

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA LİTYUM İYON BATARYALARIN
ISIL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ahmet AKTÜRK

NİSAN 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA LİTYUM İYON BATARYALARIN
ISIL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Ahmet AKTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13/ 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 15/ 04 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Farklı Çalışma Koşulları Altında Lityum İyon Bataryaların Isıl Davranışlarının İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI’ya şükranlarımı sunarım. Yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali Can DALOĞLU’na ve Sayın Prof. Dr. Emin BACAĞSIZ’a, teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan akademisyenler Doç. Dr. Mustafa Yusuf YAZICI’ya, Dr. Öğretim Üyesi Melih YILDIZ’a ve Arş. Gör. Dr. Mehmet SAĞLAM’a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen annem Hamide AKTÜRK, babam Bülent AKTÜRK ve eşim Seda AKTÜRK’e müteşekkirim. Son olarak, son iki yıldır hayatımı güzelleştiren kızım Aylin AKTÜRK iyi ki varsın!

Bu tez, Fennec Teknoloji bünyesinde yürütülen TÜBİTAK 1507 (KOBİ-ARGE) projesi (Proje No: 7208041) kapsamında desteklenmiştir. Bu destek, çalışmalarımın başarıyla tamamlanmasında büyük bir katkı sağlamıştır.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ahmet AKTÜRK

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Farklı Çalışma Koşulları Altında Lityum İyon Bataryaların Isıl Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mehmet Emin Arıcı’nın sorumluluğunda tamamladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/04/2025

Ahmet AKTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Bataryaların Tarihsel Gelişimi	3
1.3. İkincil (Şarj Edilebilir) Batarya Türleri ve Karşılaştırılmaları.....	5
1.4. Lityum-iyon Bataryalar ve Çalışma Prensipleri.....	7
1.5. Lityum-iyon Bataryaların Şekillerine Göre Sınıflandırılması.....	10
1.6. Lityum-iyon Bataryaların Yapısında Kullanılan Elektrotlara Göre Sınıflandırılması	11
1.7. Lityum-iyon Bataryalarda Isı Üretimi	14
1.8. Sıcaklığın Lityum-iyon Bataryalar Üzerindeki Etkisi.....	15
1.9. Lityum-iyon Bataryalar için Isıl Yönetim Sistemleri (BIYS).....	17
1.10. Literatür Araştırması	19
1.10.1. Aktif Isıl Yönetim Sistemleri (AIYS).....	19
1.10.2. Pasif Isıl Yönetim Sistemleri (PIYS)	24
1.10.3. FDM’ye Çeşitli Katkı Maddeleri İlavesinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri için İncelendiği Çalışmalar	28
1.10.4. Metal Köpük/FDM Etkisinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri İçin İncelendiği Çalışmalar	35
1.10.5. Genişletilmiş Grafit/FDM Etkisinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri için İncelendiği Çalışmalar	42
1.10.6. Üretim Yöntemine Göre Genişletilmiş Grafit/FDM Kompozit Yapıların İncelendiği Örnek Çalışmalar	64
1.11. Tezin Konusu Gerekçesi ve Amacı	67
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	70
2.1. Genişletilmiş Grafit Köpük/FDM Matris Kompozit Batarya Termal Yönetim Sistemi Modelleme.....	70

2.2.	Grafit Matris Köpük Üretim Süreci.....	71
2.2.1.	Genişletilmiş Grafit Köpük Matris Presleme İşlemi İçin Kalıp Tasarımı ve Üretimi	72
2.2.2.	Genişletilebilir Grafitin Isıl İşlem ile Genişletilmiş Grafite Dönüştürülmesi	73
2.2.3.	Basınç Altında Şekil Verme İşlemi ile Genişletilmiş Grafitin Grafit Köpük Matris Şeklini Alması.....	73
2.2.4.	Üretilen Grafit Köpük Matrise FDM Emdirilerek Nihai GG/FDM Kompozit Matris Yapının Elde Edilmesi.....	74
2.2.5.	Batarya Paketinde Kullanmadan önce Oluşturulan GG/FDM Grafit Matrislerin Sızıntı Testine Tabi Tutulması.....	76
2.3.	Yalın ve Kompozit Batarya Paketleri.....	80
2.3.1.	Yalın Batarya Paketinin Oluşturulması.....	81
2.3.2.	Grafit/FDM Kompozit Batarya Paketinin Oluşturulması	82
2.3.3.	Oluşturulan Batarya Paketlerinde Sıcaklık Ölçümü İçin Yerel Sıcaklık Noktalarının Belirlenmesi ve Termoeleman Bağlantıları	84
2.4.	DeneySEL Yöntem	86
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	90
3.1.	Grafit Köpük Yığın Yoğunluğunun FDM Sızdırmazlık Verimliliği Üzerindeki Etkisi.....	90
3.2.	Grafit Köpük Yığın Yoğunluğunun Gözeneklilik ve Etkin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi.....	92
3.3.	Yalın Batarya Paketi Performans Testleri	93
3.3.1.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 13,4 A (1 C)	94
3.3.2.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 30 A (≈2,25 C).....	97
3.3.3.	Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 13,4 A (1 C)	99
3.3.4.	Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 30 A (≈2,25 C).....	101
3.3.5.	Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 13,4 A (1 C)	104
3.4.	Kompozit Grafit/FDM(RT-42) Batarya Paketi Performans Testleri	106
3.4.1.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 13,4 A (1 C)	107
3.4.2.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 30 A (≈2,25 C).....	110
3.4.3.	Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 13,4 A (1 C)	113
3.4.4.	Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 30 A (≈2,25 C).....	116
3.4.5.	Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 13,4 A (1 C)	118
3.5.	Kompozit Grafit/FDM(RT-35) Batarya Paketi Performans Testleri	121
3.5.1.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 13,4 A (1 C)	121
3.5.2.	Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 30 A (≈2,25 C).....	124

3.5.3. Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 13,4 A (1 C)	127
3.5.4. Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 30 A ($\approx 2,25$ C)	130
3.5.5. Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 13,4 A (1 C)	133
3.6. Farklı Yığın Yoğunluklarındaki Kompozit Grafit/FDM Batarya Paketlerinin Performans Testleri	135
3.6.1. Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 13,4 A (1 C)	136
3.6.2. Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 30 A ($\approx 2,25$ C)	141
3.6.3. Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 13,4 A (1 C)	147
3.6.4. Performans Testi, Tortam = +35 °C ve I = 30 A ($\approx 2,25$ C)	151
3.6.5. Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 13,4 A (1 C)	155
3.6.6. Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 30A A (2,25 C)	160
4. SONUÇLAR	161
5. ÖNERİLER	164
6. KAYNAKLAR	165
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA LİTYUM İYON BATARYALARIN ISIL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Ahmet AKTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin Arıcı
2025, 181 Sayfa

Bu çalışmada, geliştirilen grafit/FDM batarya paketlerinin ısı ve elektriksel performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel incelemede 6S4P hücre yapılandırmasına sahip batarya paketleri kullanılmıştır. Deneyler farklı matris yığın yoğunlukları (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L), farklı FDM türleri (RT-35 ve RT-42), farklı ortam sıcaklıkları (-15°C, 25°C ve 35°C) ve farklı deşarj akımı (13,4 A ve 30 A) değerleri için gerçekleştirilmiştir. Kompozit batarya paketleri ile yalın batarya paketinin performansları karşılaştırılarak tartışılmıştır. Yüksek yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerinin ısı yönetiminde ve elektriksel performansında daha fazla iyileşmeler olduğu görülmüştür. Bu iyileşmeler, 25 °C ve 30 A performans testinde, grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için yalın batarya paketine göre maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı açısından sırasıyla %21,4 ve %68,8 şeklinde gerçekleşmiştir. Yine aynı kompozit batarya paketi 35 °C ve 30 A performans testinde güvenilir çalışma süresi, kapasite ve enerji kapasitesi açısından yalın batarya paketine göre sırasıyla %91, %91 ve %71 daha üstün performans göstermiştir. Sonuç olarak, kompozit grafit/FDM yapıların lityum-iyon batarya paketlerinde kullanılmasının batarya performansını, güvenliğini ve verimliliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon bataryalar, pasif sıcaklık kontrolü, termal yönetim sistemleri, kompozit (Grafit/FDM) termal yönetim sistemi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THERMAL BEHAVIOR OF LITHIUM-ION BATTERIES UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Ahmet AKTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI
2025, 181 Pages

In this study, the thermal and electrical performances of composite graphite/PCM battery packs were investigated experimentally. Battery packs with 6S4P cell configuration were used in the experimental investigation. The experiments were carried out for different matrix bulk densities (50 g/L, 75 g/L and 100 g/L), different PCM types (RT-35 and RT-42), different ambient temperatures (-15°C, 25°C and 35°C) and different discharge currents (13.4 A and 30 A). The performances of the composite battery packs and the bare battery pack were compared and discussed. It was observed that there are further improvements in thermal management and electrical performance of graphite/PCM(RT-42) battery packs with high bulk density. These improvements were 21.4% and 68.8% for graphite(100g/L)/PCM(RT-42) battery pack compared to bare battery pack in terms of maximum operating temperature and maximum temperature difference in 25 °C and 30 A performance tests, respectively. Again, the same composite battery pack showed 91%, 91% and 71% superior performance compared to bare battery pack in terms of reliable operating time, capacity and energy capacity in 35 °C and 30 A performance tests, respectively. As a result, it was seen that the use of composite graphite/PCM structures in lithium-ion battery packs significantly increases battery performance, safety and efficiency.

Key Words: Lithium-ion batteries, passive temperature control, thermal management systems, composite (Graphite/PCM) thermal management system

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Küresel ölçekte batarya talebinin yıllara göre dağılımı (Liu vd., 2022).	1
Şekil 2. Farklı uygulamalar için batarya gereksinimi oranları (Liu vd., 2022).	2
Şekil 3. (a) LIB'lerin bileşenlerinin şematik gösterimi (b) LIB'lerin çalışma prensiplerinin şematik gösterimi (Li ve Xia, 2017; Ma vd., 2018)	9
Şekil 4. Şekillerine göre LIB'ler (a) Silindirik hücre (b) Kese tipi hücre (c) Prizmatik hücre (d) Düğme tipi hücre (Murashko, 2016; Liang vd., 2019; Villa Salazar vd., 2024).	10
Şekil 5. Isı borusu ve sıvı soğutmalı hibrit batarya ısıl yönetim sistemine bir örnek (Gan vd., 2020).....	25
Şekil 6. FDM'lerin sınıflandırılması (Jaguemont vd., 2018).....	26
Şekil 7. Batarya modülü a) Bakır köpük-FDM, alt görünüm b) Bakır köpük-FDM, üst görünüm c) Saf FDM, alt görünüm (d) Saf FDM, üst görünüm (Sun vd., 2023).	41
Şekil 8. İki farklı modül yaklaşımının şematik gösterimi a) Boru şeklinde-KFDM içeren modül b) Küboid KFDM içeren modül (Wu vd., 2021).	60
Şekil 9. GG/FDM/sıvı soğutma hibrit ısıl yönetim sistemi (Zhu vd., 2022)	62
Şekil 10. Kompozit ısıl yönetim sistemi ve batarya paketi üç boyutlu modelinin (a) üst ve (b) alt görünüşleri.....	71
Şekil 11. Genişletilebilir grafiten GG/FDM kompozit matris üretim süreci	71
Şekil 12. Presleme ile grafit köpük matris oluşturmak için üretilen kalıp.....	72
Şekil 13. Grafit köpük matris üst görünüşü	72
Şekil 14. Grafit genişletme süreci (a) Fırına ön penceresi açık şekilde yerleştirilmiş genişletme kabı (b) Fırından alınan ve soğutulan genişletme kabı içerisindeki genişletilmiş grafit (c) Genişletilmiş grafit	73
Şekil 15. Genişletilmiş grafitin sıkıştırılması süreci (a) Kalıba genişletilmiş grafit doldurulması (b) Genişletilmiş grafitin preslenmesi (c) İtici zımba yardımı ile preslenen genişletilmiş grafitin kalıptan çıkarılması (d) Kalıp ağzındaki preslenmiş ürün	74
Şekil 16. Genişletilmiş grafitte FDM emdirme süreci (a) Presleme sonucu oluşan Grafit Matris (b) Grafit Matrise FDM Emdirilmesi (c) Grafit/FDM Kompozit Matris.....	76
Şekil 17. GG/FDM kompozit matrise sızma testi uygulanması	77
Şekil 18. Yalın paket ve test bağlantı elemanları.....	82
Şekil 19. Kompozit batarya paketi (a) Tasarımın üstten görünüşü (b) Tasarımın alttan görünüşü (c) Tasarımın izometrik görünüşü (d) Laboratuvar ortamında oluşturulan batarya paketi.....	83

Şekil 20.	Grafit/FDM kompozit batarya paketi patlatılmış görünümü	83
Şekil 21.	Çizim üzerinde sıcaklık ölçüm noktaları (a) Tekli batarya üzerinde 6 adet termoelemanın konumlandırılması (b) Pakette batarya numaralandırılmaları ve sıcaklık ölçüm noktaları (c) Batarya paketinin üst görünüşü ve sıcaklık ölçümü için seçilen kırmızı referans bölge	84
Şekil 22.	Referans olarak seçilen bataryalar ve termoeleman yerleşimi	85
Şekil 23.	Deney düzeneği ve kullanılan cihazlar	86
Şekil 24.	Farklı yığın yoğunluğuna sahip kompozit yapıların ortalama FDM sızıntısı oranları	91
Şekil 25.	Farklı yığın yoğunlukları ve farklı FDM türlerinden oluşan grafit/FDM matrislerin gözeneklilik ve etkili gözeneklilikleri	93
Şekil 26.	Yalın paket (25 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	94
Şekil 27.	Yalın Paket (25 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	95
Şekil 28.	Yalın paket (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	97
Şekil 29.	Yalın Paket (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	99
Şekil 30.	Yalın paket (35 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	100
Şekil 31.	Yalın Paket (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	101
Şekil 32.	Yalın paket (35 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	102
Şekil 33.	Yalın Paket (35 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	103
Şekil 34.	Yalın paket (-15 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	104
Şekil 35.	Yalın Paket (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	105
Şekil 36.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	108
Şekil 37.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	109
Şekil 38.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	111

Şekil 39.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	112
Şekil 40.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	114
Şekil 41.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	115
Şekil 42.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	116
Şekil 43.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	118
Şekil 44.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	119
Şekil 45.	Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	120
Şekil 46.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	122
Şekil 47.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	123
Şekil 48.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	125
Şekil 49.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	126
Şekil 50.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	128
Şekil 51.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	130
Şekil 52.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	131

Şekil 53.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	132
Şekil 54.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri	134
Şekil 55.	Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre	135
Şekil 56.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (25 °C, 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi.....	137
Şekil 57.	Batarya paketlerinin (25 °C, 13,4 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları.....	140
Şekil 58.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (25 °C, 30 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi.....	143
Şekil 59.	Batarya paketlerinin (25 °C, 30 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları.....	146
Şekil 60.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (35 °C, 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi.....	148
Şekil 61.	Batarya paketlerinin (35 °C, 13,4 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları.....	150
Şekil 62.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (35 °C, 30 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi.....	152
Şekil 63.	Batarya paketlerinin (35 °C, 30 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları.....	154
Şekil 64.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (-15 °C, 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi.....	157
Şekil 65.	Batarya paketlerinin (-15 °C, 30 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları.....	159
Şekil 66.	Batarya paketlerinin elektriksel performansları (-15 °C, 30 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman	160

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 1. Batarya tipleri ve özellikleri (Yong vd., 2015; Zhao 2020; Warrior 2022; Şen vd., 2024).....	7
Tablo 2. LIB’lerin şekillerine göre karşılaştırılması (Osmani vd., 2023).....	11
Tablo 3. Çeşitli LIB’ler ve özellikleri (Babu Sanker & Baby, 2022; Thakur vd., 2020; Zhao, 2020; Liu vd., 2017).....	13
Tablo 4. Batarya ısı yönetim sistemleri (BIYS) (Ghaeminezhad vd., 2023).....	18
Tablo 5. Zorlamalı hava akışının batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar.....	19
Tablo 6. Doğrudan sıvı soğutma ile bazı soğutma sıvılarının batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar (Wu vd., 2024)	21
Tablo 7. Dolaylı temaslı sıvı soğutma yaklaşımları ve bu yaklaşımlara ait batarya ısı yönetim sistemlerinin incelendiği çalışmalar (Zhao vd., 2023b).....	22
Tablo 8. Farklı yapıdaki FDM’lerin termofiziksel özellikleri (Kharabati & Saedodin, 2024)	26
Tablo 9. FDM’ye çeşitli katkı maddeleri ilavesinin batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar.....	28
Tablo 10. Metal köpük veya metal yapı /FDM etkisinin batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar.....	35
Tablo 11. Genişletilebilir grafit/FDM kompozit ısı yönetim sistemlerinin bataryalar üzerinde uygulandığı çalışmalar	42
Tablo 12. Üretim yöntemine göre ısı iletim katsayısının incelendiği çalışmalar.....	65
Tablo 13. RT 35’e ait termofiziksel özellikler (Rubitherm, 2024)	75
Tablo 14. RT 42’ye ait termofiziksel özellikler (Rubitherm, 2020)	75
Tablo 15. Grafit/RT-35 kompozit matris emdirme ve sızıntı testi sonuçları	77
Tablo 16. Grafit/RT-42 kompozit matris emdirme ve sızıntı testi sonuçları	78
Tablo 17. Saf parafin ve grafit/FDM matris özellikleri	80
Tablo 18. Panasonic-Sanyo NCR18650 GA lityum iyon hücre özellikleri (Nguyen, 2021; Panasonic, t.y.).....	81
Tablo 19. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler.....	87

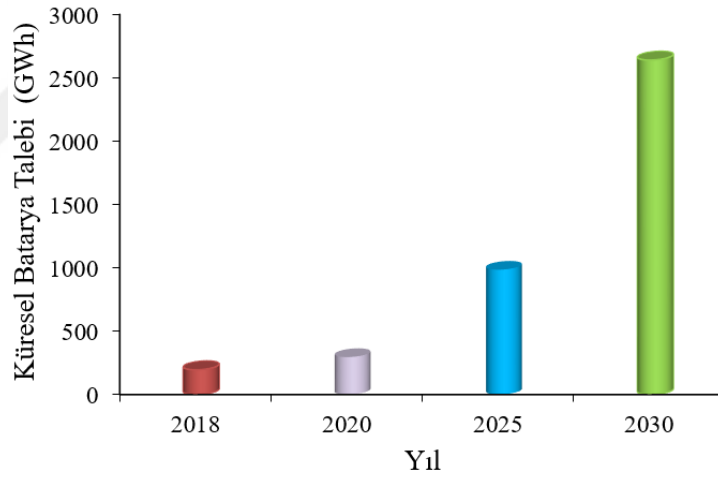
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Akım Şiddeti (Amper)
Ah	: Kapasite (Amper-Saat)
AIYS	: Aktif ısıl yönetim sistemi
BIYS	: Batarya ısıl yönetim Sistemi
C	: Şarj veya Deşarj Oranı
Cp	: Özgül Isı (J/gK)
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
GG	: Geniştirilmiş Grafit
GI	: Gizli Isı (J/g)
h	: Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² .K)
k	: Isı İletim Katsayısı (W/m.K)
$KFDM$	: Kompozit Faz Değiştiren Malzeme
LIB	: Lityum-iyon Batarya
PA	: Parafin
PIYS	: Pasif ısıl yönetim sistemi
RT	: Üreticinin belirlediği FDM kodu
SoC	: Şarj doluluk oranı (0-1 arasında)
T	: Sıcaklık (°C)
T_E	: Erime sıcaklığı (°C)
V	: Gerilim (Volt)
Wh	: Enerji Kapasitesi (Watt-Saat)
XSXP	: X adet seri X adet paralel bağlantı

1. GENEL BİLGİLER

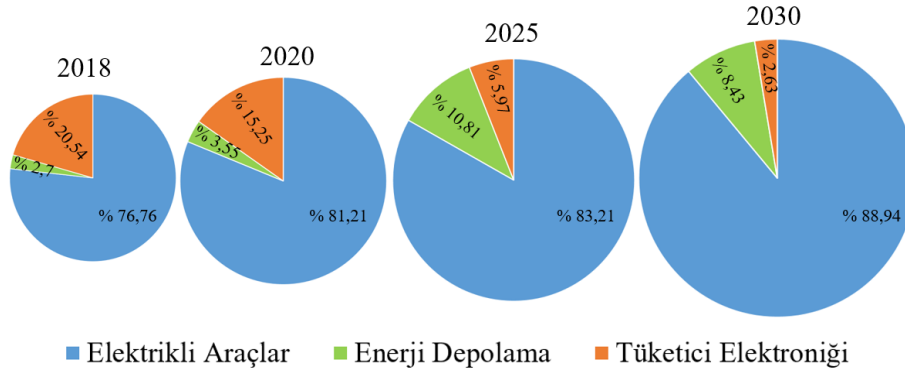
1.1. Giriş

Geçen yüzyılın başından buyana otomotiv endüstrisi ürünü olan makinaların fosil yakıt kullanımı sonucunda bu yakıtların giderek azalması ve çevre kirliliğinin artması gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla, birçok ülkede elektrikli taşıtlara geçiş süreci başlamış olup bu kapsamdaki nicelik ve çeşitlilik hızla artmaktadır (Li vd., 2024b). Bu artışla birlikte oluşan batarya talebinin yıllara göre değişim eğilimi Şekil 1’de görülmektedir. Burada, 2020 yılında batarya gücü talebindeki artışın 2018 yılına göre %50 civarında olduğu, bu artışın, 2025 yılı itibari ile yaklaşık %400 olmasının beklendiği ve 2030 yılında ise %1250’ye ulaşmasının tahmin edildiği görülmektedir. (Liu vd., 2022).



Şekil 1. Küresel ölçekte batarya talebinin yıllara göre dağılımı (Liu vd., 2022).

Günümüzde bataryalar yalnızca elektronik cihazlar ve elektrikli taşıt uygulamalarında değil hemen hemen tüm alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşınabilir elektroniklerden şebeke elektriği depolamaya, ulaşım sektöründen havacılık ve uzay teknolojilerine ve medikal cihazlara kadar oldukça geniş bir alanda bataryalardan yararlanılmaktadır. Şekil 2’de, elektrikli ulaşım araçlarının modern batarya endüstrisine kazandırdığı ivme sonucu 2018 yılından başlayarak 2030 yılına kadar çeşitli batarya uygulamalarının toplam talebe göre dağılımları görülmektedir.



Şekil 2. Farklı uygulamalar için batarya gereksinimi oranları (Liu vd., 2022).

Şekil 1 ve Şekil 2 beraber değerlendirildiğinde, toplam küresel batarya gücü ihtiyacının her geçen yıl artacağı anlaşılmaktadır. Bu durum, elektrikli taşıt pazar payının gelecek yıllarda toplam batarya güç ihtiyacının önemli bir kısmını oluşturacak şekilde yükseleceğini ve 2030 yılında bu payın %89 olacağını göstermektedir.

Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu (200–770 Wh/L) ve hücre ve paket seviyelerinde mükemmel şarj-deşarj verimliliği (>%90) nedeniyle, lityum iyon bataryalar (LIB'ler) elektrikli taşıtlar güç sağlamak için en çok tercih edilen enerji depolama cihazlarıdır. Ayrıca, temiz ve çevre dostu kullanım sunarlar (Janek and Zeier, 2016; Zhao, 2020), sıklıkla 1000 döngüyü aşarlar ve diğer batarya teknolojilerinin çoğuna kıyasla daha uzun bir çalışma ömrüne sahiptirler. LIB'ler, ayda yaklaşık %1,5-2 olan düşük kendi kendinedeşarj oranları sayesinde, kullanılmadıklarında şarjlarını uzun süre muhafaza ederler ve hafif yapıları nedeniyle elektrikli taşıtlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi uygulamalar için kullanım üstünlüklerine sahiptirler. Bazı batarya türlerinin esnek bir şekilde şarj edilmesini engelleyen ve kapasitesinin önemli bir kısmını kaybetmesine neden olan hafıza etkisinden etkilenmezler. Öne çıkan diğer özellikleri ise, hızlı şarj edilmeye uygun olmalarıdır. (Maiorino vd., 2024). Uygun bir batarya ısı yönetim sistemi stratejisi ile fazla ısının etkili bir biçimde sistemden uzaklaştırılması sonucu LIB'ler uzun çevrim ömrü, faaliyet esnasında itimat edilebilir güvenlik ve yüksek performans gibi arzu edilen özelliklere kavuşur ve sahip oldukları potansiyelden daha verimli bir şekilde yararlanır.

Bataryalar hakkında temel bilgilere sahip olmak için bataryaların tarihsel gelişimleri hakkında bilgi sahibi olmak gereklidir. LIB'lerin diğer şarj edilebilir batarya türleri ile kıyaslanması ve belirgin bir şekilde üstünlüklerinin ortaya konulması amacıyla diğer batarya türleri ile karşılaştırmak gerekir. Ayrıca, LIB'lerin bileşenlerini ve çalışma prensiplerini

anlamak, ayırt edici özelliklerini kavrayabilmek için önemlidir. Ek olarak, LIB'ler form faktörlerine (şekillerine) ve kullanılan katot malzemelerine göre kategorize ederek de sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, karşılaştırmalı analizi kolaylaştırır ve her türün kendine özgü üstünlük ve sakıncalarının kapsamlı bir şekilde tartışılmasına olanak tanır.

