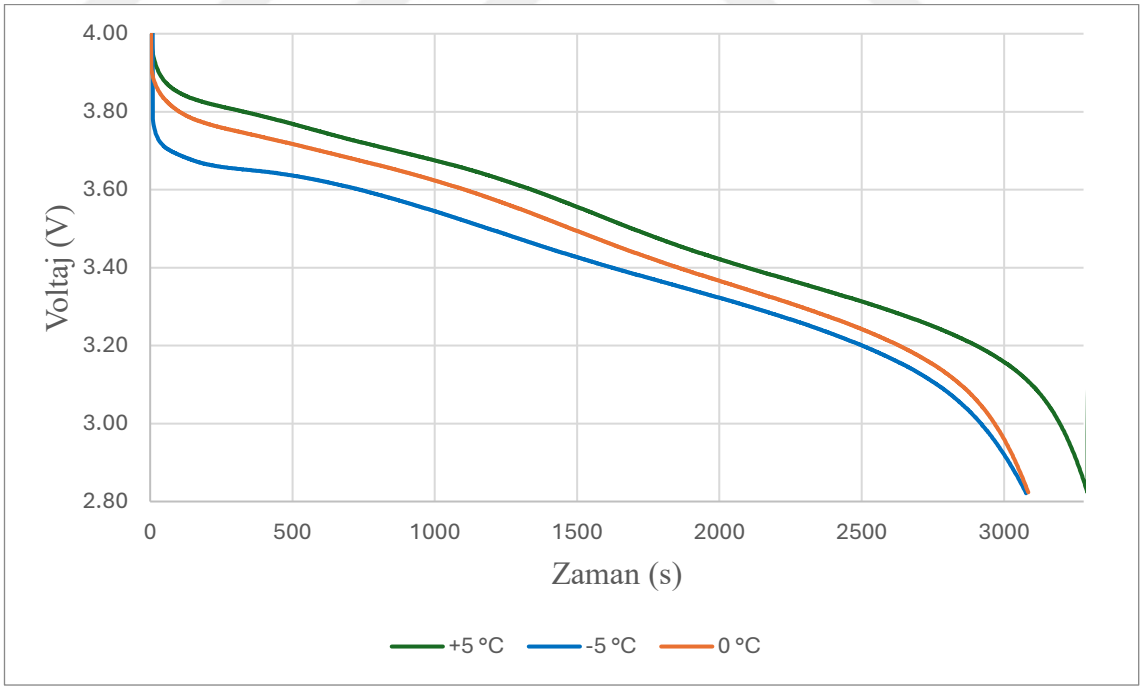
Şekil 21. +5 °C 1C oranı ile deşarj deneyi sırasında termal kameradan alınan görsel verileri: (a) 0. Saniye, (b) 600. Saniye, (c) 1200. Saniye, (d) 1800. Saniye, (e) 2400. Saniye, (f) 3280. Saniye.



Şekil 22. +5 °C 1C oranı ile deşarj deneyine ait zamana bağlı akım ve voltaj grafiği: (a) termal kamera sıcaklık verileri, (b) ısıl çift sıcaklık ve voltaj verileri.

4.4 Farklı Sıcaklıkların Karşılaştırması

Aynı akım oranı (1C) altında gerçekleştirilen deşarj deneylerinde, batarya hücresinin voltaj-zaman eğrileri farklı ortam sıcaklıklarına bağlı olarak farklar göstermiştir. Şekil 23'te gösterilen karşılaştırmalı grafik, -5 °C, 0 °C, +5 °C dış ortam sıcaklıklarındaki voltaj profillerini göstermektedir. Düşük sıcaklık olan -5 °C dış ortam sıcaklığında voltaj eğrisi, daha kısa sürede daha dik bir eğimle düşmüş, bu da hücre iç direncinin yüksek olması nedeniyle gerilim kaybının daha hızlı gerçekleştiğini göstermiştir. +5 °C'de ise voltaj düşüşü daha yavaş ve diğer eğrilere göre eğimi daha azdır. Bu da sıcaklıkla birlikte iç direncin azaldığını, hücrenin daha kararlı çalıştığını göstermektedir. Aynı başlangıç gerilimiyle başlayan deşarj deneylerinde, sıcaklık arttıkça hücrenin enerji çekme kapasitesi arttığı ve voltaj eğrisinin uzadığı görülmektedir. Bu durum, +5 °C dış ortam koşulunun diğer 2 sıcaklık değerine kıyasla hem enerji verimliliği hem de batarya sağlığı açısından daha avantajlı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 23. Farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilen deşarj deneylerine ait voltaj-zaman karşılaştırma grafiği.

Batarya hücresi yüzeyinde beş farklı noktadan elde edilen sıcaklık verileri, ısıl dağılımın hücre boyunca homojen olmadığını ortaya koymuştur. Özellikle anot ve katot bölgelerinde ölçülen sıcaklık değerleri arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Tablo 3'te görüleceği üzere anot tarafına yakın olan M2 sensöründe, +5 °C ortam sıcaklığında 16,86 °C'ye kadar çıkan sıcaklık, katot tarafına yakın olan M4 ve M5 sensörlerinde sırasıyla 17,95 °C ve 13,49 °C olarak kaydedilmiştir. Bu dağılım, katot tarafında sıcaklığın daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Ölçülen veriler incelendiğinde, hücrenin merkez noktası olan M3 sensöründe sıcaklık yükselmeye başlamış ve ardından ısı kenar bölgelere doğru yayılmıştır. Bu durum, iç direncin ve reaksiyon yoğunluğunun merkez bölgelerde daha yüksek olduğunu ve ısı üretiminin önce burada başladığını göstermektedir. Isının zamanla kenarlara yayılması, hücrede iletim yoluyla termal dağılım olduğunu göstermektedir.

Katot tarafının anot bölgesine kıyasla daha sıcak olması, farklılık gösteren elektrot malzemeleri ve elektron transferi sırasında oluşan enerji kayıplarının etkisiyle açıklanabilir. Özellikle katot tarafı daha yüksek potansiyelde çalıştığından, reaksiyonlar sırasında ısı üretiminin daha fazla olduğu öngörülmektedir. Bu durum ayrıca, termodinamik ve kinetik açıdan katotta daha fazla enerji dönüşümü gerçekleştiğini ve bunun yüzey sıcaklığına yansıdığını da göstermektedir.

Çizelge 5. Farklı dış ortam koşullarında deşarj esnasında sensörlerin maksimum sıcaklık değerleri.

SENSÖR ADI	–5 °C	0 °C	+5 °C
M1	4,92	8,28	12,47
M2	10,59	12,91	16,86
M3	13,75	15,58	19,32
M4	12,36	14,29	17,95
M5	5,98	9,23	13,49

Bu bulgular, hücre tasarımında daha homojen bir termal dağılımın sağlanması için elektrot taraflı ısıl yönetim çözümleri geliştirilmesi gerektiğini ve özellikle hücrenin orta bölgesinde ısı birikimi riskine karşı dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, bir Li-ion kese tipi batarya hücresinin farklı dış ortam sıcaklıklarında (–5 °C, 0 °C ve +5 °C) gerçekleştirdiği şarj ve deşarj süreçleri termal karakteristikler açısından deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, düşük sıcaklık koşullarının batarya hücresi üzerindeki ısıl ve elektriksel etkilerini ve performans parametrelerini analiz ederek, özellikle düşük sıcaklıklarda karşılaşılan termal davranışları ortaya koymaktır. Bu kapsamda, deneyler Bursa Uludağ Üniversitesi bünyesindeki BATEG (Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu) platformunun laboratuvar altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiş; sıcaklık verileri hem K tipi temaslı ısıl çift termokupllar ile hem de termal kamera ile elde edilmiştir.

Şarj deneylerinde, sabit akım uygulandığında hücre sıcaklığı hızla artış göstermiş, sabit voltaj uygulanmasıyla birlikte sıcaklık artışı yavaşlamış ve zamanla azalma göstermiştir. Özellikle –5 °C ortam sıcaklığında bu sıcaklık artışı daha belirgin olmuştur. Bu durum, düşük sıcaklık koşullarında hücre iç direncinin yükselmesine ve ısı üretiminin artmasına bağlanabilir. Termal kamera görüntüleri ile sensör verileri birlikte değerlendirildiğinde, maksimum sıcaklık artışlarının genellikle sabit akım fazının ortalarında meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Deşarj deneylerinde ise voltaj-zaman eğrilerinde başta hızlı bir düşüş, ardından daha yavaş bir seyir ve son kısımda yeniden hızlanan bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle –5 °C'de daha belirgindir. Voltaj düşüşünün başlangıçta ani olması, düşük sıcaklıkta iyon hareketliliğinin azalmasından ve elektrot reaksiyonlarının yavaşlamasından kaynaklanmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda bu düşüş eğrisi daha yumuşak olmuş ve deşarj süresi uzamıştır. Bu, sıcaklık arttıkça hücrenin daha fazla enerji sağlayabildiğini ve iç kayıpların azaldığını göstermektedir.