Bataryaların şarj ve deşarj süreçlerindeki ısı üretimi ve buna bağlı olarak gerçekleşen sıcaklık artışı nedeniyle tasarımlarının ısı kontrol sistemi ile birlikte yapılması gerekmektedir. Böylece en uygun çalışma sıcaklık aralığını ve kritik sıcaklık eşiklerini belirlemek, önerilen ısı yönetim sisteminin yeterliliğini değerlendirmek mümkündür. Çeşitli batarya ısı yönetim sistemlerini (BIYS) tartışmak ve karşılaştırmalı olarak üstünlük ve sakıncalarını ortaya koymak bu sistemlerin seçimine yardımcı olur. Batarya ısı yönetim sistemi analizi için gerekli olan konular izleyen alt başlıklarda aşağıdaki şekilde sıralanmıştır;

- Bataryaların tarihsel gelişimi,
- İkincil (şarj edilebilir) batarya türleri ve karşılaştırılmaları,
- LIB'ler ve çalışma prensipleri,
- LIB'lerin şekillerine göre sınıflandırılması,
- LIB'lerin yapısında kullanılan elektrotlara göre sınıflandırılması,
- LIB'lerde ısı üretimi,
- Sıcaklığın LIB'ler üzerindeki etkisi
- LIB'ler için ısı yönetim sistemleri (BIYS)

1.2. Bataryaların Tarihsel Gelişimi

Aktif malzemelerinde meydana gelen yükseltgenme-indirgenme (redoks) tepkimeleri ile kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üretebilen cihazlara batarya adı verilmektedir (Sarma & Shukla, 2018). Volta 1800 yılında kraliyet topluluğuna deneylerini anlattığı bir mektup yazmıştır bu nedenle ilk batarya icadı Volta'ya atfedilmektedir (Volta & Banks, 1800). Volta kendi batarya tasarımına "yapay elektrik organ" adını vermişti ve bu batarya bir bezle ayrılmış gümüş ve çinko disklerin tuzlu suya batırılmasıyla elde edilmiş basit bir tasarımdı. Araştırmacılar Volta'nın tasarımından yola çıkarak birçok farklı tasarım geliştirdiler ve bataryalar çeşitli uygulamalarda kullanılmaya başlandı. Bu uygulamaların ilki ve en dikkat çekici olanı bataryaların telgraf ağlarında kullanılmasıydı. Planté kurşun elektrotlardan oluşan ve sülfürik asidi elektrolit ortamı olarak kullanan ilk şarj edilebilir hücreyi geliştirdi.

Geliştirdiği ürün günümüzde kullanılan kurşun-asit bataryaların bir benzeriydi (Planté, 1860; Hunt, 2017). 1866 yılında Fransız mühendis Georges-Lionel Leclanché, sulu amonyum klorür çözeltisine daldırılmış bir çinko çubuk anot ve bir manganez oksit-karbon karışımı katot bazlı bir batarya geliştirdi. Bu tasarım, modern karbon-çinko ve alkalın hücrelerinin temelini oluşturmaktadır. 1899 yılında ise İsveçli mühendis Waldmar Jungner, araç ateşlemesi ve taşınabilir aletler için güç kaynağı da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için popüler bir seçim haline gelen şarj edilebilir nikel-kadmiyum bataryaları icat etmiştir (Scrosati, 2011).

LIB'lere geldiğinde ise, ilk olarak LIB'lerin geleceğini şekillendiren lityum araya ekleme mekanizması 1970'lerde Exxon araştırma ve mühendislik şirketinde çalışan Michael Stanley Whittingham tarafından ortaya konulmuştur. Böylelikle, yüksek enerji yoğunluklu ve yeniden şarj edilebilir bataryalar oluşturabilmek için LiTiS_2 katot geliştirildi (Whittingham, 1976; Zhao, 2020). Takiben, 1980'lerin başında iki interkalasyon elektrodu arasında lityum iyonlarının transferi ile çalışan batarya sallanan sandalyede kullanıldı (Scrosati, 2011). Yine, John B. Goodenough ve meslektaşları tarafından 1980'lerde geliştirilen LiCoO_2 katodu, LIB'lerin enerji yoğunluğunu büyük ölçüde artırdı. Karbon anot ve LiCoO_2 katot kullanan ilk ticari LIB örneği, 1983'te Akira Yoshino tarafından oluşturuldu (Zhao, 2020). Manganez spinel katot, Goodenough ve ekibinin ikinci önemli keşfiydi. Çalışmalarında, oda sıcaklığında LiMn_2O_4 katot elde edildi (Thackeray vd., 1983). 1992 yılı Li-iyon bataryaların ticarileşmesi açısından en önemli dönüm noktalarından birisiydi. Çünkü Sony firması Akira Yoshino tarafından geliştirilen LiCoO_2 katot malzemesini kullanarak ilk ticari LIB'leri piyasaya sürdü (Scrosati, 2011; Zhao, 2020). 1997 yılında, Goodenough ve ekibi bir başka katot malzemesi olan LiFePO_4 'ü geliştirdiklerini duyurdu. Bu katot malzemesi lityum kobalt oksit'e göre düşük maliyet ve yüksek güvenlik sağlayan iyi bir alternatif sundu (Padhi vd., 1997). 2001 yılı ise NMC katot keşfi açısından oldukça önemli bir yıldır. Bu yıl içerisinde birbirinden bağımsız olarak hem Thackeray'ın Chicago Üniversitesi'ndeki araştırma ekibi hem de Lu'nun 3M şirketindeki araştırma grubu, NMC katodu için patent başvurularında bulundular. 2010 yılına kadar, LIB'ler üzerinde performans, kapasite, çevrim ömrü ve güvenlik açısından birçok çalışma titizlikle devam etti. 2010 yılında yapılan çalışmalar neticesinde, LIB'lerin geldiği seviye elektrikli taşıtların üretilmesi ve piyasaya sürülmesinin önünü açtı. Böylelikle, küresel ölçekte bataryalara duyulan talep büyük bir artış gösterdi (Zhao, 2020). Günümüzde, bataryaların ve elektrikli taşıtların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır ve bu taşıtların yakın gelecekte daha da

yaygınlaşacağı yerdedir. Bu nedenle, bataryalar üzerinde gerçekleştirilen güvenlik, kapasite (elektrikli taşıtlar için menzil), performans (elektrikli taşıtlar için enerji yoğunluğu veya güç) ve çevrim ömrü iyileştirme çalışmaları hız kesmeden devam etmektedir.

1.3. İkincil (Şarj Edilebilir) Batarya Türleri ve Karşılaştırılmaları

Bataryalar birincil ve ikincil bataryalar olmak üzere iki grup altında incelenmektedirler. Birincil tip bataryalar elektro-kimyasal olarak tek yönlü tepkimelere dayanmaktadır ve tekrar kullanım imkânı sunmazlar. Bu nedenle, bu tip bataryalar taşınabilir küçük tüketici elektronikleri için tercih edilmekteyken, daha fazla enerji harcayan elektronik cihazlar ve elektrikli taşıtlar için kullanılması çok maliyetli olması nedeniyle uygun değildir. İkincil tip bataryalar ise iki yönlü elektro-kimyasal tepkimeler sonucu yeniden şarj edilebilen bataryaların genel adıdır (Murashko, 2016). Bu nedenle, bu tip bataryalar sık kullanılan, yüksek enerji ve güç gerektiren uygulamalar için tercih edilirler. Günümüzde ikincil bataryalar cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, post cihazları ve elektronik yazar kasalar, telekomünikasyon ve haberleşme cihazları, savunma sanayii, havacılık ve uzay çalışmaları, enerji depolama ve elektrikli taşıtlar gibi (elektrikli taşıtlar, hibrit elektrikli taşıtlar, elektrikli scooter, elektrikli mobilet, elektrikli motosiklet vb.) birçok uygulamada geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yaygın kullanım alanına sahip farklı türlerdeki ikincil bataryaların özelliklerini, üstünlük ve sakıncalarını tartışmak ve kullanım amacına göre bataryalar arasında seçim yapmak son derece önemlidir.

Farklı ikincil tip batarya türlerinin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kurşun-asit bataryalar taşımacılıkta kullanılan ilk bataryalardır. Bu bataryalar ismini yapısında bulunan kurşun elektrotlar ve asitten almaktadır, doyuma ulaşmış bir teknolojidir ve oldukça ucuzdur. Ancak, düşük enerji yoğunluğu, hafif olmaması ve elektrolit miktarının sürekli kontrol edilme gereksinimi gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır (Yong vd., 2015). Nikel-kadmiyum bataryalar kurşun-asit bataryalara kıyasla çalışma esnasında daha yüksek güç ve enerji sunabilen bataryalardır. Çalışma esnasında güvenilir ve kullanım ömürleri uzundur. Bu bataryalar daha çok, uzay ve savunma sanayii uygulamalarında kullanıldı. Fakat hafıza etkisi ve yapısında bulunan kimyasalların zararlı etkiler üretme riskinden dolayı artık yaygın olarak kullanılmamaktadır (Murashko, 2016). Nikel metal hidrit (Ni-MH) bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre yüksek hacimsel enerji ve güç, güvenlik, çevrim ömrü performansı ve aşırı şarj/deşarj durumlarına karşı dayanıklılık gibi üstünlükler

göstermektedir. Yüksek maliyet, nadiren görülen hafıza etkisi ve aylık %20'ye kadar kendini deşarj etme gibi olumsuz yönler ise istenmeyen özellikleri arasında yer almaktadır (Yong vd., 2015; Murashko, 2016). Ni-MH bataryalarda maksimum potansiyellere de ulaşmış olup, elektrikli taşıtlar vb. büyük çaplı uygulamalarda kullanılmaya aday olarak görülmemektedir (Özcan vd., 2021).

LIB'ler kurşun asit, nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel metal hidrit (Ni-MH) bataryalara göre yüksek enerji ve güç yoğunluğu, hafif olması, hızlı şarj edilebilme, uzun çevrim ve raf ömrü, düşük kendi kendini deşarj gibi öne çıkan özellikler sunmaktadır (Yong vd., 2015; Özcan vd., 2021). Bu bataryalar günümüzde elektrikli taşıtlardan teknolojik cihazlara tüketici elektroniğinden şebeke için enerji depolamaya birçok uygulamada kullanılmaktadır. Çinko-hava (Zn-hava), Lityum-sülfür (Li-S) ve Lityum-hava (Li-hava) bataryaları ise gelecek vadeden batarya tipleri arasında yer almaktadır. Bu bataryalar LIB'ler ile kıyaslandığında daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmanın avantajını taşımaktadırlar. Çinko hava bataryaları düşük gerilim değerleri sunmasından dolayı zayıf özgül güç ve düşük enerji verimliliğinin yanı sıra oldukça düşük çevrim ömrü dezavantajına sahiptirler. Dolayısıyla, elektrikli araç vb. yüksek güç gerektiren uygulamalarda birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktansa, destekleyici bataryalar olarak uzun menzil sağlamak amacıyla LIB'lere ek olarak kullanılmaları düşünülebilir (Yong vd., 2015; Li ve Lu, 2017; Özcan vd., 2021). Yapısında katot malzemesi olarak sülfür ve anot malzemesi olarak lityum metal barındıran bataryalara lityum sülfür bataryalar adı verilmektedir. Ucuz olması ve yüksek teorik kapasiteye sahip olması gibi özelliklerinden dolayı 1960'lardan beri Li-sülfür bataryalar üzerinde çalışmalar sonucu kayda değer enerji yoğunluğu değerlerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte, katodun elektronik iletkenliği azdır ve bu bataryalar düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrüne sahiptir. Ayrıca, %8-15 arası kendi kendini deşarj problemi aşılması gereken önemli bir sorundur (Özcan vd., 2021; Liu vd., 2022). Li-hava bataryalar güç üretmek için atmosferde bulunan oksijenden faydalanan ve yapısında lityum metal elektrot içeren bataryalardır. Lityum sülfür bataryalardan daha yüksek enerji yoğunluğu sunmaktadırlar. Sulu olmayan elektrolit içeren lityum hava bataryaları teorik olarak son derece yüksek kütleli enerji yoğunluğu olan $\sim 11.700 \text{ Wh/kg}$ a ulaşabilir ve enerji yoğunluğu bakımından benzinle rekabet edebilirler. Elektrikli taşıtlar için kullanımı esnasında bataryayı atmosferik etkilerden (nem, karbondioksit vb.) koruyan katmanlar göz önünde bulundurulduğunda enerji yoğunluğunun teorik değerlere asla ulaşamayacağı bilinmektedir. Lityum elektrotun hava ile temasından kaynaklanan nemin neden olduğu

lityum-metal yan tepkimeleri nedeniyle çevrim ömürlerini iyileştirmek oldukça zordur. Çevrim ömürleri 100 çevrim civarında olup pratik kullanım için çok düşüktür. Fakat düşük maliyetinden faydalanmak üzere LIB'ler gibi tamamlayıcı bir paket ile birlikte kullanımı elektrikli taşıtların sürüş menzilini arttırmak için lityum hava bataryaların hala çekici bir seçenek olarak kalmasını sağlamaktadır (Cano vd., 2018; Liu vd., 2022). Tüm bu bilgiler ışığında, LIB'lerin enerji depolama ve iletimi açısından en iyi alternatif elektrokimyasal enerji depolama cihazları olduğu kabul edilmektedir.

Tablo 1. Batarya tipleri ve özellikleri (Yong vd., 2015; Zhao 2020; Warrior 2022; Şen vd., 2024).

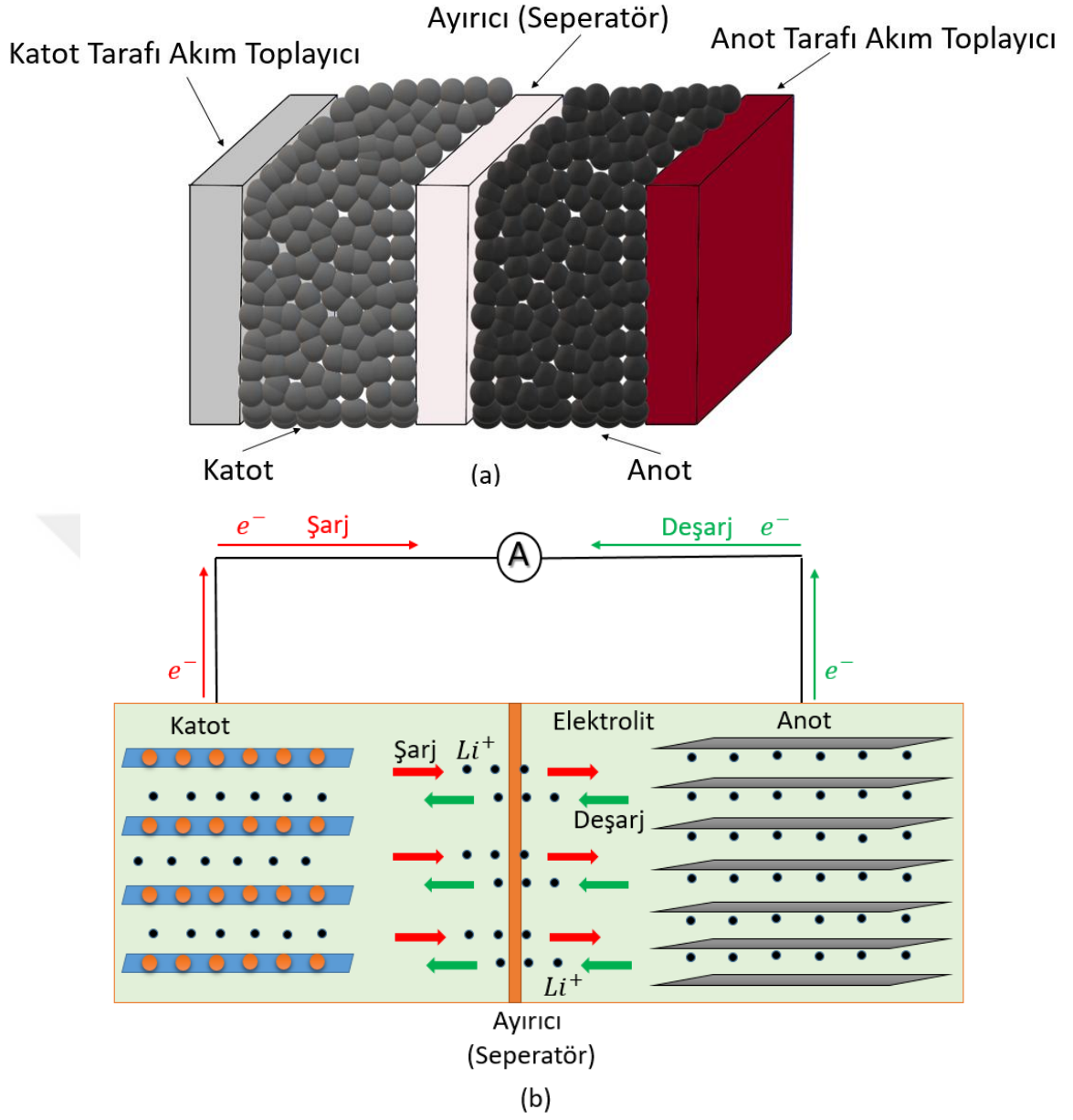
	Pb-asit	Ni-Cd	Ni-MH	LIB/ Li-Po	Zn- Hava)	Li-S	Li-Hava
Çalışma sıcaklık aralığı (°C)	-15 ve +50	-20 ve +50	-20 ve +60	-20 ve +60	-10 ve +55	-60 ve +60	-10 ve +70
Çevrim Ömrü	1000	2000	<3000	500-2000	200	300	100
Nominal Voltaj (V)	2	1,2	1,2	3,6-3,7	1,65	2,5	2,9
Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	35	50-80	70-95	100-265	460	350-650	1300-2000
Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	100	300	180-220	250-670	1400	350	1520-2000
Aylık Kendi Kendine Deşarj (%)	<5	10	20	<5	<5	8-15	<5
Hafıza Etkisi	Yok	Var	Nadiren	Yok	Yok	Yok	Yok

1.4. Lityum-iyon Bataryalar ve Çalışma Prensipleri

LIB'ler yapısında lityum barındıran çeşitli kimyalara sahip farklı performans ve özellikler sunan elektrokimyasal enerji depolama cihazlarıdır (Warner, 2015). Aylık %2'den az olan düşük kendiliğinden deşarj oranının yanı sıra, enerji verimliliğinin %95 civarında olması, hızlı şarj edilebilmesi ve yüksek performansa sahip olması, LIB'leri çeşitli amaçlar için enerji depolama cihazı olarak en çok rağbet edilen seçenek haline getirmiştir (Osmani

vd., 2023; Zhao vd., 2021). LIB'lerin temel bileşenleri şu şekilde sıralanabilir: anot, katot, elektrolit ve ayırıcı, akım toplayıcılar ve dış muhafaza (Zhi vd., 2022; Liu vd., 2017). Bataryanın negatif terminal bileşeni anot olarak adlandırılır ve negatif terminal tarafındaki akım toplayıcı üzerine kaplanmıştır. Bu bileşen grafit, yumuşak ve sert karbonlardan meydana gelmektedir. Akım toplayıcılar genellikle alüminyum, bakır ve benzeri metal malzemelerden oluşur. Pozitif terminal bileşeni ise katot olarak adlandırılır ve pozitif terminal tarafındaki akım toplayıcı üzerine kaplanmıştır. Katot farklı oranlarda çeşitli kimyalardan oluşur. Bunun nedeni, farklı kimyaların üstün özelliklerinden faydalanma çabasıdır (Warner, 2015). Bir diğer bileşen olan elektrolit ise bataryalarda anot ve katot arasında lityum iyonlarının iletimini sağlar ve yapısında lityum iyon iletken tuzları bulunur. Ayırıcı ise mikro gözenekli polimer ince film tabakadan meydana gelmekte ve elektrotları elektriksel olarak birbirinden izole etmektedir. Bir başka deyişle, bu tabaka lityum iyonların elektrotlar arasında hareketini kısıtlamazken, elektron hareketini tamamen kısıtlamaktadır. Son olarak, birisi anot diğeri katot tarafında olacak şekilde iki farklı plaka (genellikle alüminyum/bakır) ise şarj ve deşarj esnasında akım toplayıcı görevi görmektedir (Deng, 2015; Graf 2018; Aktürk & Türk, 2020).

Şekil 3'te LIB yapısının ve bileşenlerinin yansırı çalışma prensibi de şematik olarak gösterilmiştir. Şarj esnasında bataryaya yük uygulanmasını takiben katottan elektron salınımı sonucu pozitif yüklü lityum iyonlar ve elektronlar açığa çıkmaktadır. Pozitif yüklü lityum iyonlar elektrolit boyunca ayırıcı içerisinden, elektronlar ise harici devre üzerinden katottan anoda doğru hareket ederler ve lityum iyonlar anotta aktif malzemeye eklenir. Böylelikle elektrik enerjisi kimyasal olarak bataryada depolanır. Deşarj sırasında ise bu işlemler tersi yönünde gerçekleşmektedir. Anottan ayrılan lityum iyonları elektrolit boyunca elektronlar ise yine harici devre üzerinden katoda doğru hareket ederler ve elektron hareketinden kaynaklı olarak dış devre kullanılabilir elektrik devresi haline gelir (Aktürk, 2015; Aktürk & Türk, 2020). Şarj ($\rightarrow$) ve deşarj ($\leftarrow$) esnasında anot ve katot tarafında gerçekleşen tepkimeler ve genel tepkime aşağıda gösterildiği gibi ifade edilir. Tepkimelerde M geçiş metallerini temsil etmekte ve bir metalden veya birçok metalin farklı oranlarda birleşiminden oluşabilmektedir (Lavagna vd., 2020).



Şekil 3. (a) LIB'lerin bileşenlerinin şematik gösterimi (b) LIB'lerin çalışma prensiplerinin şematik gösterimi (Li ve Xia, 2017; Ma vd., 2018)

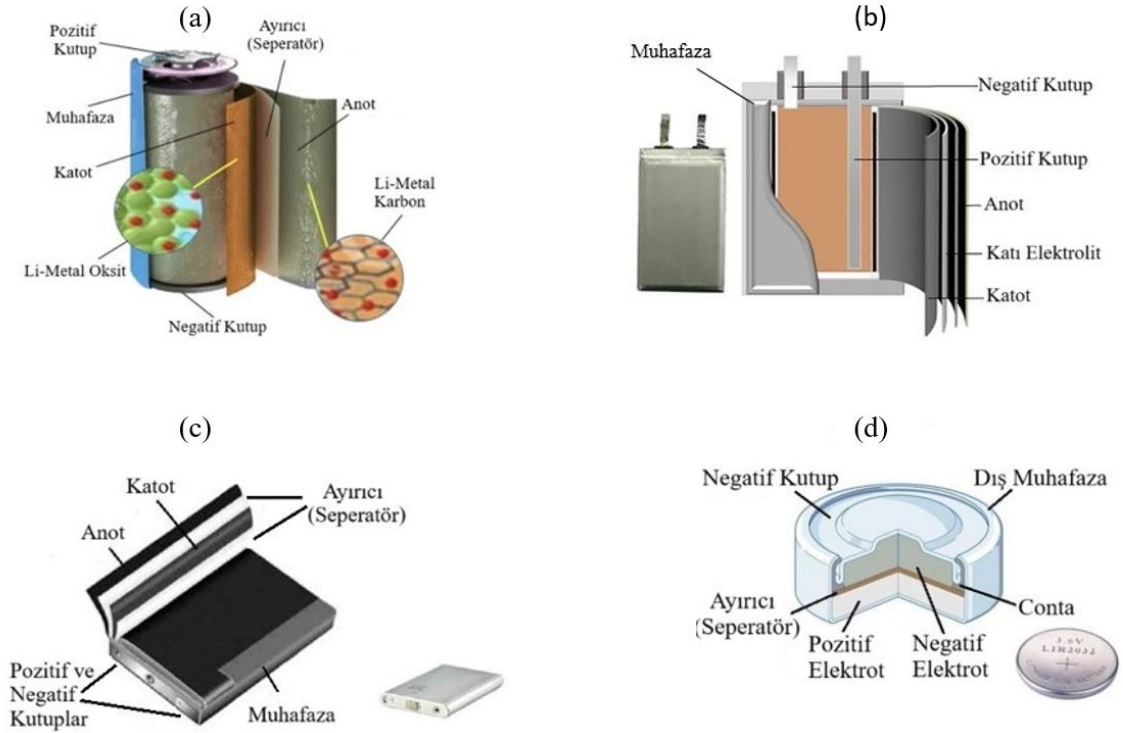
Katotta gerçekleşen tepkime : $LiMO_2 \rightleftharpoons Li_{1-y}MO_2 + yLi^+ + ye^-$

Anotta gerçekleşen tepkime : $C + yLi^+ + ye^- \rightleftharpoons Li_yC$

Genel Tepkime : $LiMO_2 + C \rightleftharpoons Li_yC + Li_{1-y}MO_2$

1.5. Lityum-iyon Bataryaların Şekillerine Göre Sınıflandırılması

LIB'ler için en çok kullanılan sınıflandırmalardan birisi de şekline ve hücre tipine göre yapılan sınıflandırmadır. Şekil 4'te silindirik, kese, prizmatik ve düğme tipi hücre şekilleri görülmektedir. Farklı şekillerdeki LIB'ler farklı kullanım ve tasarım üstünlüklerine sahiptirler. Cep telefonu üreticileri için kese tipi ve prizmatik bataryaların kullanımı daha uygun görülmekte ve genel bir kabul görmekteyken, dizüstü bilgisayarlarda silindirik hücreler kullanılmaktadır. Bunun nedeni tamamen batarya için ayrılan alan, gerekli gerilim değeri ve kapasiteye göre yapılan tasarımlardır. Elektrikli ve hibrit-elektrikli taşıtlardada ise daha yüksek gerilim ve kapasiteye duyulan ihtiyaçtan dolayı büyük kese tipi hücreler kullanılarak yapılan tasarımların yanında adedi kese tipi hücrelerden çok daha fazla silindirik hücreler kullanılarak yapılan tasarımlarda mevcuttur (Hunt, 2017).



Şekil 4. Şekillerine göre LIB'ler (a) Silindirik hücre (b) Kese tipi hücre (c) Prizmatik hücre (d) Düğme tipi hücre (Murashko, 2016; Liang vd., 2019; Villa Salazar vd., 2024).

Tablo 2. LIB'lerin şekillerine göre karşılaştırılması (Osmani vd., 2023).