Yüzey sıcaklık dağılımı analizlerinde, ilk olarak hücre merkezine yakın olan M3 sensöründe sıcaklık artışı gözlenmiş, ardından bu artış anot ve katot yönünde yayılmıştır. Katot tarafında (M4–M5) anot tarafına (M1–M2) kıyasla daha yüksek sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu durum, elektrotlar arası reaksiyon yoğunluğunun ve ısı üretiminin

homojen dağılmadığını, özellikle katot tarafında daha fazla enerji dönüşümü gerçekleştiğini göstermektedir. Bu sonuç, hücre içindeki asimetrik ısıl davranışa işaret etmekte olup, uzun vadede termal dengesizlik kaynaklı performans kaybı veya güvenlik riski oluşturabilecek bir konudur. Bu bulgu, Tahirağaoğlu ve ark. (2024)'nun yaptığı çalışmanın bulguları ile paralellik göstermektedir.

Bu bulgular, hücre tasarımında daha homojen bir termal dağılımın sağlanması için elektrot taraflı ısıl yönetim çözümleri geliştirilmesi gerektiğini ve özellikle hücrenin orta bölgesinde ısı birikimi riskine karşı dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu ısı farkları uzun vadeli döngülerde malzeme bozulmasına ve termal dengesizlik kaynaklı performans kayıplarına yol açabilir.

Genel olarak, ortam sıcaklığı düştükçe şarj süresi uzamakta, verimlilik azalmakta ve termal yönetim ihtiyacı artmaktadır. Öte yandan, +5 °C ortam koşulu hem şarj hem de deşarj süreçlerinde daha dengeli ısıl ve elektriksel tepkiler göstermiş, batarya sisteminin daha güvenli ve verimli çalışmasına olanak sağlamıştır. Bu nedenle düşük sıcaklık koşullarında çalışan batarya sistemlerinde pasif ya da aktif ısıl yönetim stratejilerinin uygulanması büyük önem arz etmektedir.

Literatürde, düşük sıcaklıkta yapılan şarj işlemlerinde benzer ısıl tepkiler ve akım düşüşü sonrası sıcaklık stabilizasyonu gözlemlenmiştir. Wang ve ark. (2022), 0 °C'de gerçekleştirdikleri deneylerde, sabit voltaj fazının başlamasıyla birlikte sıcaklık artışının durduğunu ve bunun hücre verimliliği açısından olumlu olduğunu belirtmiştir.

Elde edilen sıcaklık verileri, batarya hücresinin güvenliği açısından sabit akım ile şarj esnasında hücre sıcaklığının dikkatle izlenmesi gerektiğini göstermektedir. Sıcaklık değerlerinin kontrol altında tutulamaması durumunda batarya hücresinde kapasite kaybı ve metalik lityum birikmesi riski artmaktadır.

Termal kamera ile elde edilen sıcaklık verileri, K tipi temaslı ısıl çiftlerinden elde edilen noktasal veriler ile eğilim açısından tutarlıdır. Ancak ölçüm alanının derinliğine bağlı olarak, belirli zamanlarda yüzey sıcaklığı değerlerinde sınırlı farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farkın ortam içi ısı akışı ve batarya yüzey yansıması gibi etkenlerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Yüzey sıcaklıklarının zamansal değişim trendi, termal kamera ve ısıl çiftler için paralel eğilim göstermiştir.

Deneysel veriler, ortam sıcaklığının batarya hücresinin hem sıcaklık dağılımı hem de elektriksel karakteristikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Şarj deneyleri esnasında, düşük sıcaklık koşullarında hücre içi sıcaklıklar daha erken artış göstermiş ve şarj süresi uzamıştır. Özellikle –5 °C ortam sıcaklığında sabit akım fazında sıcaklık hızla yükselmiş, sabit voltaj fazına geçildiğinde ise ısı üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıklarda artan iç direnç ve buna bağlı olarak yükselen joule ısısının etkisinden kaynaklanmaktadır.