Şekli	Avantajlar	Dezavantajlar
Silindirik	Yaygın Kullanım, Yüksek Tutarlılık, Mekanik Sağlamlık, Modern Teknoloji	Zayıf Isıl Güvenlik
Prizmatik	Geniş Isı Dağıtım Alanı, Emilen ısıyı kolayca dağıtır	Daha Çok Alan Gerektirmesi
Kese Tipi	Şekli Sabit Değil, Hafif, Yüksek Enerji Yoğunluğu, Yüksek paketleme verimliliği	Zayıf Mekanik Güvenilirlik, Şişme Riski

1.6. Lityum-iyon Bataryaların Yapısında Kullanılan Elektrotlara Göre Sınıflandırılması

İlk olarak anot bileşenini inceleyecek olursak; grafit, LIB'ler için en sık kullanılan ve en etkili anot malzemesidir. Grafitin sıklıkla tercih edilme sebebi bulunabilirliği, mükemmel elektrokimyasal kararlılığı, güvenliği ve şarj ve deşarj sırasında minimum genleşme hacmi sunması gibi avantaj sağlayan özellikleri olarak sıralanabilir (Itani & De Bernardinis, 2023). Grafit anot 372 mAhg^{-1} teorik ve $300\text{-}350 \text{ mAhg}^{-1}$ pratik özgül kapasiteye sahip olması nedeniyle günümüzde başlangıçta kullanılan yumuşak ve sert karbonların yerini tamamen almıştır (Scrosati & Garche, 2010; Asenbauer vd., 2020; Itani & De Bernardinis, 2023). Uzun çevrim ömrü, yüksek güvenlik seviyesi ve hızlı şarjı ile bilinen gelecek vadeden bir diğer anot malzemesi lityum titanat oksittir (LTO). Grafitin aksine, daha düşük bir enerji yoğunluğuna (175 mAhg^{-1}) sahiptir. Batarya uygulamalarında grafit anodun tercih edilme sebebi yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olmasıdır. LTO ise bir başka problem olan güvenlik endişelerini gidermek için tercih edilir (Da Silva Lima vd., 2023).

Pozitif elektrot olan katot bileşeni için Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Manganez Oksit (LMO), Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) ve Alüminyum Oksit (NCA) ticarileşmiş ve aktif şekilde kullanımda olan katot malzemeleridir. Batarya kapasitesi, enerji yoğunluğu, maliyeti, ısı kararlılığı, çevrim ömrü ve güvenliği büyük ölçüde kullanılan katot malzemesinin türüne bağlı olarak şekillenir (Itani & De Bernardinis, 2023; Zhi vd., 2022; Liu vd., 2017). Katot malzemeleri katmanlı, olivin ve spinel olmak üzere farklı yapılara sahiptirler (Dahlin ve Strøm, 2010). LCO, NMC ve NCA katot yapıları katmanlıdır. LCO katot, bazı katot malzemelerine kıyasla göreceli olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak, çalışması esnasında düşük ısı kararlılığı ve pahalı olması gibi sakıncalı özellikleri vardır. Bir diğer katmanlı yapı olan NMC, içerisinde

bulundurduğu Nikel, Manganez ve Kobalt oranlarına göre NMC111, NMC622, NMC811 gibi farklı şekillerde hazırlanabilir. Farklı oranların seçilme sebebi kararlılık, maliyet ve enerji yoğunluğu arasında bir denge kurmaktır. Örnek olarak, NMC111 dengeli bir katot tasarımıyken, NMC811 yüksek enerji yoğunluğuna odaklanır. Yine başka bir katmanlı yapı olan NCA, kararlılık ve yüksek enerji yoğunluğu sunar, ancak üretimi pahalı ve karmaşıktır. Spinel yapıya sahip LMO, iyi bir güç kapasitesi ve uygun fiyat sağlar, ancak daha düşük enerji yoğunluğu ve kararlılık sorunları vardır. Olivin yapıya sahip LFP, yüksek güvenlik ve uzun çevrim ömrü sağlar, ancak daha düşük voltaj ve enerji yoğunluğu sunmaktadır. Farklı katot malzemeleri ve LTO anottan oluşan LIB'lerin genel özellikleri ve karşılaştırılmaları Tablo 3'te sunulmuştur (Itani & De Bernardinis, 2023).

Sonuç olarak, Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) ve Nikel Manganez Kobalt (NMC811) katotlarının yüksek enerji yoğunluklarıyla öne çıktığı ve bu nedenle elektrikli taşıtlarda yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir. NCA'nın enerji yoğunluğu NMC'ye kıyasla genellikle daha yüksek değerlere sahiptir. Yüksek enerji yoğunluklarına sahip NCA bataryaları uzun sürüş mesafeleri gerektiren uygulamalar için idealdir ancak çalışmaları sırasında önemli miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan fazla ısıyı sistemden uzaklaştırmak, optimum çalışma sıcaklık aralığı sağlamak, güvenliği ve performansı garantilemek için NCA bataryalar etkili bir ısıl yönetim sistemine ihtiyaç duyarlar (Itani & De Bernardinis, 2023) . Bu bilgilere dayanarak, bu çalışmada ısıl yönetim sistemi tasarımında kullanılmak için 18650 silindirik NCA hücreler seçilmiştir.

Tablo 3. Çeşitli LIB'ler ve özellikleri (Babu Sanker & Baby, 2022; Thakur vd., 2020; Zhao, 2020; Liu vd., 2017).

	LCO	LMO	NMC	LPF	NCA	LTO
Ticarileşme Yılı	1991	1996	2008	1996	1999	2008
Katot	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiMnCoO ₂	LiFePO ₄	LiNiCoAlO ₂	Çeşitli
Anot	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Li ₄ T ₅ O ₁₂
Nominal Voltaj (V)	3,60	3,70	3,60 ve 3,70	3,20 ve 3,30	3,60	2,40
Çevrim	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000
Enerji Yoğunluğu (W.h/kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
Şarj C-oranı	0,7-1	0,7-1	0,7-1	1	0,7	1
Deşarj C-oranı	1	1	1	1	1	10
Isıl Sürüklenme Sıcaklığı (°C)	150	250	210	270	150	---
Uygulama Alanları	Cep telefonu, dizüstü bilgisayar, kamera	Medikal teçhizatlar, elektrik güç üniteleri	Elektrikli taşıtlar, Elektrikli bisikletler, medikal teçhizatlar	Mobil veya sabit uygulamalar	Elektrikli taşıtlar, Medikal teçhizatlar	Elektrik kontrol üniteleri
Üstün Yönleri	Yüksek enerji yoğunluğu, sınırlı özgül güç	Yüksek güç, LCO'dan daha güvenli	Yüksek kapasite ve güç, sıcaklık toleransı, uzun ömür, güvenlik	Yüksek Güvenlik ve zararlı madde bulundurmaması	Yüksek kapasite ve güç ve enerji yoğunluğu	Çok yüksek çevrim ömrü, hızlı şarj, güvenlik
Negatif Yönleri	Pahalı ve istikrarlı değil	Düşük özgül kapasite	Pahalı olması	Düşük kapasite, daha yüksek kendi kendine deşarj	Daha düşük çevrim ömrü ve pahalı olması	Düşük enerji yoğunluğu ve pahalı olması

1.7. Lityum-iyon Bataryalarda Isı Üretimi

Bataryalar şarj ve deşarj esnasında belli miktarda ısı üretmektedir ve bataryalarda sıcaklık tahmini yapabilmek için üretilen ısıнын bilinmesi veya hesaplanabilmesi gerekebilir. Bataryalarda üretilen ısı reaksiyon ısısı (Q_R), polarizasyon ısısı (Q_P) ve joule ısısının (Q_J) toplamı olarak,

$$Q_{\text{ü}} = Q_R + Q_P + Q_J \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Doyle vd., 1993).

Reaksiyon ısısı bataryanın kullanım esnasında meydana gelen elektrokimyasal tepkimeler sonucunda açığa çıkan ısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Huo vd.,2015):

$$Q_R = -IT \frac{dU_{OC}}{dT} \quad (2)$$

Burada, $T(K)$ bataryanın herhangi bir yük altında (açık devre) olmaması durumundaki sıcaklığı, $U_{OC} (V)$ açık devre voltajı, $I (A)$ deşarj sırasındaki akım değeridir. Buradaki dU_{OC}/dT terimi, şarj durumunun (SoC), sıcaklığın ve batarya yoğunluğunun bir fonksiyonudur ve entropi katsayısı olarak adlandırılır ve reaksiyon ısısı ile,

$$Q_R = T\Delta S \quad (3)$$

şeklinde ilişkilendirilir.

Denklem (3)'te, $\Delta S (W/K)$ entropi değişimini ifade etmektedir. Bataryaya deşarj ve şarj akımının uygulanmadığı durumda ölçülen batarya direncine saf direnç adı verilir $R_S (\Omega)$ ile gösterilir. Batarya deşarj esnasında elektrot potansiyeli açık devre potansiyelinden sapar ve bu sapmaya polarizasyon adı verilir. $R_P (\Omega)$ polarizasyon ve $R_T (\Omega)$ bataryanın deşarj altındaki direnci olmak üzere, açık devre voltajı ve batarya voltajı arasındaki fark IR_P şeklinde ifade edilir. Dolayısıyla, polarizasyon ısısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Huo vd., 2015).

$$Q_P = I(U_{OC} - V) = I^2 R_P = I^2 (R_T - R_S) \quad (4)$$

Joule ısısı ise saf direnci kullanarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_J = I^2 R_S \quad (5)$$

Yukarıda verilen denklemlerden yola çıkarak hacimsel ısı üretimi ($q_{\dot{u}}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$q_{\dot{u}} = j^2 R_T - jT \frac{dU_{OC}}{dT} = j(U_{OC} - V) - jT \frac{dU_{OC}}{dT} \quad (6)$$

Burada, j (A/m^3) birim hacim başına düşen akım veya hacimsel akım yoğunluğu olarak adlandırılır (Huo vd.,2015). Denklem (6) 'da $j(U_{OC}-V)$ ifadesi joule ısı ve elektrot aşırı potansiyellerinden meydana gelen ve tersinmez bir ısı üretimidir. Yine aynı denklemde yer alan $(jTdU_{OC}/dT)$ ifadesi ise entropi değişiminden kaynaklanan tersinir entropik ısı üretimi olarak adlandırılır. Hesaplama yapılırken, ilk olarak hücre voltajı ve hücre sıcaklığı deşarj sırasında ölçülmeli ve Denklem (6)' da yerine konulmalıdır. Daha sonra her bir SoC' da belirlenen açık devre voltajı ve entropi katsayısı değerleri de denklemde girilmesiyle ısı üretimi hesaplanır (Jindal vd., 2022).

1.8. Sıcaklığın Lityum-iyon Bataryalar Üzerindeki Etkisi

Şarj ve deşarj süreçleri bataryalarda ısı üretimine neden olmaktadır, bataryaların yüksek sıcaklıklara ulaşmasına neden olan aşırı ısıyı batarya yüzeylerinden uzaklaştırmak batarya performansını korumak, bozulmayı önlemek, amaçlanan çevrim ömrüne ulaşmak ve güvenliği garanti etmek açısından gereklidir. Bilinmesi gereken diğer bir konu ise düşük sıcaklıklarda bataryanın kullanılabilir gücünün ve performansının önemli ölçüde azalmasıdır (Wang vd., 2017a).

Isı yönetim sistemi tasarımı yaparken çalışma sıcaklığının batarya performansı üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmak son derece önemlidir. LIB'lerin pratik olarak tolere edebileceği çalışma sıcaklık aralığı genellikle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası olarak kabul edilir (Väyrynen & Salminen, 2012). Bataryaların performansı, çevrim ömrü, kullanım sırasında kararlılığı ve güvenilirliği doğrudan hücre sıcaklığı ile ilgilidir. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık aralığı bataryaların en ideal performans, arzu edilen çevrim ömrü ve güvenli çalışması açısından önerilen sıcaklık aralığıdır (Hamed vd., 2022).

LIB'ler için $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklar veya $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklar arzu edilmeyen sıcaklıklardır. Bunun anlamı, yüksek sıcaklıklarda, elektron yüzeylerinde katı

elektrolit ara yüzeyi (KEA) denilen ek tabakanın büyümesi teşvik edilmekte ve bu tabaka bataryanın empedansını dolayısıyla da bataryadan güç çıkışını arttırmaktadır. Böylece, sıcaklık arttığında elektrolit daha iletken hale geldiğinden ve daha fazla akım en sıcak bölgelerde yoğunlaştığından bir geri besleme döngüsü oluşur. Ayrıca, sıcaklığın 90 °C üzerine çıkması ile KEA'da ayrışma başlar. Sonrasında, bağlayıcı ve elektrolitin ayrışması, her iki elektrotta da aktif malzemenin azalması ve lityum rezervlerinin tükenmesiyle sonuçlanır. Tüm bunlardan yola çıkarak aşırı yüksek sıcaklıklar takvim ömrünü azaltmanın haricinde bataryanın fiziksel yapısına zarar vererek kısa devre oluşumuna daha da kötüsü yanma veya patlama ile sonuçlanabilecek ısıl sürüklenmeye neden olabilir (Osmani vd., 2023; Spotnitz & Franklin, 2003).

Motloch vd. (2002) çalışmalarında 30 °C ile 40 °C arasında her 1 °C sıcaklık artışının batarya hücresi çevrim ömrünü yaklaşık 60 gün azalttığını tespit ettiler. Bandhauer vd. (2011) LIB'lerin 40 °C'yi aşan çalışma veya çevre sıcaklıklarından olumsuz etkilendiğini ve özellikle de yüksek şarj yüzdesine sahip olunması durumunda 50 °C'yi aşan sıcaklıklarda ise hücre gücünde ve kapasitesinde ciddi azalmalar görüleceğini belirtmişlerdir.

Zhao vd. (2023a) iyi bir performans ve tahammül edilebilir bir batarya yaşlanma oranına sahip olabilmek için 20 °C ila 50 °C arasındaki sıcaklık aralığını ise kabul edilebilir sıcaklık aralığı olarak belirtmişlerdir. Ramadass vd. (2002) çalışmalarında 50 °C üzerindeki sıcaklığın 490 çevrimden sonra batarya kapasitesinde %70'e varan kayıplara neden olabildiğini buna karşın çalışma sıcaklığı 45 °C'ye indiğinde ise 800 çevrimden sonra bile bu kaybın %36 seviyesinde olduğunu belirtmişlerdir.

Kizilel vd. (2009) bünyesinde birden çok batarya barındıran paket veya modüllerde hücreden hücreye düzgün sıcaklık dağılımının, bataryalar için uzun çevrim ömrü ve en yüksek seviyede kararlılık sağladığının ifade etmişlerdir. Yine bu bağlamda, Pesaran (2002) hücreler arası 5°C aşan sıcaklık gradyanlarının hücrelerin farklı bozunma hızlarına sahip olmalarına ve dolayısıyla elektriksel olarak paket veya modül içi dengesizliğe yol açtığının altını çizmiştir. Detaylandırarak olursak; hücreler arasında iç direnç uyumsuzluğu, sıcaklık dağılımındaki düzensizlik nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Seri bağlantılı hücrelerde iç direnç değerleri, hücrelerin kesme voltajı değerlerini etkilemekte olduğundan batarya paketinin/modülünün kesme voltajı en zayıf hücrenin kesme voltajı ile sınırlıdır. Bu nedenle, sıcaklık dağılımındaki düzensizlik, toplam kapasiteyi olumsuz etkilemektedir. Ek olarak, İç direnç uyumsuzluğu nedeniyle paralel bağlı hücreler arasında akım farklılıkları meydana gelmekte dolayısıyla da dengesiz deşarj, hücrelerin yaşlanması ve kullanım ömrünün

azalması gibi arzu edilmeyen problemler ortaya çıkmaktadır (Chiu vd., 2014; Yang vd., 2016).

Sonuç olarak, yüksek çalışma sıcaklıklarının batarya ömrünü ve performansını azaltmanın yanı sıra tutuşması ve alev alması gibi istenmeyen sonuçlara neden olabildiği anlaşılmaktadır (Xu vd., 2023). Ayrıca, birden çok hücreden oluşan batarya modülleri ve paketlerinde de hücreler arası sıcaklığın olabildiğince düzgün dağılımlı tutulması sağlanmalıdır. Batarya hücrelerini yüksek çalışma sıcaklıklarının olumsuz etkilerinden korumak ve hücreler arası düzgün sıcaklık dağılımı sağlamak için BIYS'ler kullanılır. BIYS'lerin tasarımında verimlilik ve uygun maliyet gibi faktörler dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır.

1.9. Lityum-iyon Bataryalar için Isıl Yönetim Sistemleri (BIYS)

Bataryaların arzu edilen çalışma sıcaklık aralığında tutulmasını, hücrelerde meydana gelen elektrokimyasal işlemler (şarj/deşarj) sonucu üretilen ısının yönetilmesini, hücrelerin güvenli bir şekilde çalışmasını ve hücrelerin performansından optimum düzeyde yararlanılmasını sağlayan sistemlere batarya ısıl yönetim sistemleri (BIYS) denir. BIYS'ler aşırı ısının hücre yüzeylerinden uzaklaştırılmasını sağlayarak bataryalarda potansiyel yanma veya patlamaya neden olan ısıl sürüklenmenin meydana gelmesini engellerler. Ayrıca, hücreler arası oldukça düzgün sıcaklık dağılımı ile bataryaların arzu edilen sıcaklık aralığında çalışmasını sağlarlar. Böylelikle, bataryalarda kapasite ve verimliliği korurken aynı zamanda da çevrim ömrünü uzatırlar. Sonuç olarak, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltan BIYS'ler bataryaların verimli ve uzun çevrim ömürlü çalışması için teknik, güvenlik, çevresel ve ekonomik zorlukları ele alan bir sistemler bütünüdür (Suresh vd., 2025).

BIYS'ler çeşitli malzeme ve yöntemler kullanılarak tasarlanabilirler. Kullanılan malzeme türüne göre sınıflandırma hava tabanlı, sıvı tabanlı ve faz değiştiren malzeme (FDM) tabanlı şeklinde yapılır. BIYS'ler için bir başka sınıflandırma ise enerji tüketimine göre yapılan sınıflandırmadır. Enerjiye ihtiyaç duyan BIYS'lere aktif, enerjiye ihtiyaç duymayan BIYS'lere ise pasif sistemler denir. Zorlamalı akış ve termoelektrik tabanlı sistemler aktif ısıl yönetim sistemleriyken, doğal taşınım, ısı boruları, çeşitli kanatçık yapıları veya FDM'ler tabanlı sistemler ise pasif batarya ısıl yönetim sistemleridir (Zare vd., 2022). Birden çok ısıl yönetim sistemini aynı anda bünyesinde barındıran sistemlere ise

hibrit ısı yönetim sistemleri denir. Bu sistemlerin, yüksek tasarım ve işletme maliyetleri ve karmaşık yapıları gibi sakıncaları vardır.

Tablo 4. Batarya ısı yönetim sistemleri (BIYS) (Ghaeminezhad vd., 2023)

BIYS		Avantajlar	Dezavantajlar
Aktif Yönetim Sistemleri	Hava Tabanlı	Basit yapı, kolay bakım, düşük ağırlık, bataryaya doğrudan temas	Yüksek çalışma maliyeti, düşük verimlilik, düşük özgül ısı kapasitesi, sıcaklıkta tek düzeldiği sağlayamama, ek olarak fana ihtiyaç duyma
	Sıvı Tabanlı	Hava tabanlı sistemlere kıyasla daha yüksek verimlilik ve özgül ısı kapasitesi, bataryaya doğrudan temas	Kısa çalışma döngüsü, yüksek hacim gereksinimi, karmaşık yapıya sahip olması, sızıntı problemleri, yüksek çalışma maliyeti
	Termoelektrik Tabanlı	Gürültüsüz, en düşük bakım maliyetine sahip, güvenilir ve uzun ömürlü, zararlı gaz çıkışı yok	Düşük verimlilik ve ek güce gereksinim duyma
Pasif Yönetim Sistemleri	Doğal Taşınım Tabanlı	Yatırım ve çalışma maliyeti düşük, kolay bakım, düşük ağırlık, basit yapı	Düşük verimlilik ve ısıl iletkenlik, düzgün hava dağılımı sağlamada yetersiz
	FDM Tabanlı	Yüksek gizli ısı, aşırı çalışma koşullarına uygun, daha tek düze sıcaklık dağılımı, yüksek verimlilik, düşük maliyet	Düşük ısıl iletkenlik ve sızıntı problemleri
	Isı Borusu Tabanlı	Daha yüksek ısıl iletkenlik ve verimlilik	Karmaşık yapı, sızıntı problemleri, yüksek maliyet
Hibrit Yönetim Sistemleri		Aktif ve pasif sistemlerin avantajlarının her ikisinden de yararlanma, oldukça iyi sıcaklık dağılımı, yüksek ısı uzaklaştırma kabiliyeti	Oldukça karmaşık yapı ve yüksek maliyet

1.10. Literatür Araştırması

1.10.1. Aktif Isıl Yönetim Sistemleri (AIYS)

"Aktif ısıl yönetim" terimi, dış enerji kaynaklarını kullanarak bir sistemden ısıyı uzaklaştıran veya sisteme ısı ilavesi sağlayan bir ısı yönetim stratejisini tanımlar. Aktif soğutma sistemleri, şarj veya deşarj esnasında LIB'lerden açığa çıkan ısıyı dağıtmak için genellikle batarya hücreleri etrafında dönen sıvı veya hava soğutucuları kullanır. Soğutma sürecini iyileştirmek için bu sistemler fanlar, pompalar ve ısı eşanjörleri gibi parçaları içerebilir. Özellikle yüksek güç işlemleri sırasında ideal batarya sıcaklıklarını korumak, bataryaların uzun ömürlülüğü, performansı ve güvenliği için çok önemlidir. Aktif soğutma bunu başarmaya yardımcı olur (GaneshKumar vd., 2024).

a. Zorlamalı Hava Tabanlı Batarya Isıl Yönetim Sistemleri

Batarya ısıl yönetim sistemlerinde, zorlamalı hava taşınımı, havayı bir yüzey üzerinde veya bir sistem boyunca aktif olarak dolaştırmak için fanlar veya üfleyiciler kullanan bir soğutma tekniğidir. Bu yöntem, ideal çalışma sıcaklıklarını korumak için sıklıkla kullanılır. Arttırılmış soğutma verimliliği, düzenlenmiş hava akışı, ölçeklenebilirlik, hızlı tepki ve maliyet etkinliği, zorlamalı hava taşınımının bazı avantajlarıdır. Dezavantajları arasında yüksek güç tüketimi, gürültü üretimi, toz ve kirlenici madde birikimi, havanın düşük bir ısı transfer katsayısına sahip olması nedeniyle kısıtlı soğutma kapasitesi ve soğutma verimliliğini azaltabilen ortam sıcaklığına bağımlılık yer alır (Olabi vd., 2022).

Tablo 5. Zorlamalı hava akışının batarya ısıl yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar

Yazar	Kapsam	Çalışma Konusu	Diğer Çalışma Parametreleri
Wang vd. (2014)	Nümerik ve DeneySEL	Farklı hücre düzenleme yapıları ve zorlamalı hava soğutma stratejileri	-Deşarj oranı -Hücreler arası mesafe -Hücre düzenleme stratejisi - Hava akış yolu -Hava akış kesit alanı

Tablo 5'in devamı

Yazar	Kapsam	Çalışma Konusu	Diğer Çalışma Parametreleri
Chen vd. (2018a)	Nümerik	Paralel akışlı batarya ısıl yönetim sistemi için hücre aralığı belirleme	-Hücre Aralığı Dağılımı - Adım Uzunluğu
Chen vd. (2018b)	Nümerik	U tipi paralel akışlı batarya ısıl yönetim sisteminin yapı optimizasyonu	-Hava giriş genişliği -Hava çıkış genişliği -Menfez genişliği
Lu vd. (2018)	Nümerik	Kademeli düzenlemeli LIB paketi için zorlamalı hava soğutma stratejisi	-Soğutma kanalı boyutu -Farklı noktalardan hava girişleri ve çıkışları - Hava akış yönünün uzunluğu
Fan vd. (2019)	Deneyisel	Hizalanmış, kademeli ve çapraz batarya paketi düzenlemelerinin karşılaştırılması	-Deşarj oranı -Hava giriş ve ortam sıcaklığı -Hava giriş hızı
Li vd. (2019a)	Nümerik	Hava soğutmalı batarya paketinin termal modellemesi ve parametrik optimizasyonu	-Farklı veki modellemeler -Bataryaların hava giriş ve çıkış alanlarına uzaklığı -Bataryaların alt ve üst kısmının paket üst kısmına olan uzaklığı
Peng vd. (2019)	Nümerik ve Deneyisel	Hücre tutarsızlığı göz önünde bulundurularak hava soğutmalı LIB paketi tasarımı	-Deşarj oranı -Hücreler arası mesafe -Hava giriş ve çıkış pozisyonları - Giriş ve Çıkış Havalandırma Yükseklikleri
Zhou vd. (2019)	Nümerik ve Deneyisel	Batarya modülünün soğutma verimliliğini ve sıcaklık tekdüzeliğini arttırmak için hava dağıtım borusu tasarımı	-Deşarj oranı -Orifis sıra sayısı -Hava giriş basıncı
Kirad & Chaudhari (2021)	Nümerik	LIB modüllerinde hücre aralığının optimize edilmesi	-Hücreler arası aralık -Hava giriş hızı -Deşarj oranı
Hasan vd. (2023)	Nümerik	Hava Soğutma sistemi kullanılarak elektrikli taşıtlar için batarya ısıl performans değerlendirmesi	-Reynolds sayısı
Zhang vd. (2024a)	Nümerik Ve Deneyisel	Hava akışının farklı düzenlemeler ile optimize edilmesi	-Farklı hava giriş ve çıkış pozisyonları -Akışkan hızı

b. Sıvı Tabanlı Batarya Isıl yönetim Sistemleri

Aktif sıvı soğutma sistemlerinin ısı emme kapasitesi hava soğutmalı sistemlerle karşılaştırıldığında 4-6 kat daha fazladır. Bu tip sistemlerde, ilk olarak emdiği ısı nedeniyle sıvı akışkanın sıcaklığı artar sonrasında ise ısı değiştirici vasıtasıyla emilen ısı çevreye bırakılır. Batarya sıcaklıkları genelde 20 °C ile 25 °C arasında tutulmaya çalışılarak, iyi bir performansın yanı sıra uzun çevrim ömrü sunmak hedeflenir (Dolla & Fetene, 2024). LIB'ler için sıvı tabanlı ısıl yönetim sistemleri (BIYS), doğrudan ve dolaylı soğutma olmak üzere iki ayrı strateji üzerine kurgulanır. Doğrudan sıvı soğutmalı (DSS) tasarımlarda batarya doğrudan temas edeceği bir dielektrik soğutucuya batırılır. Bu yaklaşım, üstün ısı transferi performansı sağlasa da önemli derece de korozyon ve sızıntı riskleri taşımaktadır. Ek olarak, yüksek yalıtım özelliklerine sahip sıvılara ihtiyaç duymaları ve sızdırmazlık sağlanması gibi gereksinimleri nedeniyle pahalıdırlar (Wu vd., 2024).