Deşarj süreçlerinde, batarya voltajının zamanla azaldığı ancak bu azalışın sıcaklığa bağlı olarak farklı eğriler izlediği gözlenmiştir. Düşük sıcaklıkta daha kısa sürede voltaj düşüşü gerçekleşmiş, bu da düşük sıcaklığın batarya kapasitesini doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük sıcaklık koşullarının batarya performansı ve güvenliği açısından kritik etkileri olduğu ve bu etkilerin hem hücre içi tepkimeler hem de dış çevre koşulları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, düşük sıcaklıkta çalışan batarya sistemlerinde aktif/pasif ısıl yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, düşük C-oranı kullanımı, ön ısıtma sistemleri ve termal izolasyon uygulamaları gibi stratejiler büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, batarya hücrelerinin termal karakteristiklerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamakta ve düşük sıcaklık koşullarında çalışan enerji depolama sistemlerinin daha güvenli ve verimli hale getirilmesine yönelik uygulamalara ışık tutmaktadır. İlerleyen çalışmalarda, farklı hücre kimyalarının, daha geniş sıcaklık aralıklarının ve farklı C-oranı değerlerinin incelenmesiyle daha kapsamlı sonuçlara ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Alipour, M., Mahdavian, M., & Ghasemi, H. (2023). Performance of high capacity Li-ion pouch cells over wide range of operating temperatures and discharge rates. Journal of Energy Storage, 65, 107320. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107320

Aris, A. M., & Shabani, B. (2017). An experimental study of a lithium-ion cell operation at low temperature conditions. Journal of Energy Storage, 13, 418–429. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.08.001

Belgibayeva, A., Yerkinova, A., Tuleubekov, K., & Kabatayeva, Z. (2021). Lithium-ion batteries for low-temperature applications: Limiting factors and solutions. Journal of Energy Storage, 41, 102841. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102841

Chen, K., Wang, C., Zhang, Q., Han, X., & Ouyang, M. (2022). Impact of low temperature exposure on lithium-ion batteries: A multi-scale study of performance degradation, predictive signals and underlying mechanisms. Journal of Power Sources, 523, 231100. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.231100

Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. Applied Energy, 164, 99–114. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034

Liao, L. (2012). Effects of temperature on charge/discharge behaviors of $LiFePO_4$ cathode for Li-ion batteries. Journal of the Electrochemical Society, 159(10), A1620–A1625. https://doi.org/10.1149/2.040210jes

Narvaez, J. A., & Garimella, S. V. (2012). Computational modeling of a microchannel cold plate: Pressure, velocity, and temperature profiles. Applied Thermal Engineering, 37, 150–160. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.039

Narvaez, J. A., Garimella, S. V., & Amon, C. H. (2019). Computational modeling of a microchannel cold plate: Pressure, velocity, and temperature profiles. Applied Thermal Engineering, 163, 114373. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114373

Ning, G., Haran, B. S., & Popov, B. N. (2004). Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. Journal of Power Sources, 117(1–2), 160–169. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00651-6

Safari, M., & Delacourt, C. (2011). Effects of temperature on charge/discharge behaviors of $LiFePO_4$ cathode for Li-ion batteries. Electrochimica Acta, 56(23), 9230–9235. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.08.089

Sobhan, C. B., & Garimella, S. V. (2008). A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels. Microscale Thermophysical Engineering, 12(1), 21–36. https://doi.org/10.1080/10893950701788136

Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. Journal of Power Sources, 208, 210–224. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038

Wang, S., Wu, T., Xie, H., Li, C., Zhang, J., Jiang, L., & Wang, Q. (2022). Effects of current and ambient temperature on thermal response of lithium ion battery. Batteries, 8(11), 203. https://doi.org/10.3390/batteries8110203

Zhang, S. S. (2006). Charge and discharge characteristics of a commercial $LiCoO_2$-based 18650 Li-ion battery. Journal of Power Sources, 162(2), 1379–1391. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.010

Tahirağaoğlu, B., Sevilgen, G., & Hamut, H. S. (2024). The numerical and experimental investigation of the transient behaviours of a lithium-ion pouch battery cell under dynamic conditions. Case Studies in Thermal Engineering, 62, 105169. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105169

Sevilgen, G., Dursun, H., & Kılıç, M. (2023). Experimental and Numerical Investigations on the Thermal Performance of Three Different Cold Plates Designed for the Electrical Vehicle Battery Module. Sustainability, 15(19), 14162. https://doi.org/10.3390/su151914162