Tablo 6. Doğrudan sıvı soğutma ile bazı soğutma sıvılarının batarya ısıl yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar (Wu vd., 2024)

Yazar	Kapsam	Sıvı Soğutucu
Nelson vd. (2002)	Nümerik	Silikon transformatör sıvısı
Kim & Peseran (2007)	Nümerik	Mineral Yağ
Zhu vd. (2011)	DeneySEL	Deiyonize su
Hirano vd. (2014)	DeneySEL	Hidrofloroeter sıvısı
Al-Zareer vd. (2017)	Nümerik	Propan
Jilte vd. (2019)	Nümerik	Al ₂ O ₃ Nanofluid
Sundin vd. (2020)	DeneySEL	Ampcool AC-100
Cheng vd. (2020)	DeneySEL ve Nümerik	Novec7100
Jithin vd. (2022)	Nümerik	Mineral yağ
Wu vd. (2022)	DeneySEL	Novec7000
Li vd. (2022)	DeneySEL	SF33

Dolaylı temaslı sıvı soğutma (DTSS) ise DSS'ye kıyasla nispeten daha düşük bir ısıl performansa sahiptir ve ek bileşenleri nedeniyle daha karmaşık ve hantaldır. Fakat soğutucuyu bataryadan ayırmak için borular, soğutma kanalları ve plakalar gibi transfer yapıları kullanması sızıntı ve kısa devre riskini azaltır ve ticari uygulamalar için DTSS'yi daha güvenli ve daha uygun hale getirir (Wu vd., 2024).

Tablo 7. Dolaylı temaslı sıvı soğutma yaklaşımları ve bu yaklaşımlara ait batarya ısı yönetim sistemlerinin incelendiği çalışmalar (Zhao vd., 2023b)

	Yazar	Kapsam	Çalışma Konusu	Diğer Çalışma Parametreleri
Soğutma kanalı tasarımı	Lan vd. (2016)	Nümerik	Tek prizmatik LIB hücresi için alüminyum mini kanal tasarımı	-Deşarj oranı -Isı üretim oranı -Akış debisi
	Jiaqiang vd. (2018)	Nümerik	Kanal sayısı, kanal yüksekliği, kanal genişliği ve soğutma akış hızı optimizasyonu	-Deşarj oranı -Isı akı yoğunluğu
	Cao vd. (2019)	Deneyssel ve Nümerik	5664 silindirik LIB hücresinden (18650 tipi) oluşan tam ölçekli bir Elektrikli taşıt BIYS'ının 3B sayısal modeli	-Akış debisi -Deşarj oranı
	Yang vd. (2020)	Deneyssel ve Nümerik	Soğutma kanallarını değiştirerek soğutma akış yollarının optimizasyonu	-Deşarj oranı -Isı üretim oranı -Akış debisi
	Li vd. (2021a)	Nümerik	U-şekilli soğutma kanalı tasarımı	-Deşarj oranı -Isı üretim oranı -Akış hızı
	Gao vd. (2022)	Deneyssel ve Nümerik	Gradyan kanal kesit alanlarının tasarımı	-Deşarj oranı -Akış debisi
	Rao vd. (2017)	Nümerik	Değişken temas yüzey alanları ile alüminyum ceket tasarımı	-Akış hızı
Isı transfer ceketi tasarımı	Lai vd. (2019)	Nümerik	Hafif ve kompakt ısı iletken ceket tasarımı	-Sabit deşarj oranı ve akışkan hızı
	Tang vd. (2020)	Deneyssel ve Nümerik	Düz mikro kanallı yassı boru ve alüminyum bloklar kullanan, sıvı soğutmalı BIYS tasarımı	-Deşarj oranı -Isı üretim oranı -Akış hızı
	Xu vd. (2021)	Deneyssel	Kompozit silika jel levha tasarımı	-Deşarj oranı -Akış hızı
	Lyu vd. (2021)	Deneyssel ve Nümerik	Termoelektrik soğutmalı bakır tutucu tasarımı	-Sabit deşarj oranı ve akışkan hızı
	Li vd. (2021b)	Nümerik	Özel bakır ısı transfer iyileştirici yan gövde ceketi tasarımı	-Sabit deşarj oranı ve akışkan hızı

Tablo 7'nin devamı

	Yazar	Kapsam	Çalışma Konusu	Diğer Çalışma Parametreleri
Soğuk plaka tasarımı	Smith vd. (2016)	Deneyssel	Farklı geometrik tasarımlara sahip üç soğuk plakanın deneyssel olarak karşılaştırılması	-Akışkan sıcaklığı -Deşarj oranı
	Wang vd. (2017b)	Deneyssel ve Nümerik	Ters akış yönlerine sahip iki komşu silika plaka tasarımı	-Deşarj oranı -Isı üretim oranı -Akış hızı
	Malik vd. (2018)	Deneyssel	Üç prizmatik LIB hücresini dört alüminyum soğuk plaka arasına sandviç yaparak dönüşümlü olarak kullanan batarya paketi tasarımı	-Akışkan Sıcaklığı -Deşarj oranı
	Mohammed vd. (2019)	Deneyssel ve Nümerik	Özel çift fonksiyonlu soğuk plaka tasarımı	-Sabit deşarj oranı ve akışkan hızı
	Patil vd. (2020)	Deneyssel ve Nümerik	Prizmatik LIB paketleri için U dönüşlü mikro kanal tasarımı	-Akışkan sıcaklığı -Deşarj oranı -Akış debisi
	Tang vd. (2021)	Deneyssel ve Nümerik	Prizmatik LIB'ler içeren paket için ince soğuk plaka tasarımı	-Akış debisi
	Chen vd. (2022a)	Deneyssel ve Nümerik	Büyük batarya paketleri için çift yönlü simetrik paralel mini-kanal soğuk plaka tasarımı	-Akış debisi

Dolaylı temaslı sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde, ısı transfer ceketi sıvı soğutucu ile batarya hücreleri arasında bir bağlantı görevi görür. Böylelikle, ısıyı batarya hücrelerinden soğutucuya verimli bir şekilde aktarabilir ve ideal çalışma sıcaklıklarının korunmasına yardımcı olur. Bu da, sistemin toplam soğutma verimliliğini artırır. Yüksek ısı performans elde etmek için, ısı transfer ceketi çeşitli geometrik formlarla oluşturulabilir ve kompozit malzemeler veya alüminyum gibi yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden yapılabilir (Zhao vd., 2023a).

Dolaylı temaslı sıvı soğutmanın bir diğer türü de soğuk plakalardır (SP). Soğuk plakalar üzerinden soğutucunun aktığı kanallardan oluşur, bataryadan ısıyı etkili bir şekilde dağıtır, soğutma verimliliğini ve sıcaklık düzgünlüğünü artırmanın yanı sıra optimum

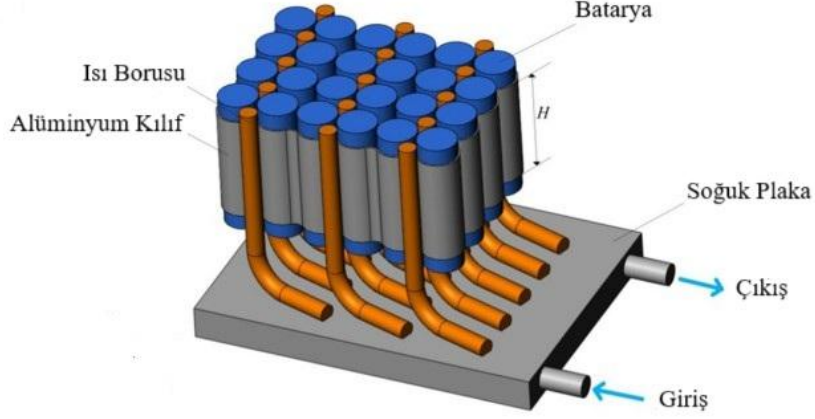
performans ve güvenlik sağlar. Soğuk plakalar soğutma performansını ve enerji tüketimini dengeleyecek şekilde tasarlanırlar ve bu nedenle elektrikli taşıt uygulamaları için tercih edilen bir seçenektirler (Wu vd., 2024).

1.10.2. Pasif Isıl Yönetim Sistemleri (PIYS)

Pasif ısıl yönetim sistemleri çalışması için elektrik gibi dış kaynaklara ihtiyaç duymayan bir ısı yönetim tekniğidir. Bunun yerine, radyasyon, konveksiyon ve iletim gibi doğal mekanizmalar yoluyla ısıyı dağıtır. Fanlar veya pompalar gibi aktif bileşenler gerektirmeden ısı dağılımını iyileştiren malzemeler ve tasarımlar kullanmak, pasif batarya ısıl yönetim sistemleri (PIYS) için kullanılan yaygın bir uygulamadır. İş akışkanını buharlaştırıp yoğunlaştırarak ısıyı aktaran ısıl borular ve faz geçişleri sırasında ısıyı emen ve serbest bırakan faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) PIYS'lerde kullanılmak için iki örnektir. Aktif soğutma sistemleriyle karşılaştırıldığında, pasif soğutma sistemleri genellikle kullanımı daha kolaydır, daha güvenilirdir ve daha az bakım gerektirir (Olabi vd., 2022). Ek olarak, ilk yatırım maliyeti, tasarım karmaşıklıkları ve ek enerji sağlayan donanım kaynaklı fazladan ağırlık gibi dezavantajlara sahip olmamaları PIYS'leri AIYS'lere göre daha dikkat çekici bir seçenek haline getirmektedir (GaneshKumar vd., 2024).

a. Isı Borusu Tabanlı Isıl Yönetim Sistemleri

Isı borulu termal yönetim sistemleri adı verilen gelişmiş soğutma teknolojileri, elektrikli ve hibrit otomobillerdeki bataryaların sıcaklığını düzenlemek için ısı borularının mükemmel ısıl iletkenliğini kullanırlar. Bu sistemler, ısıyı batarya hücrelerinden daha soğuk bir bölgeye taşımak için vakumla kapatılmış bir borunun içinde faz değiştiren bir çalışma sıvısı kullanır. Etkinliklerine rağmen ısı boruları batarya ısıl yönetim sistemleri için tek başlarına tercih edilmezler. Çoğunlukla, sıvı soğutma, hava soğutma veya faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) dâhil olmak üzere diğer soğutma teknikleriyle birlikte sıklıkla kullanılırlar. Bu hibrit teknik, ısı borularının çoklu ısı yükünü, ani sıcaklık değişimlerini ve elverişsiz iklim koşullarını yönetmedeki kısıtlamalarını ele alır. Isı borusunun diğer soğutma teknolojileriyle bütünleşmesi, ısıl yönetim sistemini bir bütün olarak güçlendirir, daha yüksek soğutma performansı, iyileştirilmiş sıcaklık dağılımı ve çeşitli çalışma koşullarında artan güvenilirlik sağlar (Weragoda vd., 2023). Genellikle, birden çok ısıl yönetim yaklaşımı içeren hibrit yöntemlerde kullanıldıklarından dolayı, bu çalışmada ısı boruları hakkında sadece özet bir bilgi sunulmuştur.



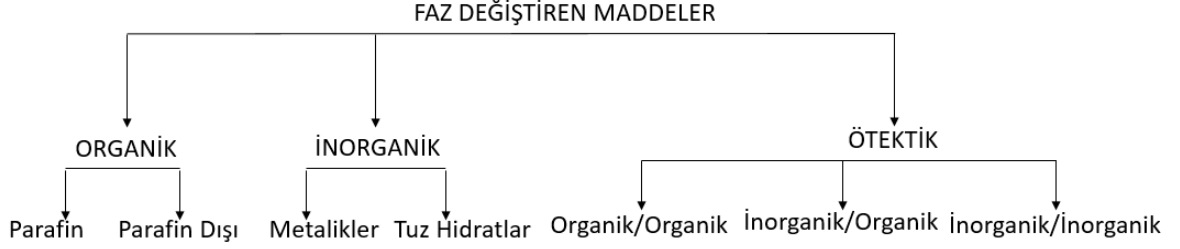
Şekil 5. Isı borusu ve sıvı soğutmalı hibrit batarya ısıl yönetim sistemine bir örnek (Gan vd., 2020)

b. FDM Tabanlı Isıl Yönetimi Sistemleri

Aktif ısıl yönetim sistemleri kullanım esnasında ısı yönetimi için fazladan enerji tüketerek batarya paketinin kapasitesinin düşmesine elektrikli taşıtlar özelinde ise sürüş menzilin azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, bu tür sistemler ek hacim ihtiyacı gerektirmektedir. Ek güç ihtiyacından kurtulmak ve fazladan harcanan enerjiden tasarruf etmek için yapılan çalışmalarda FDM kullanımının batarya ısıl yönetim için uygun bir çözüm yolu olduğu tespit edilmiştir (Khateeb vd., 2004; Li vd., 2024b).

Faz geçişleri sırasında büyük miktarda ısıl enerjiyi absorbe eden ve depolayan malzemelere faz değiştiren malzeme (FDM) adı verilmektedir. FDM'ler hem duyulur ısı hem de gizli ısı depolama kapasitelerinden dolayı ısıl depolama açısından üstün malzemelerdir ve duyulur ısı depolama malzemelerine kıyasla sabit sıcaklıkta 5 ila 14 kat arasında daha fazla ısı depolarlar (Dinker vd., 2017). Katı-sıvı FDM'ler otomotiv uygulamalarının da dâhil olduğu birçok alanda kullanılma potansiyeline sahip gizli ısı depolama sistemleridir. Ayrıca, günümüzde bu FDM'lerin batarya ısıl yönetim sistemleri için kullanılması için çalışmalar artarak devam etmektedir. Şekil 6'dan da görüleceği üzere FDM'ler kimyasal bileşenlerine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Sharma vd., 2009; Cabeza vd., 2011; Rao ve Wang, 2011; Pielichowska ve Pielichowski, 2014; Wang vd., 2016a; Bayraktar ve Köse, 2022). Tablo 8 farklı kimyasal yapıya sahip FDM'lerin termofiziksel özelliklerini karşılaştırmaktadır.

Organik FDM'ler ucuz olması, itimat edilebilir olması, yüksek gizli ısıya sahip olması, korozyon olmaması ve geniş bir sıcaklık aralığı yelpazesine sahip olması gibi cazip özelliklerinden dolayı ısı enerji depolaması amacıyla birçok yapı ve malzeme ile uyumlu olarak kullanılabilir. Organik FDM'ler parafin ve parafin dışı olmak üzere iki farklı kategori altında incelenmektedir. Parafin uzun alkan zincirlerinden oluşan bir karışımdır ve n karbon



Şekil 6. FDM'lerin sınıflandırılması (Jaguemont vd., 2018)

Tablo 8. Farklı yapıdaki FDM'lerin termofiziksel özellikleri (Kharabati & Saedodin, 2024)

FDM Türü	T_E (°C)	$k\left(\frac{W}{m.K}\right)$	GI (J/g)	$\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
Organik	-50-200	0,1-0,3	80-400	600-1500
İnorganik	10-900	0,3-1	90-300	700-1600
Ötektik	10-600	0,3-0,7	120-375	600-1450

atomu zincir sayısını temsil edecek şekilde kimyasal formülü C_nH_{2n+2} 'dir. Parafinler günümüzde ısı depolama çalışmaları için en çok faydalanan FDM türlerinden birisi olup ayrı ayrı veya tasarıma göre birden çok parafinin birleşimi şeklinde kullanılabilir. Parafinler sahip oldukları kimyaları nedeniyle kullanımları esnasında alev alma riski taşır. Ayrıca, düşük ısı iletkenlikleri de bu FDM'lerin istenmeyen özellikleri arasındadır. Kimyasal formülleri $CH_3(CH_2)_nCOOH$ olan yağ asitleri parafin dışı organik türlerindendir. Farklı yağ asitlerinin birleştirilmesi sonucu faz 20 °C ila 30 °C bir faz değişim aralığı sunan yeni bir FDM elde etmek mümkündür (Jaguemont vd., 2018; Bayraktar ve Köse, 2022).

Bir başka FDM grubu ise inorganik FDM'lerdir. Hidratlı tuzlar ve metalikler bu grup altında sınıflandırılır. İnorganik FDM'lerin faz değişim sıcaklık aralıkları oldukça geniştir ve gizli ısı depolama kapasiteleri de oldukça yüksektir. (Jaguemont vd., 2018; Konstantinidis, 2010). Korozyona neden olma riskinin yanında diğer tüm FDM'lere benzer şekilde ısı iletkenliklerinin düşük olmasının sakıncalarına sahiptirler. Ayrıca, korozyon riski

nedeniyle kurulum ve bakım süreçleri yüksek maliyetler ortaya çıkarmaktadır (Dinker et al., 2017). İnorganik FDM olan türü hidratlı tuzlar adından da anlaşılacağı üzere yapısında tuz ve su molekülleri bulundurmaktadır. Hidratlı tuz FDM'ler oldukça geniş bir faz değişim aralığında (5 °C ila 130 °C) faaliyet imkanı sunar. Tuz hidratların sakıncalı özellikleri ise kararsız olma, yapısında ayrışma ve korozyon riski gibi faaliyetlerine olumsuz tesir edebilecek özelliklerdir (Konstantinidis, 2010). Son inorganik FDM türü olan metalik FDM'lerin en önemli özelliği diğer FDM'lere göre daha yüksek ısı iletkenlikleridir. Fakat, genel olarak maliyetleri oldukça yüksektir. Tüm bu bahsedilen özellikler göz önüne alındığında, inorganik FDM'lerin batarya ısı yönetim sistemlerinde kullanılmak için doğru tercih olmağı görülür. Organik veya inorganik FDM gruplarının herhangi birinden seçilen birden çok FDM'nin birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan FDM grubuna ötektik FDM adı verilir. Ötektik FDM oluşturulmasının temelinde birden çok FDM türünün üstün yönlerinden yararlanma amacı vardır (Sharma vd., 2009; Jaguemont vd., 2018). Ötektik FDM'ler batarya ısı yönetim sistemleri için kullanılma potansiyeline sahiptirler.

Batarya ısı yönetimi üzerinde çalışmalar yapan araştırmacıların FDM'ler üzerinde ilgilerinin giderek artmasının sebebi, FDM kullanımının FDM'siz duruma göre batarya paketi içerisinde daha düzgün sıcaklık dağılımı sağlaması ve FDM'nin gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde hücrelerin ulaştığı maksimum sıcaklık değerlerini ciddi oranlarda düşürmesidir (Zhao, 2020). FDM'nin ısı depolama kapasitesi aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilmektedir (Yazıcı, 2019).

$$Q_D = \int_{T_i}^{T_E} m \cdot c_{p, k} \cdot dT + m \cdot H_E + \int_{T_E}^{T_s} m \cdot c_{p, s} \cdot dT \quad (7)$$

Denklemden; Q_D , depolanan ısı miktarını, T_i , başlangıç sıcaklığını, T_E , erime sıcaklığını, T_s , son sıcaklığı, $C_{p, k}$ (kJ/kgK,) FDM'nin katı fazının sabit basınçtaki özgül ısısını, $C_{p, s}$ (kJ/kgK), sıvı fazın sabit basınçtaki özgül ısısını ve H_E (kJ/kg) erime gizli ısısını belirtmektedir.

Parafinler tüm FDM'ler içerisinde BIYS'ler için en çok araştırılan FDM türleridir. Bunun nedeni, faz değişim aralıklarının bataryaların izin verilen çalışma sıcaklık aralıkları ile uyumlu olması, inorganik FDM'ler gibi koroziv olmaması, faaliyetleri esnasında yapılarının kararlı olması ve göreceli olarak maliyetinin düşük olması şeklinde sıralanır (Luo vd., 2020). Batarya ısı yönetimi için FDM tercihi yapılırken genellikle faz değişim aralıkları

20-50 °C arasında olan FDM'ler tercih edilir. Bu durum, bu faz değişim aralığının bataryaların çalışma sıcaklık aralıkları ile uyumlu olması ile ilişkilidir (Zhao vd., 2022). Batarya ısı yönetim sistemleri tasarlamak amacıyla Al-Hallaj & Selman (2000), Al-Hallaj ve Selman (2002) ve Khateeb vd., (2004) bu alanda FDM kullanılan öncü çalışmaları gerçekleştirdiler.

FDM'lerin BIYS'lerde aktif bir şekilde kullanılmasının önündeki en büyük engel düşük ısı iletkenlikleridir. Çünkü, bir çok FDM 0,2 ile 0,4 W/m·K arasında değişen oldukça düşük ısı iletkenlik katsayılarına sahiptir (Wu vd., 2017b). Düşük ısı iletkenlik probleminin aşılması için, FDM'leri ısı iletkenlikleri çok daha yüksek malzemeler ile birleştirerek kompozit yapılar oluşturulması fikri ortaya çıkmıştır. Bu amaçla literatürde grafen (Shi vd., 2013) , grafit (Shi vd., 2013), genişletilmiş grafit köpük (GG) (Mills & Al-Hallaj, 2005), karbon nanotüp (Wang vd., 2009) , nanokatki katkı malzemesi (Chen vd., 2017) ve metal köpük (Wang vd., 2015) gibi farklı malzemeler kullanılan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bazı çalışmalarda kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünü korumak için polimerlerden yararlanılmıştır (Li vd., 2024b).

1.10.3. FDM'ye Çeşitli Katkı Maddeleri İlavesinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri için İncelendiği Çalışmalar

Tablo 9. FDM'ye çeşitli katkı maddeleri ilavesinin batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	İlave Malzeme	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Javani vd. (2014)	Nümerik	Karbon nanotüp (KNT)	Oktadekan $T_E=29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0.15\text{ W/m.K}$	KNT ilavesi (0-%10), ısı transfer oranı (300-600W), boru dış çapı (6.096, 8.128, 9.855, 11.455, 16.002 mm), kanatçık uzunluğu (5.080, 5.588, 6.096, 6.604, 8.89mm), KNT seri olasılığı (0 ile %20)	%8,6 KNT konsantrasyonu ve %19,7 seri olasılığı ile 9,855 mm çaplı kanatçiksız borular kullanılan durum en ideal seçenek olarak bulunmuştur.

Tablo 9'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	İlave Malzeme	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Bahiraei vd. (2017)	Nümerik ve Deneyisel /Batarya yerine kartuş ısıtıcı	Karbon nanofiber, Grafen nanoplakacık, Grafit Nanotoz	PA $T_E=60^\circ\text{C}$ $k=0,16-0,25$ W/m.K $GI=119,3$ J/g	Nanopartiküllerin Kütlesel oranları (%0, %2,5, %5, %7,5, %10)	Isıl yönetim açısından %7,5 ve %10 kütle oranlarında grafit nanopartikül ilavesi ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Isı iletkenliği saf FDM'ye kıyasla %1100'e kadar artırılmıştır.
Mortazavi Vd. (2017)	Nümerik/ 6 adet 4,4Ah silindirik LIB	Grafen nanomembran, hekzagonal bor nitrür nanomembran	PA $k=0,23$ W/m.K	Şarj ve deşarj oranı (0,2, 1, 3C), FDM Katkı Maddelerinin Hacim Konsantrasyonu (%1,%4)	%4 hekzagonal bor nitrür nanomebran konsantrasyonuna sahip KFDM ısı iletkenlik açısından ideal durum olarak tespit edilmiştir.
Zou vd. (2018)	Deneyisel	Çok duvarlı karbon nanotüpler, grafen	PA $T_E=44^\circ\text{C}$ $GI=200$ J/g	Karbon nanotüp veya grafen kütle oranı (%0,2, %0,5, %0,8, %1, %1,2, %1,5), grafen ve karbon nanotüpün toplam kütle oranı %1 olacak şekilde grafen/karbon nanotüp kütle oranı (1/1, 1/4, 2/3, 3/7)	Çok duvarlı karbon nanotüp/grafen oranı 3/7 olan kompozit FDM'nin ısı iletkenliğini ve ısı transferini önemli ölçüde artırdığından dolayı LIB ısı iletkenliği için ideal durum olarak belirlenmiştir.

Tablo 9'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	İlave Malzeme	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Temel (2019)	Deneysel ve Sayısal/ 18650 batarya boyutunda ısıtıcılar 4S3P düzenleme	Grafen nanoplakacık	RT-44 $T_E=41-44$ °C GI=239,6 J/g	Isıtıcı gücü (1,3, 2,75, 3,9 W), ortam sıcaklığı (0, 10, 20, 30 °C), Grafen nanoplakacık kütle oranı (%3, %5, %7), BIYS (Doğal taşınım ile soğutma, saf FDM, KFDM)	Optimum GNP/RT-44 bileşimi %7 GNP ile elde edilmiştir.
Zou vd. (2019)	Deneysel/ 10Ah 38120 LiFeO ₄ batarya 2S18P düzenleme (6X6 dizilim)	Grafen, çok duvarlı karbon nanotüpler, genişletilmiş grafit, bakır köpük	PA $T_E=46,8$ °C k=0,38 W/m.K GI=224,8 J/g	Tüm bataryalara saf FDM, merkezdeki 16 bataryaya KFDM geriye kalan kısma saf FDM, merkezdeki 16 bataryaya bakır köpük-FDM geriye kalan kısma saf FDM ve merkezdeki 4 bataryaya KFDM geriye kalan kısma saf FDM soğutması, Genişletilmiş grafit kütle oranı (%10, %15)	Merkezdeki 4 batarya için KFDM kullanılan batarya modülü düzenlemesi en ideal durum olarak belirlenmiştir. Bu durum sıcaklık dağılımını iyileştirmiş ve 45°C'nin altında ise sıcaklık artışlarını düşürmeyi başarmıştır.
Heyhat vd. (2020)	Sayısal/ Tekli 18650 LIB	Bakır nanoparçacık (NP), bakır kanatçık, bakır köpük	Eikosan $T_E=36,4$ °C k=0,146-0,423 W/m.K GI=248 J/g	Isı üretimi (4,6W, 9,2W), NP hacimsel yüzdesi (%3, %5, %7), Kanatçık sayısı (1,3,5), gözeneklilik (%85, %90, %95), inç başına gözenek sayısı (10, 20, 30)	%90 gözeneklilik oranı ve bir inç başına 30 gözenek sayısına sahip olan bakır köpük ideal seçenek olarak belirlenmiştir.

Tablo 9'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	İlave Malzeme	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Jilte vd. (2021)	Sayısal ve Deneyisel/7 adet 18650 LIB	Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacık	Disodyum sülfat dekahidrat ($Na_2SO_4 \cdot H_2O$) $T_E=32,4\text{ }^{\circ}C$ $k=0,544\text{ W/m.K}$ $GI=254\text{ J/g}$ Eikosan $T_E=36,4\text{ }^{\circ}C$ $k=0,27\text{ W/m.K}$ $GI=241\text{ J/g}$ PT37 ve PT44 $T_{E37}=37\text{ }^{\circ}C$ $T_{E37}=44\text{ }^{\circ}C$ $k=0,15-0,25\text{ W/m.K}$ $GI_{37}=210\text{ J/g}$ $GI_{44}=180\text{ J/g}$	Ortam sıcaklığı ($30^{\circ}C$, $35^{\circ}C$, $40^{\circ}C$), İki farklı nano-katkı ilaveli faz değıştiren malzeme kullanan yapılandırma ($7 \times 7 \times 1$ (7 batarya FDM1 ile doldurulmuş 7 ayrı kapta ve çevresinde ise FDM2 ile dolu 1 ana kap mevcut) $7 \times 1 \times 1$ (7 batarya FDM1 ile dolu 1 ana kapta ve çevresinde ise FDM2 ile dolu bir kap mevcut)), Al_2O_3 kütle oranı (%2, %5, %10)	LIB'lerin termal yönetimi için ideal seçim, ortam sıcaklığı $40^{\circ}C$ olsa bile hücre sıcaklıklarını $46^{\circ}C$ 'nin altında tutabilen nano-katkı ilaveli faz değıştiren malzemeler ile $7 \times 7 \times 1$ dizilimi olarak belirlenmiştir.
Alqaed vd. (2022)	Sayısal/21 adet silindirik LIB'ler ile üçgen düzenleme	Grafen nanoparçacık	Kalsiyum klorür heksahidrat ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) $T_E=29\text{ }^{\circ}C$ $k=0,561-1,008\text{ W/m.K}$ $GI=192\text{ J/g}$	Kanatçık uzunluğu (0, 5, 10, 15 mm)	Daha uzun kanatçıkların ($L=15\text{ mm}$) KFDM'nin hem erime hem de donma işlemini hızlandırdığı, ısı transferini ve sıcaklığın homojenliğini arttırdığı belirlendi.

Tablo 9'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	İlave Malzeme	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Talele & Zhao (2023)	Sayısal/3,2 Ah 18650 LIB'ler 4S4P düzenleme	Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacık	PA $T_E=45\text{ }^{\circ}C$ $k=0,2$ W/m.K $GI=255\text{ J/g}$	Deşarj oranı (1C, 2C), ortam sıcaklığı ($25\text{ }^{\circ}C$, $35\text{ }^{\circ}C$)	Al_2O_3 nano katkılı KFDM daha yüksek ortam sıcaklıklarında ve deşarj oranlarında bile önemli bir sıcaklık gecikme etkisi ve daha düşük maksimum sıcaklık sağladı.
Bais vd. (2024)	Deneyssel/2 Ah 18650 LIB'ler 7S2P düzenleme	$\gamma-Al_2O_3$ (gama alümina) nanoparçacık	PA $T_E=41-48\text{ }^{\circ}C$ $k=0,2$ W/m.K $GI=160\text{ J/g}$	$\gamma-Al_2O_3$ kütle oranı (%0,5, %1, %1,5, %2, %4), BIYS (FDM yok, RT-47 FDM ve %0,5, %1,0 ve %1,5 ağırlık oranında $\gamma-Al_2O_3$ içeren Nano-katkılı FDM)	Ağırlıkça %0,5 nano katkılı FDM içeren batarya paketi en iyi performansı gösterdi.

Tablo 9'da FDM'ye çeşitli katkı maddeleri ilavesi ile oluşturulan kompozit faz değiştiren malzemelerinin (KFDM) batarya ısı yönetim sistemleri üzerinde uygulandığı çalışmalar sunulmaktadır.

Javani vd. (2014), FDM'ye katkı maddesi olarak karbon nanotüpler ekleyerek batarya ısı yönetim sistemleri için yeni bir KFDM oluşturdular. Bu, KFDM kullanımı ile FDM'nin ısı iletkenliğinin arttırıldığını ve tasarımlarında bulunan ısı değiştirici uzunluğunun azaltıldığını gösterdiler. Çalışmanın sonucunda, ısı performans açısından en ideal durumun %19,7 karbon nanotüp seri olasılığı, %8,6 karbon nanotüp kütle oranı ve 32,5 cm ısı değiştirici uzunluğu ile elde edildiğini belirlediler. Ayrıca, KFDM kullanımı ile hava ve sıvı tabanlı BIYS kullanımına göre daha üstün ısı performans sağlandığını ve bu KFDM'nin elektrikli taşıtlarda kullanılmak üzere iyi bir alternatif olduğunu vurguladılar.

Bahiraee vd. (2017) karbon nanofiberler, grafen nanoplakçıklar ve grafit nanotozların FDM'ye ilavesi ile oluşturulan KFDM'lerin BIYS'lerde kullanılmasının ısı performans üzerindeki etkilerini araştırdılar. Çalışmalarında, FDM'ye nanoparçacıkların ilave edilmesiyle ısı iletkenliğinin büyük ölçüde arttırıldığını tespit ettiler. Fakat bu durumun aynı zamanda doğal taşınım ile ısı transferini olumsuz etkileyen FDM'nin dinamik viskozitesinin de artmasına sebep olduğunu ifade ettiler. Çalışmalarının sonucunda, FDM'ye %7,5 ve %10 kütle oranlarında nanoparçacık ilavesi ile en ideal ısı performansın sağlandığını ve saf FDM'ye göre ısı iletkenliğinin %1100'e kadar arttırıldığını buldular.

Mortazavi vd. (2017) FDM'ye grafen ve hekzagonal bor nitrür nanotabaka ilave edilmesi ile oluşturulan KFDM'lerin BIYS'ler üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırdılar. Sayısal çalışmalarında çok ölçekli modelleme teknikleri kullandılar. Bataryalar tarafından üretilen ısıyı modellemek için Newman'ın elektrokimyasal modelinden yararlandılar. Çalışmalarının sonucunda, KFDM kullanımı ile saf FDM kullanımına kıyasla daha üstün ısı performans sağlandığını ve ısı iletkenliğinin arttırıldığını buldular. Ayrıca, FDM'ye hekzagonal bor nitrür nanolevhala ilavesi ile oluşturulan KFDM'nin grafen nanofilmlerin ilavesi ile elde edilen KFDM'ye kıyasla saf FDM'nin ısı iletkenliğini daha fazla arttırdığı görüldü.

Temel (2019) RT-44 FDM'ye grafen nanoparçacık (GNP) ilavesi ile bir KFDM oluşturdu ve bu KFDM'nin BIYS'ler için kullanımını araştırdı. Çalışmada, LIB'lerde ki ısı üretimini modellemek için bataryalar yerine silindirik ısıtıcılar kullandı. Silindirik ısıtıcıları 4S3P yapılandırması ile birbirine bağladı. Çalışmanın sonucunda, kütsel olarak %7 GNP kullanımı ile oluşturulan KFDM kullanımı ile en üstün ısı performans elde edildiğini buldu. Bu KFDM kullanımı ile saf FDM'nin ısı iletkenliği sıvı fazda %130 ve katı fazda ise %230 oranında arttırıldı. Ayrıca, maksimum yüzey sıcaklıkları ve hücreler arası sıcaklık dağılımı da iyileştirildi. 3,90 W maksimum deşarj hızında ve 30 °C ortam sıcaklığında, KFDM kullanımı ile saf FDM kullanımına kıyasla ısı kontrol süresi 1,96 kat arttırıldı.

Zou vd. (2019) FDM'ye grafen, çok duvarlı karbon nanotüpler, genişletilmiş grafit ve bakır köpük ilaveleri ile KFDM'ler oluşturdular ve bu KFDM'lerin BIYS'lerde kullanımını deneysel olarak araştırdılar. Araştırmalarında, toplamda 36 adet LIB hücresi 6x6 düzenlemesi ile yerleştirildi. Çalışmada, üç farklı BIYS tasarımı yapıldı ve bu tasarımlar: sadece saf FDM'den oluşan paket, merkezdeki 16 hücre için bakır köpük/FDM geriye kalan kısım için saf FDM kullanılan paket ve merkezdeki 4 hücre için KFDM geriye kalan kısım için saf FDM kullanılan batarya paketi olarak sıralanabilir. Merkezdeki dört hücre için

kullanılan KFDM, FDM'ye grafen, çok duvarlı karbon nanotüp ve genişletilmiş grafit ilave edilerek oluşturulmuştur. KFDM içerisinde kütleli olarak toplamda %1 grafen ve çok duvarlı karbon nanotüp bulunur ve grafen/çok duvarlı karbon nanotüp kütle oranı 3/7'dir. Ayrıca, bu KFDM yapısında kütleli olarak %15 genişletilmiş grafit içermektedir. Çalışma sonucunda, merkezdeki 4 hücre için KFDM kullanılan ve geriye kalan hücreler için saf FDM kullanılan tasarım ile diğer tasarımlara göre daha üstün ısı kontrol sağlandığı bulunmuştur. Ayrıca, bu tasarımla etkili ısı kontrolün yanı sıra ağırlık ve malzeme maliyetlerinin de düşürüldüğü de görülmüştür.

Heyhat vd. (2020) bakır köpük, nanoparçacık ve kanatçıklar kullanarak oluşturdukları pasif batarya ısı yönetim sisteminin performansını araştırdılar. Çalışmalarında FDM içerisine %3, %5 ve %7 hacim oranlarında eklenen nanoparçacıklar ile ısı iletiminde önemli bir iyileşme sağlanamadığı tespit edilmiştir. Ancak, pasif ısı yönetim sistemine kanatçık ilavesi ile ısı iletiminde iyileşme sağlanmıştır. 3 kanatçıklı tasarım ile ısı iletimi 5 kanatçıklı tasarımdan daha fazla iyileştirilmiştir. Bir diğer ilave malzemesi olan bakır köpük için %85, %90 ve %95 gözeneklilik oranları ve inç başına 10, 20 ve 30 gözenek sayıları incelenmiştir. Pasif ısı yönetim sistemi için en ideal ilave malzemenin %90 gözeneklilik ve inç başına 30 gözenek bulunduran bakır köpük olduğu belirlenmiştir. En ideal PIYS ile ortalama sıcaklığın 4-6 °C düşürüldüğü görülmüştür. Çalışma sonucunda, bakır köpük kullanımı ile kanatçıklardan ve nanoparçacıklardan daha ısı kontrol iyi performansı elde edildiği vurgulanmıştır.

Jilte vd. (2021) nano-katkı malzemeleri kullanarak LIB'ler için bir PIYS önerdiler. Çalışmalarında $7 \times 7 \times 1$ ve $7 \times 1 \times 1$ düzenlemelerine sahip iki farklı durumu araştırdılar. Çalışmanın sonucunda, 7 hücreden oluşan 7 birincil kabın FDM1 ile ve bir adet ikincil kabın ise FDM2 ile doldurulduğu $7 \times 7 \times 1$ düzenlemeye sahip ısı yönetim sistemi ile daha üstün soğutma performansı elde edildiğini buldular. Bu düzenleme ile 40 °C bir ortam sıcaklığında bile hücre yüzey sıcaklıklarını 40 °C altında tutabildiler. Ayrıca, elektrikli taşıtlarda hücre sıcaklıklarının istenilen aralıkta faaliyet göstermesini sağlamak ve ısı kontrol açısından farklı erime noktalarına sahip faz değiştiren malzeme kullanımının önemi vurgulanmıştır.

Alqaed vd. (2022) grafen nanoparçacıklar kullanarak KFDM oluşturdular. Oluşturdukları KFDM ile üçgen düzenlemeye sahip LIB paketini bir alüminyum tüpün merkezine yerleştirdiler ve soğutma performansı araştırdılar. Araştırmalarında, 5-15 mm arasında 12 adet kanatçık kullandılar. Kanatçık uzunluklarını değiştirerek kompozit yapının

erime ve donma süreçlerini, ortalama Nusselt sayısını, ortalama sıcaklık ve yerel sıcaklık değerlerini incelediler. Çalışmanın sonucunda, ideal kanatçık uzunluğu $L = 15$ mm bulundu.

Bais vd. (2024) RT-47 FDM'ye gama-alümina nanoparçaçık ilavesi ile yeni bir batarya ısı yönetim sistemi önerdiler. Aşırı deşarj koşulları altında (3C oranı, 12 A akım), beş farklı batarya paketi test edilmiştir. Yalın paketin ağırlığından yalnızca %16,281 daha ağır olan %0,5 ağırlıkta nano katkılı FDM içeren paket diğerlerinden daha iyi performans gösterdi. Bu paket, maksimum sıcaklığı $42,44^{\circ}\text{C}$ koruyarak 1113 s iel en uzun deşarj süresine ulaşmıştır. Alternatif tasarımlardan ve ilgili araştırmalardan daha iyi performans gösteren bu yapılandırma, termal yönetim için en başarılı yapılandırma olarak ortaya çıkmıştır.

1.10.4. Metal Köpük/FDM Etkisinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri İçin İncelendiği Çalışmalar

Tablo 10. Metal köpük veya metal yapı /FDM etkisinin batarya ısı yönetim sistemleri için incelendiği çalışmalar

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Gözenekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Khateeb vd. (2005)	DeneySEL ve Sayısal/2,2 Ah 18650 batarya 3S6P ve 4S6P düzenleme	Alüminyum köpük	FDM $T_E = 41-44^{\circ}\text{C}$ $k = 0,21-0,29$ W/m.K $GI = 195$ J/g	Deşarj oranı (C/1, C/2, C/3, C/5 ve dinamik yük), BIYS (BIYS yok, sadece metal köpük, sadece FDM, FDM/metal köpük)	Alüminyum köpük/FDM kullanımı ile BIYS'sız duruma kıyasla sıcaklıkta yaklaşık %50'lik bir düşüş sağlamıştır.
Li vd. (2014)	DeneySEL/ 10Ah Ah prizmatik 9S düzenleme	Bakır köpük	RT 44HC $T_E = 42,76 - 49,24^{\circ}\text{C}$ $k = 0,2$ W/m.K $GI = 270,7$ J/g	Deşarj oranı (0,5, 1, 3C), Gözeneklilik (0,9-0,95-0,97), Gözenek yoğunluğu (10,20,40 PPI), BIYS (BIYS yok, sadece FDM, FDM ve bakır köpük)	Hücre yüzey sıcaklıklarının azalan gözeneklilik ve gözenek yoğunluğu ile azaldığı tespit edildi.

Tablo 10'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Gözenekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Wang vd. (2015)	Deneysel/ 16,5 Ah prizmatik LiFePO ₄	Alüminyum köpük	PA $T_E = 46-52^\circ\text{C}$ $k=0,21-0,29$ W/m.K	Isı akısı (7000, 12000 W/m ²), Deşarj oranı (1C,2C), ısıtılma yönetim sistemi (Sadece FDM, FDM ve alüminyum köpük)	FDM'nin erime süreci hızlandı ve sıcaklık homojenliğinde iyileşme görüldü.
Hussain Vd. (2016)	Deneysel/3,4 Ah 18650 batarya 6S düzenleme	Nikel köpük	PA $T_E = 38-41^\circ\text{C}$ $k=0,2$ W/m.K	Deşarj oranı (0,5-1-1,5C) Gözeneklilik (0,95-0,97) Gözenek yoğunluğu (10,20,30 PPI), ısıtılma yönetim sistemi (BIYS yok, sadece FDM, FDM ve nikel köpük)	Nikel köpük kullanımı ile 2C deşarj oranı altında hücre sıcaklıklarında saf FDM'ye kıyasla %24, doğal taşınım durumuna kıyasla ise %31 azalma görüldü.
Alipanah & Li (2016)	Sayısal/2D model, kullanılan batarya hakkında detaylı bilgi yok	Alüminyum köpük	Oktadekan, Galyum	Isı akısı (400, 600 ve 800 W/m ²), BIYS (Saf okta-dekan, Saf galyum, okta-dekan-alüminyum köpük-KFDM), BIYS kalınlığı (7,5 mm, 10 mm, 12,5 mm ve 15 mm), Gözeneklilik (0,97, 0,925 ve 0,88)	Batarya sıcaklığının 60°C'nin üzerine çıkma süresi yani güvenilir çalışma süresi galyum ile 4.7 kat ve gözeneklilik oranı 0,88 olan okta-dekan-Al köpük KFDM ile 7,3 kat arttırıldı.

Tablo 10'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Gözenekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Pan & Lai (2017)	Deneysel/2,9 Ah 18650 LIB'ler 3S5P Düzenleme	Bakır lif	PA $T_E = 48-50^\circ\text{C}$	BIYS (Doğal hava, saf FDM, bakır köpük-KFDM, bakır fiber KFDM), Deşarj oranı (10, 20, 35A), Bakır fiber gözenekliliği (96,1%, 91,9%, 88,7%, 83,7%)	Bakır fiber- KFDM kullanımı ile hücreler arası sıcaklık dağılımının 2°C civarında tutulduğu ve hava tabanlı soğutma kullanımına göre maksimum sıcaklıklarda %50 civarında bir düşüş sağlandığı bulundu. Ayrıca, en iyi ısıl yönetimin %90 gözeneklilik ile sağlandığı görüldü.
Zhang vd. (2017)	Deneysel ve Sayısal /Batarya kullanım hakkında bilgi yok	Alüminyum köpük	PA $T_E = 52^\circ\text{C}$ $k=0,558-0,335 \text{ W/m.K}$ $GI=200 \text{ J/g}$	BIYS (FDM, KFDM1 (yapı1), KFDM2) (yapı2),	Yapılarında metal köpük kullanılan KFDM'lerin (özellikle Yapı 2'nin) termal yönetim için en iyi seçim olduğu sonucuna varıldı.
Hussain vd. (2018)	Deneysel/3,4 Ah 18650 LIB'ler 6S Düzenleme	Nikel köpük-grafen kaplı nikel köpük	PA $T_E = 38-41^\circ\text{C}$ $k=0,19 \text{ W/m.K}$ $GI=143 \text{ J/g}$	BIYS (Nikel köpük, grafen kaplı nikel köpük, saf FDM, nikel köpük-KFDM, grafen kaplı nikel köpük-KFDM), Deşarj akımı (1,7A, 2,2A), Ortam sıcaklığı (25°C , 30°C , 33°C)	En ideal BIYS olarak Grafen kaplı nikel köpük-KFDM kullanımı belirlendi. Bu BIYS ile 33°C 'de ve 1,7 A deşarj akımı altında hücre yüzey sıcaklığı %17 oranında azaltıldı.

Tablo 10'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Gözenekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Grosu vd. (2020)	Deneysel ve Sayısal/20 adet 18650 silindirik batarya	Magnezyum-bakır-çinko makro-nano gözenekli yapı	PA $T_E = 53-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,5\text{ W/m.K}$	Su giriş hızı (0,001 m/s, 0,002 m/s, 0,003 m/s, 0,005 m/s ve 0,01 m/s), ısı yönetim sistemi (saf FDM, KFDM)	Saf FDM kullanımı ile hücre sıcaklıkları güvenli çalışma sıcaklık aralığında tutulamazken, KFDM kullanımı ile hücre sıcaklıkları güvenli aralıkta tutuldu.
Hussain vd. (2023)	Deneysel/3,4 Ah 18650 batarya 6S düzenleme	Nikel köpük, bakır köpük	PA $T_E = 38-41^{\circ}\text{C}$ $k=0,2\text{ W/m.K}$	Deşarj oranı (0,5-1,5-2C), ısı yönetim sistemi (Doğal taşınım, saf FDM, nikel köpük KFDM, bakır köpük KFDM)	Nikel köpük içeren KFDM kullanımı ile 2C deşarj oranı altında hücre yüzey sıcaklıklarında doğal taşınım ve saf FDM kullanımına kıyasla sırasıyla %30,95 ve %24'lük azalmalar sağlandı.
Sun vd. (2023)	Deneysel/ 4,8 Ah 21700 LIB benzetimi için sahte hücreler (Silindirik alüminyum alaşımlı bloklar yerleştirilmiş elektrikli kartuş ısıtıcılar) 4x4=16 adet	Bakır köpük	PA $T_E=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,2\text{ W/m.K}$ $GI=137\text{ J/g}$	BIYS (Doğal hava soğutma, saf FDM soğutma, KFDM soğutma), deşarj oranı ve karşılık gelen sahte hücre voltaj değeri (1C/1,7V, 1,5C/2,8V, 2C/4,2V, 2,5C/5,5V, 3C/6,5V)	3C deşarj oranı altında bakır köpük kullanım ile saf FDM'ye kıyasla 6 $^{\circ}\text{C}$ daha düşük maksimum sıcaklık elde edilmiştir. Ek olarak, bakır köpük-FDM kullanımı ile bataryalar arası sıcaklık farkını 5 $^{\circ}\text{C}$ altında tutuldu.

Tablo 10'un devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Gözenekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Yang vd. (2023)	Deneysel/ 4,59 Ah Prizmatik Li-iyon Polimer	Bakır köpük, karbon köpük, poliüretan köpük	Sodyum asetat trihidrat (SAT) Disodyum hidrojen fosfat dodekahidrat (DHPD)	Deşarj oranı (0,7C, 1,0C, 1,3C, 1,5C), Bakır ve Karbon Köpük Gözenekliliği (%85,%95)	Karbon köpük ve karbon fiber termal iletken conta kombinasyonu ısı yönetim için en ideal seçenek olarak belirlendi.
Zhang vd. (2024b)	Deneysel/ 58 Ah prizmatik LIB 5S1P düzenleme	Nikel köpük, genişletilmiş grafit (GG)	PA $T_E=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $GI=219\text{J/g}$	Deşarj oranı (0,5 C, 1C, 1,5C), Genişletilmiş grafit kütle oranı (%0, %1, %2, %3, %4, %5), BIYS (Doğal hava soğutma, zorlamalı hava soğutma, KFDM soğutma)	Ağırlıkça %4 GG içeren nikel köpük bazlı KFDM ideal ısı yönetim sistemi olarak bulunmuştur.

Metal köpükler yüksek ısı iletkenlik ve yüksek mekanik dayanıklılık sağlarlar. Bu nedenden dolayı, FDM ile birleştirerek hem yapı destek malzemesi hem de FDM'nin ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla BIYS'lerde kullanılmaktadırlar (Li vd., 2024b). Metal köpükler ve FDM'lerin birleşmesi ile oluşturulan KFDM'lerin BIYS'ler üzerinde incelendiği çalışmalar Tablo 10'da verilmiştir.

Khateeb vd. (2005) FDM'ye alüminyum köpük ilavesi ile oluşturulan KFDM'nin BIYS'ler için kullanılmasını araştırdılar. Çalışmalarının sonucunda, parafine alüminyum köpük ilavesi ile oluşturulan KFDM kullanılarak batarya paketlerinde sıcaklığın, herhangi bir BIYS kullanılmadığı duruma kıyasla %50'ye yakın bir oranda düşürüldüğünü buldular.

Li vd. (2014) bakır köpük ve FDM birleşiminden oluşan KFDM'lerin BIYS'lerde kullanımını araştırdılar. Çalışmalarında, KFDM kullanımını farklı deşarj oranları, gözeneklilik ve gözenek yoğunlukları için incelediler. Çalışmalarının sonucunda, bu deşarj oranları için saf FDM ve KFDM kullanımının her ikisiyle birden hücre yüzey sıcaklıklarının kontrol edildiğini buldular. Fakat batarya paketinin herhangi bir BIYS kullanmaksızın doğal

taşınımına maruz bırakıldığında ise sıcaklık üst limitinin aşıldığını gösterdiler. Ayrıca, hücre yüzey sıcaklıklarının da gözeneklilik ve gözenek yoğunluğuna paralel olarak (artışla/artış, azalışla azalış) değiştiğini tespit ettiler.

Wang vd. (2015) batarya ısı yönetim sistemleri için PA ve alüminyum köpükten oluşan bir kompozit faz değiştiren malzeme (KFDM) kullanımını araştırdılar. Yaptıkları deneyler sonucunda, KFDM kullanımı ile saf FDM kullanımından daha iyi bir ısı performans sağlandığını ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiğini buldular.

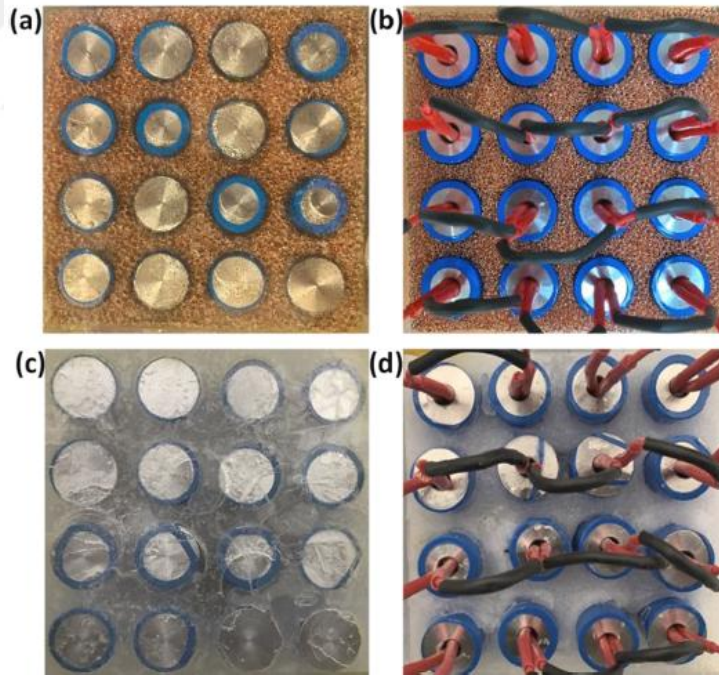
Hussain vd. (2016) çalışmalarında nikel köpük ve FDM birleşiminden oluşan KFDM tasarımı yaptılar ve bu tasarımın BIYS üzerindeki etkilerini araştırdılar. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonucunda oluşturdukları KFDM'nin kullanımı ile doğal taşınımına maruz bırakılan ve saf FDM kullanılan BIYS'lere kıyasla sıcaklıkların sırasıyla 31% ve 24% oranlarında düşürüldüğünü buldular. Ayrıca, farklı gözeneklilik oranları ve gözenek yoğunluklarının kullanılmasının da batarya yüzey sıcaklığı üzerinde etkili olduğunu gösterdiler.

Pan ve Lai (2017) Li-ion batarya ısı yönetimi için bakır fiber-KFDM kullanımının etkisini araştırdılar. Çalışmalarında, doğal hava soğutması, saf FDM, bakır köpük-KFDM ve bakır fiber-KFDM olmak üzere dört farklı yaklaşımın ısı performanslarını karşılaştırdılar. Çalışmanın sonucunda, bakır -fiber KFDM kullanımının doğal hava soğutma kullanılan duruma göre sıcaklık artışını yaklaşık %50 azalttığı ve batarya sıcaklıklarını 60°C'nin altında tuttuğunu buldular. Ayrıca, bakır -fiber KFDM kullanımı ile maksimum sıcaklık farkının yaklaşık 2°C olduğunu ve %90 gözenekliliğe sahip bakır fiber-KFDM ile en iyi ısı kontrol sağlandığını tespit ettiler.

Zhang vd. (2017) alüminyum köpük ve FDM birleşimi ile oluşturulan KFDM'lerin BIYS'ler için kullanımını araştırdılar. Çalışmalarında, oluşturdukları sayısal modeli deneysel olarak doğruladılar ve KFDM için iki farklı alüminyum köpük yapının (gövde merkezli kübik (yapı-1) ve yüz merkezli kübik (yapı-2)) kullanımını sayısal olarak incelediler. Çalışmalarının sonucunda, %90 gözeneklilik ve 2,8 mm gözenek boyutuna sahip olan yapı 2'nin kullanımı ile daha fazla ara yüz yüzey alanı ve düzgün sıcaklık dağılımı sağlanması nedeniyle üstün ısı performans elde edildiğini ve saf FDM kullanımına kıyasla toplam erime süresinde %28'lik bir azalma sağlandığını buldular. Ayrıca, metal köpük yapılarla oluşturulan KFDM'lerin kullanımının saf FDM kullanımına kıyasla ısı transfer verimliliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini vurguladılar.

Grosu vd. (2020) üç bileşenli Mg-Cu-Zn alaşımlı makro-nano gözenekli bir yapı oluşturdular ve bu yapıya PA emdirerek KFDM hazırladılar. Hazırladıkları KFDM ile FDM sızıntısının mükemmel bir şekilde engellediğini ve saf PA'nın ısı iletkenliğinin üç kat arttırıldığını buldular. Ayrıca, sayısal çalışma sonuçları ile KFDM kullanılarak batarya yüzey sıcaklıklarının güvenli sıcaklık aralığında tutulduğu belirlendi.

Sun vd. (2023)'ün çalışmalarına ait görsel şekil 7'de verilmiştir. Bu çalışmada ısıtıcılara çeşitli C oranlarındaki batarya ısı üretimine karşılık gelen çeşitli sabit voltajlar uygulanarak hava soğutma, saf FDM soğutma ve bakır köpük-FDM soğutma yöntemleri karşılaştırıldı. LIB'leri simüle etmek içinse aynı boyutta 16 adet alüminyum kartuş ısıtıcı kullanıldı. Çalışmanın sonucunda, Saf FDM kullanımı ile 3C deşarj oranı altında maksimum sıcaklığın 57,4°C'ye ulaştığı, doğal hava soğutmasına maruz bırakılan hücrelerin ise 90°C'lik güvenlik bariyerini aştığı bulundu. Ayrıca, bakır köpük/FDM kullanımı ile ise maksimum sıcaklık artışının 51,4 °C'ye düşürüldüğü ve hücreler arası sıcaklık dağılımının 5°C altında tutulduğu görüldü.



Şekil 7. Batarya modülü a) Bakır köpük-FDM, alt görünüm b) Bakır köpük-FDM, üst görünüm c) Saf FDM, alt görünüm d) Saf FDM, üst görünüm (Sun vd., 2023).

Zhang vd. (2024b) nikel köpük, genişletilmiş grafit ve parafinden oluşan bir kompozit FDM kullanılarak yapılan çalışmada, bataryalarda ısı kontrolüne yönelik yeni bir yaklaşım

önerdiler. İdeal bileşim ağırlıkça %4 genişletilmiş grafit içermekte ve mekanik mukavemeti ve termal iletkenliği büyük ölçüde iyileştirmektedir. Bu kompozit malzeme, büyük kapasiteli 5S1P LIB modülünde kullanıldığında, doğal hava soğutmasına kıyasla maksimum sıcaklığı %19,52, zorlamalı hava soğutmasına kıyasla ise %5,79 oranında düşürmüştür. Maksimum sıcaklık farklarını ise doğal ve zorlamalı hava soğutmasına kıyasla sırasıyla %38,15 ve %35,41 oranında azaltmıştır. Dolayısıyla, bu KFDM daha iyi batarya modülü güvenliği ve sıcaklık düzenlemesi sunmaktadır.

1.10.5. Genişletilmiş Grafit/FDM Etkisinin Batarya Isıl Yönetim Sistemleri için İncelendiği Çalışmalar

Yüksek ısı iletkenlik, geniş yüzey alanı ve zararlı madde bulundurmaması gibi öne çıkan özellikleri bünyesinde barındıran genişletilmiş grafit (GG), FDM'ler ile birlikte kompozit bir ısı iletim sistemi üretmek adına oldukça dikkat çekmektedir (Cheng vd., 2017). Kompozit faz değıştiren malzemeler (KFDM) hem GG' nin yüksek ısı iletkenliği hem de FDM' nin yüksek gizli ısısına sahip olmanın avantajından yararlanmaktadırlar ve ayrıca erime ve katılaşma esnasında GG FDM sızıntısını engellemektedir (Jiang vd., 2016 ve Mei vd., 2022). Parafinin ısı iletkenliğini arttırmak için GG'nin kullanılması ilk olarak Xiao vd. (2002) tarafından önerilmiş olup %3 oranında GG ilavesinin FDM'nin ısı iletkenliğinde son derece önemli bir iyileşme gösterdiğini ifade etmişlerdir. GG ve çeşitli FDM'lerin birlikte kullanılması sonucu elde edilen KFDM'ler ve bu KFDM'lerin BIYS'ler için uygulanmasını inceleyen çalışmalar Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. Genişletilebilir grafit/FDM kompozit ısı iletim sistemlerinin bataryalar üzerinde uygulandığı çalışmalar

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Mills & Al-Hallaj (2005)	Deneysel ve Sayısal/6 adet 18650 2,2Ah Li-iyon	GG	RT42 $k=0,2\text{W/m.K}$	Deşarj gücü(6.6W, 4.125W ve 2.75W). KFDM hacmi (105.90, 79.55, 29.45 cm ³)	İdeal KFDM için batarya paketi hacminde %10'luk bir artış gerektiği belirlenmiştir.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze- nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Mills vd. (2006)	Deneyssel/ 2,4 Ah 18650 LIB 7S2P düzenleme	GG	RT42 $k=0,2W/m.K$	GG yığının yoğunluğu (50-350 g/L arası), Deşarj oranı (1, 1,7, 2,1C)	Saf FDM'ye kıyasla 20-130 kat daha fazla ısı iletkenliğe sahip KFDM'nin batarya paketi performansını attırdığı belirlendi.
Kizilel vd. (2008)	Deneyssel/ 2,2 Ah hücreler 4S4P ve 8S2P, 2,4 Ah 18650 hücreler 7S2P düzenleme	GG	FDM ₁ $T_{E1}=42-45^{\circ}C$ FDM ₂ $T_{E2}=52-55^{\circ}C$	Ortam sıcaklığı (25, 45 °C), Deşarj oranı (1C, 2,08C), BIYS (KFDM yok, KFDM var)	10A deşarj ve 45°C gibi yüksek deşarj akımı ve sıcaklık değerleri için pasif ısı kontrol sağlayan FDM'ler kullanılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.
Alrashdan vd. (2010)	Deneyssel	GG	PA $T_E=58-60^{\circ}C$ $k=0,2W/m.K$	Ortam sıcaklığı (22, 35, 45 °C), KFDM içerisindeki Parafin yoğunluğu (579,565, 556,450,412 kg/m ³)	Düşük sıcaklıklarda artan parafin yoğunluğu ile çekme, sıkıştırma ve patlama mukavemeti yükselirken, yüksek sıcaklıklarda tam tersi tespit edildi.
Barsotti vd. (2014)	Sayısal/ 6 adet 15S3P batarya modülü	GG	FDM $T_E=34.5-39,5^{\circ}C$	BIYS (Al soğuk plaka, KFDM soğuk plaka), akışkan giriş sıcaklığı (15,20,25,30 °C), Sürüş Döngüsü (FTP75, HWFET)	%66 kütle azalışının yanında ile KFDM soğuk plakanın alüminyum soğuk plakadan daha az aktif soğutma gerektirdiği belirlendi.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Fathabadi (2014)	Sayısal/2 Ah ince film düz LIB 2S10P düzenleme	GG	PA $T_E = 58-60^\circ\text{C}$ $k=0,2\text{W/m.K}$ $GI=127\text{J/g}$	Ortam sıcaklığı (20,26,31,35, 42,45,51,54,57 °C)	Ortam sıcaklığı 55 °C ulaşınca kadar önerilen aktif+pasif BIYS'ın batarya paket sıcaklığını 60°C altında tuttuğu belirlenmiştir.
Ling vd. (2014)	Deneysel ve Sayısal/ Batarya yerine silindirik ısıtıcılar (4adet)	GG	PA $T_{E1} = 36^\circ\text{C}$ PA $T_{E2} = 44^\circ\text{C}$ PA $T_{E3} = 52^\circ\text{C}$	Isıtıcı gücü (5,10,15W), (3 farklı parafin), parafin kütle yüzdesi (%75,%85), paket yoğunluğu (700, 798, 847, 890, 919, 1040 kg/m ³)	Yoğunluğu 890 kg/m ³ , parafin kütle oranı %75 ve erime noktası 44 °C olan parafin/GG en ideal durum olarak tespit edildi.
Lin vd. (2015)	Deneysel ve Sayısal/ 40 Ah Prizmatik LiFePO ₄ 6S düzenleme	GG	PA $T_E = 23,9-27,1^\circ\text{C}$ $k=0,16\text{W/m.K}$ $GI=174,4\text{J/g}$	Deşarj oranı (1,2C), ısıl yönetim sistemi (KFDM (yok), KFDM (var))	KFDM kullanımı ile maksimum sıcaklık farkının 5 °C'yi aşmadığı tespit edilmiştir.
Greco vd. (2015)	Sayısal/ Tekli 26650 LIB	GG	n-heptadekan $T_E = 21,9^\circ\text{C}$ $GI=214\text{J/g}$ n-Oktadekan $T_E = 28^\circ\text{C}$ $GI=241\text{J/g}$	Nümerik model(1B model, 3B model) Isıl yönetim sistemi (KFDM, zorlanmış akışlı hava soğutma)	KFDM'nin zorlanmış havadan daha iyi performans sergilediği ve 1B nümerik modelin sıcaklık dağılımını belirlemek için yeterli olduğu bulundu.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Greco & Jiang (2016)	Sayısal/ 1, 4 ve 5 adet Silindirik LiFePO ₄	GG	n-heptadekan $T_E = 21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ $GI = 214\text{ J/g}$	Deşarj Oranı (2C, 4C, 8C), BIYS (KFDM, KFDM+Kanakçık), Model (1,2 ve 3 boyutlu modeller), Farklı modüller (4 adet batarya, 5 adet batarya)	2B modelin yeterli olduğu ve kanatçık donanımlı tasarımın düşük sıcaklıklar sağladığı özellikle de yüksek deşarj oranlarında soğutma verimliliğini önemli ölçüde artırdığı görüldü.
Jiang vd. (2016)	Deneyisel/ Tekli 26650 LiFePO ₄	GG	RT44HC $T_E = 41-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0,2\text{ W/m.K}$ $GI = 275\text{ J/g}$	GG kütleli yüzdesi (%0,3,6,9,12,16,20, 30)	İdeal kütle GG kütle oranı 16–20% olarak belirlenmiştir.
Lv vd. (2016)	Deneyisel/ 2Ah 18650 LIB 6S4P Düzenleme	GG+ DYPE	PA $T_E = 44,5-50,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0,16\text{ W/m.K}$ $GI = 182\text{ J/g}$	Deşarj oranı (1C, 2.5C, 3.5C), BIYS (Doğal hava soğutma, PA/GG/DYPE KFDM, PA/GG/DYPE, KFDM+Kanakçık)	PA/GG/DYPE+ Kanatçık KFDM kullanan termal yönetim sisteminin, batarya yüzey sıcaklıklarını 3,5C yüksek deşarj oranının altında bile güvenli çalışma aralığında tuttuğu görüldü.
Wu vd. (2016)	Deneyisel/1 2Ah Prizmatik LiFePO ₄ 5S düzenleme	GG	PA $T_E = 42^{\circ}\text{C}$ $k = 0,26\text{ W/m.K}$ $GI = 186\text{ J/g}$	Deşarj oranı (1,2,3,4,5C) Hava hızı (0,1,2,3,4m/s), Bakır tel örgü (yok-var)	KFDM' ye bakır tel örgü ilavesi ve artan hava hızı batarya yüzey sıcaklıklarını azaltmıştır.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Yan vd. (2016)	Deneyssel/1 6 Adet 2 Ah LIB silindirik hücre	GG	RT36 $T_E = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,37\text{W/m.K}$ $GI=21,4\text{J/g}$ RT45 $T_E = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,22\text{W/m.K}$ $GI=111,3\text{J/g}$ RT58 $T_E = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,16\text{W/m.K}$ $GI=163,3\text{J/g}$	Deşarj oranı (1,3C), BIYS (Doğal taşınım, KFDM (RT-36), KFDM (RT-45), KFDM (RT-58))	RT-45 ihtiva eden KFDM bu batarya paketi özelinde BIYS olarak kullanılmak üzere en ideal durum olarak önerilmiştir.
Wu vd. (2017a)	Sayısal/12 Ah 12 adet Prizmatik Batarya	GG	PA $T_E = 42-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,3\text{ W/m.K}$ $GI=186,4\text{J/g}$	GG kütleli yüzdesi (%1,5,10,15,20,25, 30), Hücreler arası mesafe (4,8,12,14,16mm), h (10,50,100, 150, 200 W/m ² K), BIYS (KFDM, KFDM+ Grafit plaka)	En iyi ısı performans elde etmek için %15- 20 arası GG kütle oranları önerilmiştir.
Zhao vd. (2017)	Deneyssel/ Batarya yerine alüminyum silindirler	GG+ Isıl Boru	PA $T_E = 43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,283$ W/m.K $GI=202,59\text{ J/g}$	BIYS (hava soğutma (0, 4,3, 6,3, 7,3, 9,3 m/s hızlar için), KFDM (doğal taşınım), KFDM + Isıl boru (0, 2,3, 6.3 m/s hızlar İçin)	KFDM/ısı boru BIYS maksimum sıcaklığının 50 °C ulaşma süresinin, aynı koşullar altındaki hava soğutma ve KFDM tabanlı BIYS' lara kıyasla daha uzun sürdüğü belirlenmiştir.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Ling vd. (2018)	Deneyssel/ 2,6Ah LIB 18650, 5S4P düzenleme	GG	RT44HC $T_E = 43,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,24\text{W/m.K}$ $GI=232\text{J/g}$	GG kütlelesel yüzdesi (%0,30), Deşarj oranı (0,5, 1, 1,5 ve 2C), ortam sıcaklığı ($-5,10 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	GG ilavesi ile paket içi sıcaklık farkı bütün testlerde 4°C altında tutulmuştur.
Lv vd. (2018)	Deneyssel ve Sayısal/ 2Ah 18650 LIB 1S6P Düzenleme	GG+ DYPE+ NS	PA (RT-45) $T_E \approx 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Test sıcaklıkları (25, 35, 45, 50, 55 ve 60°C), PA/NS yüzdesel ağırlıkları (63/0, 60/3, 58/5, 57,5/5,5, 57/6, 56/7), Deşarj oranı (2C,3C)	En ideal nanosilika (NS) ağırlığı %5,5 olarak bulundu. Bu bileşimin, sızıntı ve hacim değişikliği önleme açısından dengeyi sağlayarak KFDM'nin soğutma verimliliğini ve dayanıklılığını arttırdığı görüldü.
Wang vd. (2018)	Deneyssel/ 3,3 Ah 18650 LIB 10S3P Düzenleme	GG	PA $T_E = 37,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,245 \text{ W/m.K}$ $GI=200,66 \text{ J/g}$	Ortam Sıcaklığı ($0,10,20,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$), Deşarj oranı (1C,2C), ısıl yönetim sistemi (KFDM(yok), KFDM(var)	KFDM'nin ortalama sıcaklığı önemli derece de azalttığı ve sıcaklık dağılımını iyileştirdiği bulundu.
Zhang vd. (2018)	Deneyssel/ 12,5 Ah prizmatik LIB 6S1P düzenleme	GG+ Kaolin	PA $T_E = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,2774 \text{ W/m.K}$ $GI=210,92 \text{ J/g}$	Deşarj oranı (2C,3C,4C), GG/Kaolin yüzde ağırlıkları (K20, K15GG5, K12GG8, K10GG10, K8GG12)	K10GG10 ve %80 PA ideal üçlü birleşen olarak belirlenmiştir.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Huang vd. (2019)	Deneyssel ve Sayısal/ 2Ah 18650 LIB 5S1P ve 5S2P Düzenleme	GG+ OBK veya YYPE	Eikosan Tetrakosan	BIYS (KFDM yok, KFDM1 (Eikosan/GG/OBK), KFDM2 (Tetrakosan/GG/OBK), KFDM3 (Eikosan/GG/YYPE)), Deşarj oranı (5C, 10C), Ortam sıcaklığı (25,31, 42 °C), batarya yerine kullanılan ısıtıcı gücü (10, 15, 20, 55, 65,75 W)	Esnek KFDM'ler, KFDM3 ve KFDM olmayan duruma göre daha iyi ısı kontrol sağladı. KFDM1'in (faz değişim sıcaklığı= 33 °C) düşük güç ve sıcaklıklar için, KFDM2'nin (faz değişim sıcaklığı=47 °C) ise yüksek güç ve aşırı sıcaklıklar için ideal olduğu saptandı.
Chen vd. (2020)	Deneyssel/ Tekli 1,1 Ah 18650 LIB ve Tekli 2,6 Ah LIB	GG	PA $T_E \cong 52-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	Deşarj oranı (1, 2C), BIYS (ağır koşul (kapalı ortam, doğal taşınım), doğal taşınım, KFDM, KFDM ve kanatçık)	2C deşarj oranı altında 2,6 Ah hücre için KFDM kullanımı ile doğal taşınımına kıyasla maksimum sıcaklıkta 12,3 °C'lik bir iyileşme sağlandı. Ayrıca, kanatçık ilavesinin belirgin bir etki oluşturmadığı görüldü.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Huang vd. (2020)	Deneyssel ve Sayısal /18650 LIB 25P düzenleme	GG	PA $T_E = 46 \pm 3$ °C $k = 0,22 \text{ W/m.K}$ $GI = 250 \text{ J/g}$	BIYS (FDM, KFDM), KFDM ısı iletkenliği (0.1,0.2,0.3, 0.5,1,2,3,5,7,10,15 W/m.K), KFDM gizli ısı , (124,150,175,200, 225,250,275 J/g) KFDM gözenekliliği (%60,70,80,90,92, 94,96,98)	Daha yüksek ısı iletkenlik ve gizli ısı maksimum sıcaklığı düşüşü ve sıcaklık tekdüzeliği açısından daha iyi bir performans sergilemiştir. Ayrıca, en ideal gözeneklilik oranı %94 olarak bulunmuştur.
Luo vd. (2020)	Deneyssel/ 2,6 Ah 18650 LIB 3S3P düzenleme	GG+ ER	PA $T_E = 33.9 - 48$ °C $k = 0.22 \text{ W/m.K}$ $GI = 225.5 \text{ J/g}$	Deşarj oranı (1C,2C,3C, 4C), ısı iletkenlik sistemi (KFDM (yok), KFDM(var))	Bataryaların maksimum sıcaklığının 6 döngüden sonra bile 44.8 °C yani güvenlik eşiği olan 50 °C altında kaldığı tespit edilmiştir.
Talluri vd. (2020)	Sayısal ve Deneyssel /16 Ah tekli, 4S ve 56S2P düzenleme ile kese tipi hücre	GG	RT-15 $T_E = 15$ °C $k = 0,21 \text{ W/m.K}$ RT-31 $T_E = 31$ °C $k = 0,21 \text{ W/m.K}$	Deşarj oranı (1-0.5, 0,25C), (KFDM yok, RT15 FDM, RT-31 FDM, KFDM GG-5 ve GG-26 (erime noktası 5 ve 26 °C))	FDM içermeyen BIYS'a kıyasla ısı transferi oranını %16,4'e kadar iyileştiren GG en iyi faz değıştiren malzeme olarak belirlendi.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Zhang vd. (2020)	Deneyssel/ 1,1 Ah 18650 LiFePO ₄ batarya 30P Düzenleme	GG+ER+ AIN	PA $T_E = 50,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,2\text{W/m.K}$ $GI=239,35\text{J/g}$	Kütlelesel AIN oranı (0, 5, 10, 15, 20, %25), Deşarj oranı (1C, 2C,3C), BIYS (Hava soğutma, KFDM)	Kütlelesel olarak %20 AIN (Alüminyum-Nitrür) ile güçlendirilmiş KFDM'ler, ısı dağılımı, sıcaklık kontrolü ve sıcaklık tekdüzeliği açısından en ideal durum olarak belirlenmiştir.
Li vd. (2021c)	Deneyssel/ 16Ah Kese tipi LIB 5S Düzenleme	GG+ EVA veya DYPE	PA $T_E = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ $GI=241\text{J/g}$	GG kütlelesel yüzdesi (0, %1, %3, %5), Deşarj oranı (1C,2C,3C,4C)	%5 GG ihtiva eden EVA tabanlı KFDM, diğer KFDM'lerin aksine daha yüksek sıcaklık kontrol performansı, daha düşük ısı temas direnci ve daha fazla esneklik sağladığı için en ideal durum olarak belirlendi.
Wu vd. (2021)	Deneyssel/ 1,5 Ah 18650 LiFePO ₄ batarya 6S4P Düzenleme	GG+ER	RT-44HC $T_E = 47,2^{\circ}\text{C}$ $GI=249\text{J/g}$	Deşarj oranı (1C, 2C, 3C), BIYS (Boru şeklinde-KFDM, küboid-KFDM, boru şeklinde-KFDM + hava soğutma, küboid-KFDM + hava soğutma)	%54 daha az FDM ve 94,4 Wh/kg enerji yoğunluğu ile boru şeklindeki KFDM batarya sıcaklıklarını 47,2°C'nin sıcaklık farklarını ise 1,0°C'nin altında tutmuştur ve en ideal ısı yönetim sistemi olarak belirlenmiştir.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Chen vd. (2022b)	Sayısal ve Deneysel doğrulama /120 adet 3Ah 21700 LIB	GG+ Sıvı soğutma	RT-44HC $T_E = 44^\circ\text{C}$ $k=0,20\text{W/m.K}$ $GI=270,7\text{J/g}$	GG Kütlesel Yüzdesi (%0, %3, %6,%9,%12), Akışkan Kanal Çapı (2, 3, 4, 5, 6 mm), Hücreler Arası Mesafe (22, 23, 24, 25 mm), akış hızı (0, 0,05, 0,1 g/s), Soğutma stratejisi (sürekli sıvı soğutma, gecikmeli sıvı soğutma), 5 farklı parçalı KFDM Matris Düzeni	En ideal batarya ısıl yönetim performansı, 3 parçalı ve yapısında saf FDM, KFDM3 ve KFDM6 kullanan, 110 mm, 120 mm ve 120 mm parça uzunlukları ve hücreler arası 24 mm aralıklı olan düzen III ile sağlanmıştır.
Ma vd. (2022)	Deneysel/ 2,5 Ah 18650 LIB 9S Düzenleme	EG+BN	n-Dokosan	Deşarj Oranı (1C,2C), Şarj/Deşarj Arası Bekleme süresi (10, 20 dk.), PA/GG oranı (%95/%5, %90/%10, %85/%15, %80/%20), (BIYS (Doğal Hava Soğutma, KFDM)	İdeal KFDM birleşiminin (PA: GG: BN = %83,3:%14,7:%2), termal iletkenliği artırmanın yanında batarya yüzey sıcaklıklarını azaltarak daha iyi soğutma performansı ve güvenlik sağladığı belirlendi.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Mei vd. (2022)	Deneyssel/ Tekli 2,6Ah 18650 LIB	GG	PA $T_E = 46,4^\circ\text{C}$ $GI = 136,1\text{J/g}$	Deşarj oranı (1C,2C,3C), ortam sıcaklığı ($25,45,60^\circ\text{C}$), ısıl yönetim sistemi (batarya/kanatçık(yok-var), PA/kanatçık(yok-var), GG/PA/kanatçık (yok-var))	Batarya sıcaklığında %35,5 düşüşle en iyi ısıl performansın GG/PA/Kanatçık birleşimi ile elde edildiği tespit edilmiştir.
Subramanian vd. (2022)	Deneyssel ve Sayısal/ 18650 2,2Ah LiFePO ₄ , 8S3P düzenleme	GG	PA $T_E = 52^\circ\text{C}$ $k = 0,20\text{W/m.K}$ $GI = 147\text{J/g}$	GG kütleli yüzdesi (%0, 0,5, 1, 1,5, 2), ortam sıcaklığı ($25, 40$ ve 55°C)	En iyi ısıl kontrol açısından İdeal GG kütle oranı %2 olarak bulunmuştur.
Zhu vd. (2022)	Deneyssel ve Sayısal/ 18650 LIB batarya 9P düzenleme	GG+ Sıvı soğutma	PA $T_E = 30-38^\circ\text{C}$ $k = 0,21$ W/m.K $GI = 200\text{J/g}$	Isıl yönetim sistemi (KFDM, farklı akış yönleri ve düzenlemeleri +KFDM), GG kütle oranı (%15,20,25,30, 35)	Sadece KFDM içeren duruma kıyasla, ters akışlı çapraz kanal düzenlemesi ile yapılan hibrit tasarımın, maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve katılma süresi açısından daha iyi bir performans sergilediği bulunmuştur.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Xin vd. (2022).	Sayısal/ 3Ah 26650 LIB 5S5P düzenleme	GG+ Sıvı soğutma	RT-44 HC PA $T_E = 41-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0,2\text{ W/m.K}$ $GI=275\text{J/g}$	FDM kalınlığı (2,3,4,5,6 mm), Akış yönü (Paralel akış, ters akışlar ve karışımı) , GG kütle oranı (% 0, 3, 6, 9, 12, 20, 30), akış hızı (0,01-0.005 m/s), akışkan sıcaklığı (25,35,40 $^{\circ}\text{C}$)	5C deşarj oranı altında %12 FDM kütle oranı ve ters yönlü akışı bünyesinde barındıran ısıl yönetim sistemi İdeal durum olarak belirlenmiştir.
Wang vd. (2023)	DeneySEL ve Sayısal/ 2,5 Ah 18650 LIB 16P Düzenleme	GG	PA ₁ $T_{E1} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ PA ₂ $T_{E2} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ PA ₃ $T_{E3} = 54\text{ }^{\circ}\text{C}$	Parafin erime noktaları (45 $^{\circ}\text{C}$, 48 $^{\circ}\text{C}$ ve 54 $^{\circ}\text{C}$), Deşarj oranı (1C, 1.5C, 2C), Nümerik çalışma için grafit kütleli yüzde aralığı (%1-%30), Optimizasyon için taşınım ısı transfer katsayısı aralığı (0-40 W/m ² .K)	PA ₂ FDM ile en iyi ısı kontrol sağlanmıştır. Grafit kütle oranının %10,9, taşınım ısı transfer katsayısının 0,8 W/m ² .K ve hücreler arası mesafenin 4,4 mm olduğu durum ısıl güvenlik için yeterli bulunmuştur.
Yu vd. (2023)	DeneySEL/ 3,2 Ah 18650 LIB 2S2P Düzenleme	GG+YY PE +AG (Alev Geciktirici)	PA $T_E=42,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k=0.27\text{ W/m.K}$	Deşarj oranı (1C,2C,3C), BIYS(doğal hava soğutma, KFDM15, KFDM20, KFDM25, KFDM30 (KFDM yanındaki sayı: alev geciktirici kütleli yüzdesi))	KFDM'ler ile 2C deşarj oranı altında maksimum hücre sıcaklığı ve hücreler arası sıcaklık farkı sırasıyla 50 $^{\circ}\text{C}$ ve 5 $^{\circ}\text{C}$ altında tutulmuştur. KFDM25 en ideal KFDM olarak bulunmuştur.

Tablo 11'in devamı

Yazar	Kapsam ve Batarya Tipi	Göze-nekli Yapı	FDM	Araştırma Parametreleri	Sonuç
Zhang vd. (2023)	Deneyssel /10Ah Tekli Prizmatik LIB	GG	PA $T_E = 53.1^{\circ}\text{C}$ $k=0.218$ W/m.K GI=168J/g Laurik asit $T_E = 43.1^{\circ}\text{C}$ $k=0.145$ W/m.K GI=178J/g	Ortam Sıcaklığı (20, 25, 30 ve 35°C), Deşarj oranı (0.5,1,1.5C), GG kütleli yüzdesi (%0,5,10,15,20), Parafin ve Laurik asit kütlesi (4/6, 5/5 ve 6/4 g)	%15 GG Kütle oranında GG içeren ve 1:1 oranında PA ve Laurik asit içeren KFDM'nin en iyi soğutma performansını sergilediği tespit edilmiştir.
Li vd. (2024a)	Deneyssel/ 3.1 Ah 18650 LIB 37S1P düzenleme	GG	RT-40 $T_E = 40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ $k=0.3$ W/m.K GI=217 J/g	Sıkıştırılmış grafit yoğunluğu (0.1,0.15,0.2,0.25,0.3 g/cm ³), Deşarj oranı (1,2,3C), ortam sıcaklığı (10,15,20 $^{\circ}\text{C}$), KFDM katman sayısı (1,2,3,4), BIYS(Doğal hava, KFDM)	KFDM'siz batarya paketine kıyasla batarya paketinin maksimum sıcaklığı %29.9, batarya paketindeki maksimum sıcaklık fark ise %55.3 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.
Zhi vd. (2024)	Deneyssel/5 Ah kese tipi LIB	GG+ Poliüretan köpük	Kal- (SO ₄) ₂ ·12H ₂ O ve Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O tuz hidrat karışımı $T_E = 69.8^{\circ}\text{C}$	Deşarj oranı (1,1.5,2C) GG kütlesi (2,4,6 g) Isıl yönetim sistemi (doğal hava soğutma, KFDM)	Doğal hava soğutma ile kıyaslandığında batarya maksimum sıcaklığında %20.4 maksimum sıcaklık farkında ise %59.7 düşüş sağlanmıştır.

Mills ve Al-Hallaj , (2005) GG ilavesi ile KFDM kompozitin özelliklerinin iyileştirerek oluşturulan pasif soğutma yönetim sisteminin geleneksel soğutma yöntemlerine

kıyasla batarya paketi hacim artışı büyük oranda azaltmışlardır. Yalnızca %10'luk bir hacim artışı ile yüksek güç altında batarya paketini 55 °C altında tutmuşlardır.

Mills vd. (2006) 50-350 g/L arası yığın yoğunluğuna sahip GG'lere RT-42 PA emdirerek oluşturdukları numuneleri 7S2P düzenlemeye sahip Li-ion batarya paketi için test ettiler. Çalışma sonucunda, bu yöntemin batarya paketleri için etkili bir pasif ısı yönetim sistemi olduğunu ve FDM'nin ısı iletkenliğini 20-130 kat arası artırdığını tespit ettiler. Ayrıca, KFDM'nin (Kompozit faz değiştiren malzeme) ısı iletkenliğinin sıkıştırma yönüne dik yönde daha fazla arttığını buldular.

Kizilel vd. (2008) yüksek enerjili Li-ion batarya paketlerinde pasif ısı kontrolü için kompozit faz değiştiren malzeme (KFDM) kullanımını araştırdılar. KFDM'nin, paket sıcaklıklarını 45°C'nin altında tutarak güvenliği artırdığını ve sıcaklık homojenliğini koruyarak maksimum sıcaklık farkını 10 °C'den 4 °C'ye indirdiğini buldular. KFDM ile ve KFDM olmadan, ilk deşarj kapasiteleri sırasıyla %88 ve %94 olarak tespit edildi. Kapasite azalması, 300 döngüden sonra KFDM ile (5,5-5,7 mAh/döngü) ve KFDM olmadan (10,7-13,4 mAh/döngü) bulunduğundan KFDM'nin kapasite azalışını da engellediği tespit edildi. KFDM'li paketler, aşırı ortam şartlarında (45 °C ortam sıcaklığı, 10A deşarj) nominal kapasitenin %90'ını kullanırken, KFDM'siz paketler %42-50'sini kullanmıştır. Bu sonuçlar, KFDM'nin zorlu koşullar altında batarya güvenliğini ve performansını artırma yeteneğini göstermiş ve KFDM'yi yüksek güçlü uygulamalar için uygun bir seçenek olarak sunmuştur.

Fathabadi (2014) yaptığı çalışmada 2 Ah prizmatik hücrelerden oluşan 2S10P düzenlemeye sahip aktif hava soğutma, doğal taşınım ve pasif KFDM'nin birleşimini içeren bir BIYS önerdi. Farklı ortam sıcaklıkları için 2C deşarj oranı altında bu BIYS'ın performansını sayısal olarak incelediği çalışmanın sonucunda, 55 °C kadar olan ortam sıcaklıklarında batarya paket sıcaklığının güvenli çalışma sıcaklığı limiti olan 60 °C altında tutulduğunu belirledi.

Lin vd. (2015), gerçekleştirdikleri deneysel ve nümerik çalışmada 7S düzenlemesine sahip 40 Ah prizmatik bataryalardan oluşturulan modüle GG/PA'ya ek olarak yüksek ısı iletkenliğe sahip grafit plakalar yerleştirerek maksimum sıcaklık artışında %37 varan bir düşüş sağladılar. Ayrıca testler sırasında modül içi en yüksek sıcaklık farkını ideal eşik olan 5 °C altında tutmayı başardılar.

Greco ve Jiang (2016) 1B modeli, tekli silindirik hücrenin anizotropik ısı iletkenliğinin bir sonucu olarak çalışmada işlemi basitleştirmek için, 2B ve 3B simülasyonları ise batarya modüllerinde sıcaklık dağılımını incelemek amacıyla tercih

ettikleri bir nümerik çalışma gerçekleştirdiler. 2B uygulamalar için hücre merkezli Lagrangian difüzyon yöntemine dayalı yeni bir kod geliştirilerek, 2B ve 3B simülasyonlar için SYRTHES4.0 ve PARAVIEW'i SALOME7.4 üzerinden kullandılar. Çalışmada iki batarya modülü tasarımı karşılaştırıldı: FDM/GG bloğuna gömülü silindirik hücrelere sahip olağan tasarım ve bu tasarıma ek olarak kanatçıklara sahip yeni bir tasarım. Yeni tasarım, maksimum sıcaklıkları 89,11 °C'den 49,11 °C'ye düşürerek üstün soğutma performansı gösterdi. Çalışma, 2B modelin batarya modüllerindeki sıcaklığı tahmin etmek için yeterli olduğu sonucuna vardı.

Jiang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, %3, %6, %9, %12, %16, %20 ve %30'luk değişen kütle oranlarında genişletilmiş grafit (GG) ve parafinden oluşan bir dizi KFDM sentezlendi. Sonuçlar, %30 GG kütle oranında, KFDM'lerin ısı iletkenliğinin 13,85 W/m·K'ye çıktığını, parafin sızıntısının ise parafin kütlesinin %0,38'ine düştüğünü gösterdi. Bununla birlikte, kompozitlerin hem ısı iletkenliği hem de gizli ısı özellikleri değerlendirildikten sonra, gelişmiş ısı performansı verimli gizli ısı depolama ile dengeleyen optimum kütle oranının %16-20 aralığında olduğu belirlendi.

Lv vd. (2016) çalışmalarında düşük yoğunluklu polietilenle (DYPE) güçlendirilmiş PA/GG/DYPE kompozit ısı yönetim sistemi önerdiler. Bu yapı PA/GG' den oluşan kompozit yapıya kıyasla parafin sızıntısını azaltmanın yanı sıra mekanik özelliklerde de iyileşme göstermiştir. PA/GG/DYPE'nin gizli ısı 87,4 J/g ve ısı iletkenliği 1,38 W/m·K'dir. Bu nedenle, PA/GG/DYPE kanatçık ilave edilerek, ısı dağılımı daha da iyileştirilmiştir. Öyle ki, 3,5 C' lik yüksek deşarj oranlarında bile batarya sıcaklıkları 50°C' den düşük ve sıcaklık farkları ise 5°C'nin altında tutmuştur.

Wu vd. (2016) iki dikdörtgen PA/GG yapı arasında bakır tel örgü gömerek BIYS' ın mekanik özellikleri iyileştiren, ısı iletkenliğini arttıran bunun yanı sıra zorlanmış hava akışı esnasında bakır tel örgünün yapı dışına sarkan kısmının akışı bozması sonucu ısı transferini güçlendiren bir KFDM geliştirdiler. Doğal taşınım koşullarında, bakır tel örgü ile güçlendirilmiş KFDM ile tel örgüsüz KFDM arasındaki fark daha da bariz olup, 5C deşarj oranı altında maksimum sıcaklıklar sırası ile 61,6 °C ve 65,5 °C olarak bulunmuştur.

Yan vd. (2016) 16 adet silindirik bataryadan oluşan LIB paketini etkili bir BIYS tasarımı yapabilmek amacıyla üç farklı FDM içeren PA/GG KFDM'ler oluşturup ayrı ayrı deneysel olarak dinamik şarj/deşarj döngüleri altında (1C şarj /1C deşarj ve 1C şarj /3C deşarj) test ettiler. Çalışmaları sonucunda KFDM BIYS sistemlerinin doğal taşınımına kıyasla

daha üstün performans sergilediklerini ayrıca etkili bir sıcaklık kontrolü için en ideal KFDM'nin erime noktası 45 °C olan PA içeren kompozit yapı olduğunu bildirdiler.

Wu vd. (2017a) FDM'nin ısı iletkenliğini arttırmak için GG ilavesi ve pasif ısı yönetim sisteminin genel performansını daha da arttırmak için bataryalar arasına grafit plakalar eklenmesi durumlarını ANSYS/Fluent kullanarak 5C deşarj oranında ve 1C şarj oranında toplamda 5 çevrim gerçekleştirecek şekilde dinamik yük altında çalıştılar. Çalışma parametresi olarak farklı GG yüzdeleri, çeşitli bataryalar arası mesafeler, farklı taşınım ısı transfer katsayıları ve grafit plakanın KFDM modüle eklenmesi gibi durumları seçtiler. Çalışma sonucunda, en ideal ısı performans için GG kütle oranı %15-20 arası olarak önerilmiş ve grafit plakanın eklenerek aynı şartlar için KFDM modülün ısı performansı arttırılmıştır.

Zhao vd. (2017) batarya hücresi gibi davranması amacıyla içeresinde ısıtıcı çubuklar bulunan 12 adet alüminyum silindiri GG/PA KFDM ve ısı borudan oluşturulan ısı yönetim sistemi içerisine yerleştirdi. Ayrıca, ısı yönetim performansını attırmak amacıyla ısı borunun batarya modülü dışında kalan kısımlarına dairesel kanatçıklar takıldı. Deneysel testler ile oluşturulan bu BIYS, hava soğutma ve sadece KFDM içeren durumla karşılaştırıldı. Sonuçlar, KFDM/ısı boru ısı yönetim sisteminin maksimum sıcaklığının 50 °C ulaşma süresinin, aynı koşullar altındaki hava soğutma ve KFDM tabanlı BIYS' lara kıyasla daha uzun sürdüğünü gösterdi. Bunun yanında, sadece KFDM kullanarak hava soğutmalı sisteme göre sıcaklık farkında %33,6 bir iyileşme sağlanmışken, KFDM'ye ilaveten ısı borunun kullanılmasıyla bu oran ek olarak %28,9 daha iyileştirilmiştir.

Ling vd. (2018) oluşturdukları %30 GG içeren KFDM yapı ile düşük ortam sıcaklıklarında (-5,10°C) FDM'siz duruma kıyasla maksimum sıcaklık artışında gözle görülür bir azalma elde ettiler. 0,5, 1, 1,5 ve 2C deşarj oranları altında gerçekleştirdikleri testlerde FDM'siz durumda batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık artışı 9,7 °C iken, KFDM ısı yönetim sistemi için bu değer bütün testler için 4 °C altında kalmıştır.

Lv vd. (2018) çalışmalarında batarya termal yönetimi için farklı oranlarda nanosilika (NS) içeren PA/GG/NS/DYPE kompozit matrisler geliştirdiler. Deneysel çalışmalarını simülasyonlar ile doğrulayarak, optimum bileşimin %5,5 ağırlıkça NS olduğunu, NS içermeyen KFDM'ye kıyasla çoklu şarj/deşarj döngüleri boyunca maksimum sıcaklıkların 1,6 °C ila 5,9 °C arasında önemli ölçüde azaldığını buldular. Ayrıca, ağırlıkça %5.5 NS içeren KFDM'nin en az parafin sızıntısı gösterdiğini, hacim değişikliklerini en aza

indirdiğini, soğutma verimliliğini arttırdığını ve matris yapısını daha dayanıklı hale getirdiğini tespit ettiler.

Zhang vd. (2018) PA/GG'ye ek olarak daha ucuz ve FDM emme/ tutma özelliğine sahip kaolin etkisi üzerinde çalıştılar. PA kütle yüzdesini %80'de sabit tutarak, ideal birleşimi saptamak üzere GG/Kaolin oranlarını (%0/20, %5/15, %8/12, 10/10 ve 12/8) araştırdılar. Yapılan testler esnasında herhangi sızıntı belirtisi göstermeyen ve ısı iletkenliği 6W/m.K'dan fazla olan %10/10 GG/Kaolin en uygun kompozit olarak seçildi ve 2C,3C,4C deşarj oranları altında 26-28 °C ortam sıcaklığı için test edilip, aynı şartlarda KFDM içermeyen durumlar ile karşılaştırıldı. Çalışma sonucunda, 4C deşarj oranı altında azami sıcaklık farkında %25,77'lik bir azalma sağlanırken, 2C ve 3C deşarj oranları için paket içerisindeki sıcaklık dağılımı tekdüzeliği, KFDM içerisinde bazı noktalarda FDM'in daha çok bulunmasından kaynaklı olarak azalmıştır. Buradan yola çıkarak, KFDM içerisindeki malzeme dozunun makul bir şekilde dağılmasının sağlanması gerektiği söylenebilir.

Wang vd. (2018) etkili bir termal performans için gerekli FDM kütlesini hesaplayarak kütsel olarak %5 GG, %95 PA içeren KFDM pasif ısı yönetim sistemi tasarladılar. 10S3P düzenlemeye sahip 18650 silindirik LIB'ler için bu ısı yönetim sistemini 0,10,20,30 ortam sıcaklıklarında 1C ve 2C deşarj oranları için test ettiler. Çalışma sonucunda, KFDM'nin ortalama sıcaklığı düşürmenin yanı sıra paket içerisindeki sıcaklık farkını da bir hayli azalttığını buldular. 2C deşarj oranı altında KFDM içermeyen paket için 30, 20, 10 ve 0°C ortam sıcaklıkları için sıcaklık farkları sırasıyla 14.6, 15.9, 16.2 ve 17.9°C iken KFDM'nin bataryaya uygulandığı durumda bu sıcaklık farkları sırasıyla 3.9, 4.7, 2.8 ve 3.9°C'dir.

Huang vd. (2019) li-ion batarya paketlerinde ısı yönetim sistemi geliştirmek amacıyla esnek kompozit matris yapılar FDM/GG/OBK(olefin blok kopolimer) kullandılar. Deneysel bulgulara göre, 10 C deşarj oranıyla esnek KFDM'ler batarya sıcaklığını 18 °C düşürdüğü görüldü. Esnek KFDM2'nin (faz değişimi 47,35 °C' de) yüksek güç ve aşırı sıcaklıklar için uygunken, esnek KFDM1'in (33,48 °C faz değişim sıcaklığı) düşük güç ve ortam sıcaklıkları için en uygun matrisler olduğu keşfedildi. Esnek KFDM'lerin (461 W/mm² K), geleneksel yapı destek malzemesi olarak YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen) kullanan KFDM3'ten (1818 W/ mm² K) çok daha düşük bir ısı temas direncine sahip olduğu saptandı. Esnek KFDM'lerin batarya ömrünü ve güvenliğini artırmadaki verimliliği, deneysel sonuçlarla mükemmel bir şekilde uyum gösteren sayısal simülasyonlarla doğrulandı.

Haung vd. (2020), tekli 18650 silindirik hücrenin iç dirençlerini deneysel yöntemle ölçerek geliştirdikleri batarya ısı üretim modeline dayanarak, 25 adet hücrenin paralel

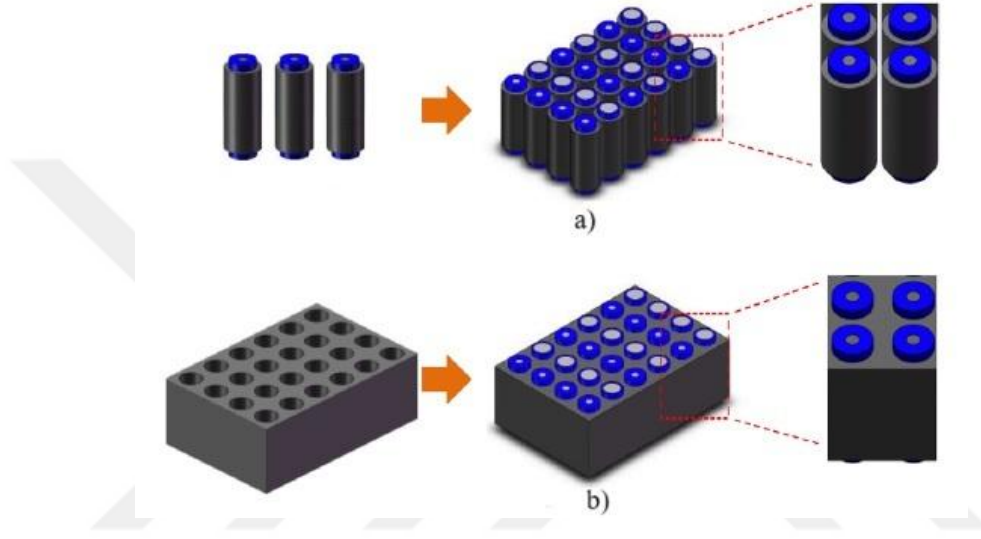
bağlanması ile oluşturdıkları batarya paketini ve KFDM ısı yönetim sistemini numerik olarak analiz ettiler. KFDM ısı iletim katsayısı, gizli ısı ve gözeneklilik oranı bu çalışmanın araştırma parametreleri idi. Çalışma sonucunda, Daha yüksek ısı iletkenlik ve gizli ısı maksimum sıcaklığı düşüşü ve sıcaklık tekdüzeliği açısından daha iyi bir performans sergilediği ve en ideal gözeneklilik oranının %94 olarak tespit edildiği belirtilmiştir.

Luo vd. (2020) epoksi reçinenin(ER) kompozit yapının mekanik özelliklerini, GG'nin ise ısı iletkenliği iyileştirmesi ve ikili erime sıcaklığına sahip PA'nın çift tampon etkisi yaparak sıcaklık artışını en aza indirmesi amacıyla kullanıldığı GG/ER/PA' dan oluşan KFDM ısı yönetim sistemini kütle oranı 2:3:5 olacak şekilde oluşturdular. 18650 silindirik LIB hücreleri kullanılarak oluşturdıkları 3S3P batarya paketini, çeşitli şarj ve deşarj döngüleri altında test ettiler. Bataryaların maksimum sıcaklığının 6 döngüden sonra bile 44,8 °C yani güvenlik eşiği olan 50 °C altında kaldığını tespit ettiler.

Zhang vd. (2020) batarya ısı yönetimi için AlN bazlı kompozit faz değıştiren malzemeleri incelediler. KFDM'ler, epoksi reçine (ER), genişletilmiş grafit (GG) ve parafin (PA) kullanılarak, %0 , %5 , %10, %15 , %20 ve %25 kütle oranlarında AlN eklenerek oluşturuldu. Çalışmada, batarya modülü, 18650 türünde otuz paralel LiFePO₄ hücresinden oluşmuştur. KFDM'lerle soğutulan modül, 1C, 2C ve 3C deşarj oranları için sırasıyla 48,32 °C, 48,84 °C ve 49,43 °C tepe sıcaklıkları gösterirken, hava soğutmalı modül için bu değerler sırasıyla 50,42 °C, 54,66 °C ve 59,03 °C'dir. KFDM'lerle soğutulan modülün tepe sıcaklıkları, çevrim testleri sırasında da daha düşük kalmıştır. Sonuç olarak, hava soğutmalı modülle karşılaştırıldığında, kütleli %20 oranında AlN ile geliştirilen KFDM soğutmalı modülün daha iyi sıcaklık kontrolü ve homojenlik sağladığı tespit edilmiştir.

Li vd. (2021) çalışmalarında farklı oranlarda GG içeren esnek KFDM'ler oluşturmak için oda sıcaklığında bir çözücü buharlaştırma işleminde etilen-vinil asetat (EVA) kullanıldılar. %5 GG ihtiva eden EVA-KFDM'nin ısı yönetim açısından LIB'ler için geleneksel sert KFDM'lerden daha iyi performans gösterdiğini buldular. Yüksek hızlı şarj-deşarj döngüleri altında EVA-KFDM için en yüksek sıcaklık 50,0°C ve sıcaklık farkı 3,7°C iken bu değerler geleneksel KFDM için sırasıyla 58,1°C ve 8,5°C'ydı. Ek olarak, EVA-KFDM'nin esnekliğinin termal temas direncini düşürerek soğutma performansını iyileştirdiği tespit edildi. Dahası bu yaklaşımın, KFDM hazırlığını kolaylaştırarak ve teknik uygulamaları teşvik ederek batarya sıcaklık kontrolü için ekonomik ve etkili bir alternatif sunduğu vurgulandı.

Wu vd. (2021) geleneksel büyük küboid modüller yerine boru şeklindeki faz değıştiren malzeme bileşenlerini kullanarak batarya ısı kontrolü için şekil 8’ de görülen yeni bir yaklaşım önerdiler. Yeni yaklaşımın daha yüksek bir enerji yoğunluğuna (75,5 ila 94,4 Wh/kg), düşük ağırlığa ve daha iyi sıcaklık dağılımına sahip olduğu belirlendi. Bu yöntemle, zorlu koşullar altında sıcaklıklar 47,2°C'nin altında ve sıcaklık farkları ise 1,0°C'nin altında tutuldu.



Şekil 8. İki farklı modül yaklaşımının şematik gösterimi a) Boru şeklinde-KFDM içeren modül b) Küboid KFDM içeren modül (Wu vd., 2021).

Chen vd. (2022) çalışmalarında farklı miktarlarda GG kütlesi ve sıvı soğutma ile kompozit faz değıştiren malzemeleri (KFDM) kullanan bir hibrit batarya ısı yönetim sistemi (BTMS) geliştirdiler. Sırasıyla saf FDM, KFDM3 ve KFDM6'ya sahip olan düzen III (parçalar c1, c2 ve c3), değerlendirilen beş düzen (I-V) içerisinde en iyi performansı göstermiştir. İdeal parça uzunlukları 110 mm, 120 mm ve 120 mm'dir. İdeal akışkan kanalı çapı (d) 5 mm iken, ideal hücreler arası mesafe (L) 24 mm olarak bulunmuştur. 4C deşarj oranında, bu düzen ile 319,8 K 'lık maksimum sıcaklık (Tmax) ve 2,2 K'lık sıcaklık farkı tespit edilmiştir. Ayrıca, gecikmeli soğutmanın performanstan ödün vermeden güç kullanımında %33,3'lük bir azalma sağladığı saptanmıştır.

Ma vd. (2022) çalışmalarında önerdikleri bakır nanopartikül (BN) ilaveli KFDM yapı için ideal PA:GG:BN = %83,3:%14,7:%2 birleşim oranları ile KFDM'nin ısı iletkenliğinde %67,8 oranında bir iyileşme sağladılar. İdeal üçlü birleşim oranı diğer oranlara kıyasla ısı

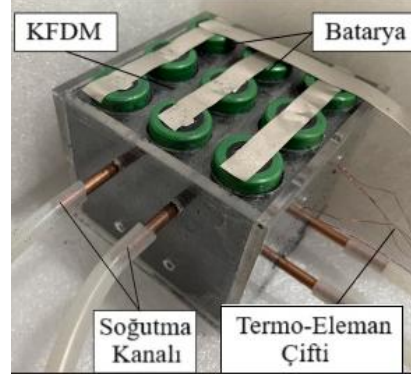
iletkenliği ve FDM sızıntısı dengesi açısından en iyi sonuç veren ağırlıkça %85:%15 PA/GG oranına %2,0 oranında bakır nanopartikül (BN) eklenerek elde edildi. Ayrıca, ağırlıkça %2,0 oranında BN eklenmesinin de, verimli ısı kontrolü ve az sızıntı ve sağladığı tespit edildi. Ek olarak, BN ilavesi ile faz geçiş entalpisinin de etkilenmediği görüldü. Doğal soğutmayla karşılaştırıldığında, KFDM batarya paketi sıcaklıklarını 1C'de 2,6°C ve 2C deşarj oranlarında 7,2°C düşürdüğü bulundu. Son olarak, gizli ısı geri kazanımı için şarj ve deşarj arasında 20 dakikalık bir bekleme süresinin ideal olduğu ve batarya paketinin sıcaklığını birkaç döngü boyunca güvenli bir aralıkta tuttuğu keşfedildi.

Mei vd. (2022) ilk olarak tekli bataryayı kanatçıksız ve kanatçıklı olarak, sonrasında batarya/PA birleşimini kanatçıksız ve kanatçıklı olarak son olarak ise batarya/PA/GG birleşimini kanatçıksız ve kanatçıklı olarak üç grup altında farklı ortam sıcaklıkları ve farklı deşarj oranları için incelediler. En iyi ısı yönetim performansını GG/PA/kanatçık birleşimi göstermesine rağmen daha yüksek ortam sıcaklıklarında PA/GG ısıl performansının da GG/PA/kanatçık ısıl performansına oldukça yaklaşmakta olduğu görüldü.

Xin vd. (2022) batarya ısıl yönetim sistemi tasarlamak amacıyla KFDM kalınlığı, GG kütle oranı, akışkan yönü, akışkan hızı ve akışkan giriş sıcaklıklarını çalışma parametresi olarak seçtikleri araştırmalarında %12'lik GG kütlelerinin ideal durum olduğunu buldular. İdeal durum için maksimum sıcaklık değeri 45,25 °C ve maksimum sıcaklık farkı değeri ise 3,49 °C olarak belirlediler. Bunun yanı sıra, ters akış yönlü akışın paralel akış yönüne kıyasla daha iyi bir soğutma sağladığını keşfettiler. Son olarak, soğutma hızının artırılmasının işe ısı yönetim açısından sürekli işe yaramayacağı belirli bir noktadan sonra sıcaklık düşümü üzerindeki etkisinin basınç düşümü ile dengeleneceğini belirttiler.

Zhu vd. (2022) GG'yi FDM'nin ısıl iletkenliğini arttırmak üzere, sıvı soğutmayı ise KFDM hazırlandığında saf FDM' de meydana gelen gizli ısı kaybını geri kazanmak üzere kullanan bir hibrit BIYS tasarımı yaptılar. Bu tasarım Şekil 9'da açıkça görülmektedir. Sundukları hibrit ısıl yönetim sistemi için ideal çözüme benzerliğe göre sıra tercihi ve analitik hiyerarşi süreci optimizasyon yöntemlerini birleştirerek daha iyi bir ısıl performans elde etmek amacıyla optimizasyon ve sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirdiler. Bu yöntemlerle, maksimum sıcaklığı ve sıcaklık farkını sırasıyla 51,17 °C 'den 44,36 °C ye ve 10,28 °C ' den 3,45 °C 'ye düşürmeyi başardılar. Ayrıca, sadece KFDM ısıl yönetim sistemi barındıran durumla kıyaslandığında KFDM+ters akışlı çapraz kanal düzenlemeli hibrit BIYS'ın diğerlerinden daha iyi performans sergilediğini gösterdiler. Bu hibrit sistemde maksimum sıcaklık farkı KFDM'ye kıyasla 4,19 °C ve 2,5 °C düşürülmüştür. Ek olarak,

katılaşma oranı da, %60,8 oranında iyileştirilmiştir. Dahası, katılaşma oranı ve maksimum sıcaklığın artan GG kütlesi ile arttığını tespit ettiler.



Şekil 9. GG/FDM/sıvı soğutma hibrit ısıl yönetim sistemi (Zhu vd., 2022)

Zhang vd. (2023) çalışmalarında %15 GG Kütlesel oranında GG içeren ve 1:1 oranında PA ve Laurik asit içeren KFDMD'nin en iyi soğutma performansını sergilediğini tespit ettiler. KFDMD kullanımının 0,5-1-1,5 C deşarj oranları ve 20, 25, 30 ve 35 °C ortam sıcaklıklarında KFDMD olmayan doğal soğumaya kıyasla daha düşük batarya sıcaklıklarını sağlayabildiğini buldular. KFDMD kullanılarak batarya maksimum sıcaklığı güvenli sıcaklık aralığı olan 50 °C altında 42,39 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, maksimum batarya sıcaklık farkı 1,96 °C ile KFDMD kullanımı oldukça tek düze bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır.

Wang vd. (2023) deneysel olarak, %1 GG kütsel oranı ve 48°C geçiş sıcaklığına sahip FDM birleşimi ile oluşturulan KFDMD'nin, 16P bağlantılı batarya paketi ısı kontrolü açısından ideal durum olduğunu buldular. Nümerik kısımda ise, çok parametrelili bir elektrokimyasal-termal birleşik modeli geliştirdiler ve COMSOL yazılımı kullanılarak doğrulama gerçekleştirdiler. Ek olarak, optimizasyon için COBYLA algoritmasını kullanarak ısı açıdan güvenli şekilde çalışabilmek adına bataryalar arası mesafenin 4mm, taşınım ısı transfer katsayısının 0,8 W/m²K ve GG kütsel oranının %10,9 olduğu durumun yeterli olduğunu saptadılar. Bu optimizasyon, 3C deşarj süreci için FDM hacim oranını %18,4 oranında azaltırken, maksimum batarya sıcaklığının 50°C'nin altında ve sıcaklık farkının ise 5°C'nin altında güvenli çalışma aralığında kalmasını sağladı.

Li vd. (2024a) çeşitli sıkıştırılmış GG yoğunlukları, çeşitli ortam sıcaklıkları, farklı deşarj oranları ve paket için farklı sayıda KFDMD katmanlarını kapsayan araştırmalarını 37S1P batarya paketi için gerçekleştirdiler. Sonuçlar, yoğunluğu 0,3 g/cm³ olan KFDMD'nin saf FDM'ye göre ısı iletkenliğinin sıkıştırma sırasıyla yönüne dik ve paralel olarak 118,7 ve

31 kat daha fazla yükseldiğini göstermektedir. Buna ek olarak, 2C deşarj oranı altında KFDM'siz batarya paketine kıyasla batarya paketinin maksimum sıcaklığı %29,9, batarya paketindeki maksimum sıcaklık fark ise %55,3 oranında azalmıştır. Dahası, ideal KFDM katman sayısı 3 olarak belirlenmiş olup, 30 mm toplam kalınlığa sahiptir. İdeal durumda, batarya paketi kütesinin %16,84 arttırılması ile mevcut kütle enerji yoğunluğunun 63,55 oranında arttığı saptanmıştır.

Zhi vd. (2024) GG'yi ısı iletkenlik arttırıcı poliüretan köpüğü ise yapı destek malzemesi olarak kullanarak tuz hidrat FDM karışımının batarya ısı iletim sistemleri için uygulanabilirliğini araştırdılar. 4 g GG içeren KFDM'nin faz değişim aralığının 30,8 °C ile 69,8 °C aralığında olduğu ve LIB'lerin ısı yönetimi için tatmin edici olduğu tespit edildi. Ayrıca KFDM'nin 226,9 J/g ile yüksek gizli ısı değerine ve 1,39 W/m·K ile de iyi bir ısı iletkenlik değerine sahip olduğu bulundu. Ayrıca sızıntı direncinin ve alev geciktirme özelliğinin de LIB'ler için yeterli olduğu görüldü. Son olarak, çalışmalarında KFDM ısı iletim sistemi altında, 0,5 C şarj oranı ve 1,5 C deşarj oranı döngüsü için, batarya maksimum sıcaklığında ve batarya maksimum sıcaklık farkında doğal hava soğutmaya kıyasla sırasıyla %20,4 ve %59,7 iyileşme kaydedildi.

Literatür araştırmalarına dayanarak, KFDM'lerin, bataryaları yüksek sıcaklıklara ulaşmaktan alıkoymanın yanı sıra düşük sıcaklıklarda FDM içermeyen batarya paketleriyle karşılaştırıldığında bataryaların çok hızlı soğumasını da önlemeye yardımcı oldukları belirlenmiştir (Ling ve diğerleri, 2018). Ayrıca, Jiang vd. (2016), KFDM matris yapısındaki GG miktarının, FDM'nin erime ve katılaşması sırasında FDM sızıntısını etkilediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında GG kütle oranının artmasının FDM sızıntısını kademeli olarak azalttığını bulmuşlardır. Buna rağmen, kompozit faz değiştiren malzeme (KFDM) ısı iletim sistemlerinde, faz değiştiren malzemeye (FDM) genişletilmiş grafit (GG) ekleyerek ısı iletkenliğini artırmanın her zaman istenen sonuçları vermediği ve hatta belirli bir noktadan sonra GG miktarının artmasının, KFDM'nin gizli ısısında azalmaya neden olarak termal yönetim sistemini olumsuz etkileyebileceği söylenebilir. Dolayısıyla, KFDM için ideal birleşim oranlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Jiang vd., 2016).

Tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde, batarya ısı iletim sistemlerinde (BIYS) faz değiştiren malzemelerin (FDM'ler) ısı iletkenliğini iyileştirmeye yönelik, genişletilmiş grafitin (GG) genellikle diğer yapı malzemelerinden ve katkı maddelerinden daha üstün olduğu belirtilmektedir. GG'nin gelişmiş termal iletkenliği FDM'nin ısı iletimini ve ısı transfer oranlarını büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle, FDM'nin ısı iletim

performansını artırmak amacıyla GG'nin yapı malzemesi olarak kullanılması çok daha revaçta olan ve üzerinde daha çok araştırma yürütülen bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır (Dolla & Fetene, 2024). Bu duruma diğer bir örnek ise, Zhao (2020) tarafından yapılan çalışma sonucunda EG/parafin kompozitin batarya yüzey sıcaklıklarını azaltma da ve bataryalar arası daha tek düze bir sıcaklık dağılımı sağlamak açısından bakır köpük/parafin kompozitinden daha iyi bir seçenek olduğunun ortaya çıkarılmasıdır. Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada da faz değiştiren malzeme içeren batarya ısıl yönetim sistemleri tasarlanırken ve oluşturulurken ısıl iletkenliği ve ısı transfer oranlarını arttırmak ve oluşturulan batarya modülünü/paketini arzu edilen sıcaklık aralığında tutabilmek ve FDM'nin ısıl iletkenlik arttırmak amacıyla yapı destek malzemesi olarak GG seçilmiştir.

1.10.6. Üretim Yöntemine Göre Genişletilmiş Grafit/FDM Kompozit Yapıların İncelendiği Örnek Çalışmalar

Li vd. (2024a) ön şekillendirme ile oluşturulan grafit yapıları FDM emdirilmesi ile elde edilen KFDM'lerin bulamaç bazlı KFDM'lere göre daha gelişmiş termal iletkenlik, sağlam yapısal bütünlük ve etkili FDM sızıntısı azaltma gibi üstünlüklerinin bulunduğunu belirtmişlerdir. Tablo 12'nin kapsamlı bir incelemesi bu olguyu daha büyük bir açıklığa kavuşturur. Li vd. (2024a) çalışmalarında, genişletilmiş grafitin başlangıçta sıkıştırıldığı ve ardından FDM ile emdirildiği bir yöntem kullandılar. Bu yaklaşım, termal iletkenlikte dikkate değer bir artışla sonuçlandı ve sıkıştırmaya dik yönde 118,7 kat ve paralel yönde 31 kat iyileştirme faktörü elde edildi. Aynı tablodan, Mallow vd. (2016) ile Zhong vd. (2010)'un çalışmalarında FDM emdirmeden önce genişletilmiş grafitte başlangıçta ön şekil verdiler. Buna karşılık, Li vd. (2019b) bulamaç tipi kompozit faz değiştiren malzeme hazırlama yöntemini tercih ettiler. Sonuç olarak, Mallow vd. (2016) ve Zhong vd. (2010) tarafından bildirilen ısı iletkenlik katsayılarının, Li vd. (2019b) tarafından elde edilen katsayılara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bir başka çalışmada Chakraborty vd. (2022), kompozit faz değiştiren malzemeleri hazırlamak için hem ön şekillendirme hem de bulamaç yöntemlerini kullandılar ve daha sonra bu iki yaklaşımın etkinliğini karşılaştırdılar. Bulgular, ön şekillendirme yöntemiyle üretilen kompozitin, bulamaç yöntemiyle elde edilen kompozite kıyasla ısıl iletkenlikte 2,45 kat daha fazla bir artış sağladığını ortaya koydu.

Tablo 12. Üretim yöntemine göre ısı iletim katsayısının incelendiği çalışmalar

Yazar	Kapsam	FDM ve Erime Sıcaklığı	FDM'nin Isı İletim Katsayısı	Genişletilebilir Grafit Yüzdesi ve Yoğunluğu		Grafit/FDM Kompozit 'in Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m. K)	
Li vd. (2024a)	Deneysel (GG'ye ön şekil verme sonrasında FDM emrime)	Parafin 40(±2) °C	0,3W/m.K	Hacimsel veya kütleli yüzde	ρ (g/L)	Paralel	Dikey
				---	100	4,63	7,25
				---	150	6,54	16,66
				---	200	7,94	23,01
				---	250	8,21	28,59
				---	300	9,32	35,61
Mallow vd. (2016)	Deneysel (GG'ye ön şekil verme sonrasında FDM emrime)	Parafin 55.2 °C	0,3W/m.K	Hacimsel Yüzde (%)	ρ (g/L)	Paralel	Dikey
				1	23	2,3	2,3
				2,2	50	4,7	4,7
				4,4	100	9,6	9,6
				6,3	143	10,1	20,2
Zhong vd. (2010)	Deneysel (GG'ye ön şekil verme sonrasında FDM emrime)	Parafin 50 °C	0,35W/m.K	Kütleli Yüzde (%)	ρ (g/L)		
				26	260	66 ±3	
				19	180	46 ±3	
				17	150	35 ±2	
				13	130	21 ±2	
				8	70	10 ±2	
Li vd. (2019b)	Deneysel (GG ve FDM ile bulamaç oluşturma sonrasında şekil verme)	Parafin 52 °C	0,201W/mK	Kütleli Yüzde (%)	----		
				0,5	---	0,224	
				1	---	0,239	
				1,5	---	0,252	
				2	---	0,272	

Tablo 12'nin devamı

Yazar	Kapsam	FDM ve Erime Sıcaklığı	FDM'nin Isı İletim Katsayısı	Genişletilebilir Grafit Yüzdesi ve Yoğunluğu		Grafit/FDM Kompozit 'in Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m. K)
Chakraborty vd. (2022)	Deneysel (GG'ye ön şekil verme sonrasında FDM emrime)	Parafin 55 °C	0,3W/m.K	Hacimsel Yüzde (%)	ρ (g/L)	2,7
				17	---	
	Deneysel (GG ve FDM ile bulamaç oluşturma sonrasında şekil verme)	Parafin 55 °C	0,3W/m.K	Hacimsel Yüzde (%)	ρ (g/L)	1,1
				17	---	

Mallow vd. (2016) ısıtıcılar kullanarak ve sabit ısı akıları uygulayarak gerçekleştirdiği çalışmalarında kompozit faz değiştiren matrislerde 100 g/L'nin üzerindeki genişletilmiş grafit yığın yoğunluklarının etkisinin enerji depolama performansını iyileştirmek için oldukça kısıtlı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, gizli ısıdaki azalmaya bağlı olarak sıkıştırma yönüne paralel ölçümlerde enerji depolama performansında azalmalar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Fakat bu çalışma, bataryalar üzerinde gerçekleştirmemişlerdir. Bu senaryoyu destekleyen ve bataryalar üzerinde gerçekleştirilbir diğer çalışmada, Li vd. (2024a) 37S1P LIB modülü için 0,1 g/cm³, 0,15 g/cm³, 0,20 g/cm³, 0,25 g/cm³ ve maksimum 0,3 g/cm³'lük sıkıştırılmış GG yığın yoğunluklarına sahip GG/FDM kompozitlerin modül içindeki maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı üzerindeki etkisini incelediler. Sıkıştırılmış kompozit malzemeler için 0,1 g/cm³'lük minimum yığın yoğunluğu ile 0,3 g/cm³'lük maksimum yığın yoğunluğu karşılaştırıldığında, her iki yoğunluğun da yaklaşık 39°C'lik karşılaştırılabilir bir maksimum sıcaklıkta doruğa ulaştığı tespit edilmiştir. Modül içindeki sıcaklık dağılımları incelendiğinde ise, 0,3 g/cm³ ve 0,1 g/cm³ yığın yoğunlukları için sıcaklık farklarının sırasıyla 1,9°C ve 1,2°C olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, en yüksek yığın yoğunluğu

maksimum sıcaklığı düşürmede önemli bir avantaj sağlamazken, sıcaklık düzgünlüğü açısından yalnızca 0,7°C'lik oldukça düşük bir iyileştirme sağlamıştır. Sonuç olarak, bu deneysel çalışma bağlamında da, 100 g/L'yi aşan yığın yoğunluğunun termal enerji depolama performansı üzerindeki etkisinin önemli ölçüde kısıtlandığı söylenebilir. Bu bulgular, Mallow vd (2016) tarafından yürütülen araştırmayı doğrulamaktadır.

Bu kısımda, ön şekillendirme (sıkıştırma) yoluyla üretilen GG/FDM kompozitinin ısı kontrolü açısından oldukça ayrıcalıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yığın yoğunlukları göz önünde bulundurulduğunda ise, yığın yoğunluğu 100 g/L'yi aşan kompozit yapıların, batarya ısıl yönetiminde yalnızca kısıtlı bir iyileşme sergilediği ortaya koyulmuştur. Literatürün kapsamlı değerlendirmesi, gözenekli bir yapı olarak grafit matrisi kullanan ve batarya ısıl yönetim sistemlerinde ön şekillendirme yoluyla oluşturulan grafit/FDM kompozit yapıların performansı üzerinde yığın yoğunluğunun etkisinin anlaşılmasında önemli bir boşluk olduğunu ortaya koymaktadır.

1.11. Tezin Konusu Gerekçesi ve Amacı

Gelişen batarya teknolojileri elektrikli taşıtlarda ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri gibi yüksek talepli sektörlerde uygulama alanı bulmakta ve buna paralel olarak da verimli ısıl yönetim sistemlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Bataryaların etkili ısıl yönetimi optimum performans, güvenlik ve uzun çalışma ömrü bakımından önemlidir. PIYS kategorisi kapsamında yer alan GG/FDM kompozisyonu ısı kontrol açısından önemli üstünlükler sunar. Bu kompozitler termal iletkenliği artırır, maksimum sıcaklıkları düşürür, ısı transferini iyileştirir ve batarya paketlerinde daha iyi düzgün sıcaklık dağılımı sağlar. Ayrıca, bu sistemler pasif ısıl yönetim sistemleri olduğundan enerji tüketmezler ve bu üstünlükleri nedeniyle tercih edilirler.

Isıl yönetim sistemleri alanında yapılan kapsamlı araştırmalar, GG'nin FDM'ler ilave edilmesinin, özellikle batarya ısıl yönetimi uygulamalarında, alternatif yapısal malzemeler veya katkı maddelerine kıyasla daha iyi performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, GG'ye ön şekillendirme tekniği uygulanarak köpük yapısı oluşturulmuş ve ardından FDM emdirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin seçimi, literatürde ön şekillendirmenin sahip olduğu kanıtlanmış üstünlüklere dayandırılmıştır. Literatürdeki bulgular, ön şekillendirilmiş grafit/FDM kompozitlerinin, bulamaç bazlı yöntemlerle üretilen kompozitlere kıyasla termal iletkenlik açısından belirgin bir iyileşme gösterdiğini

ve daha homojen bir ısı dağılımı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu kompozitler, uzun vadeli kullanım için kritik öneme sahip olan yapısal bütünlüğü korumakta ve bulamaç bazlı FDM kompozitlerinde sıklıkla karşılaşılan sızıntı sorununu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sonuçlar, ön şekillendirilmiş GG takviyeli FDM kompozitlerinin, ısıl yönetim sistemlerinde özellikle yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tezin konusu, GG/FDM kompozit faz değişim ısıl yönetim sistemlerinin performansını araştırmaktır. Bu araştırmanın gerekçesi, bu kompozitler üzerinde yığın yoğunluğunun ve hazırlama yöntemlerinin etkisine ilişkin mevcut çalışmalarda önemli boşlukları ele almaktır. Önceki araştırmalar, 100 g/L'yi aşan yığın yoğunluklarının termal enerji depolama performansında oldukça kısıtlı düzeyde iyileştirme sağladığını göstermiştir. Ancak, 100 g/L'nin altındaki yığın yoğunluklarını doğrudan batarya paketlerine uygulayan ve batarya performansı üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmaların önemli ölçüde eksik olduğu görülmektedir. 100 g/L'nin üzerindeki yığın yoğunluklarının sınırlı etkinliğini destekleyen başka bir çalışma, 100 g/L ve 300 g/L'lik yığın yoğunluklarının karşılaştırılabilir maksimum sıcaklık zirvelerine ulaştığını, daha yüksek yığın yoğunluklarında sıcaklık düzgünlüğünde çok az bir iyileştirme olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla, bu araştırma, termal yönetim uygulamalarında 100 g/L'nin altındaki yığın yoğunluklarının (özellikle 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L) etkinliğini değerlendirmesine odaklanılmıştır.

Bu tezin amacı, farklı ortam sıcaklıkları, GG matrisi yığın yoğunlukları, deşarj akımları ve kullanılan FDM çeşitleri gibi tasarım parametreleri aracılığıyla elde edilebilen termal davranış ve performans iyileştirmelerini anlamaya odaklanarak, batarya ısıl yönetimi için GG/FDM kompozit yapılarının kapsamlı bir analizini sağlamaktır. Tezde, bu kompozitlerin LIB paketlerinin termal performansını artırmadaki etkinliği araştırılmaktadır. Çalışma özellikle GG/FDM kompozitlerinin farklı ortam sıcaklıkları, GG matris yığın yoğunlukları (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L), FDM tipleri (RT-35 ve RT-42) ve deşarj akımları (13,4 A ve 30 A) altındaki performansı değerlendirilmektedir. Deneyler, dokuz GG/FDM kompozit matrisi içeren 18650 silindirik LIB hücreli bir 6S4P batarya paketi yapılandırması kullanılarak yürütülmüştür.

Sonuç olarak, tezde, literatürde yer almayan ancak yığın yoğunluğunun GG/FDM kompozit yapıların performansı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu kapsamda, 100 g/L'nin altındaki yığın yoğunluklarına odaklanılmış ve ön sıkıştırma yöntemini kullanılarak, tasarım parametrelerinin batarya ısıl yönetimini geliştirmedeki etkinliğine ilişkin somut bulgular

elde edilmesi amaçlanmıştır. Bulguların, batarya ısıl yönetim sistemlerinin optimizasyonuna katkı sağlayacağı ve böylece LIB tasarımcılarına tasarlayacakları ürünle ilgili verimlilik ve güvenirlilik alanlarında katkı sağlayacağı beklenmektedir.



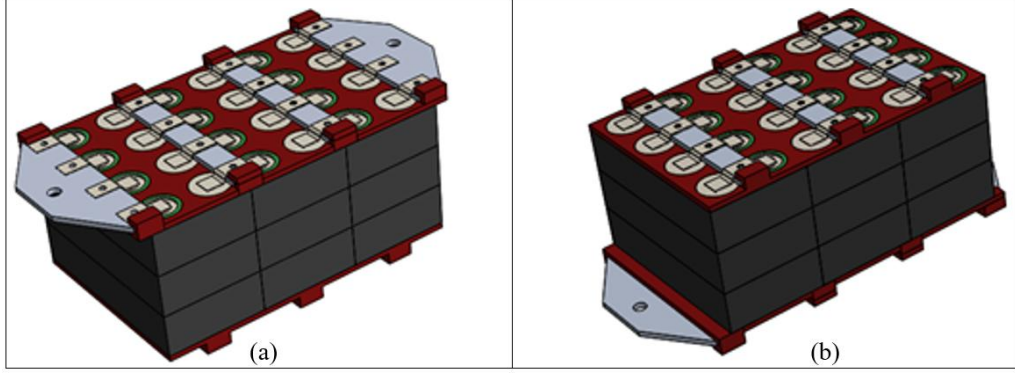
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, kompozit GG/FDM batarya ısıl yönetim sisteminin performansı ortam sıcaklığı, genişletilmiş grafit köpük (GG) matris yığın yoğunluğu, GG/FDM kompozit matris oluşturmak amacıyla kullanılan FDM çeşidi ve deşarj akımı olmak üzere dört farklı tasarım parametresi için deneysel olarak incelenmiştir. İncelemede, üç farklı ortam sıcaklığı (-15 °C, 25 °C ve 35 °C), üç farklı GG matris yığın yoğunluğu (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L), iki farklı FDM türü (RT-35 ve RT-42) ve iki farklı deşarj akımı (13.4 A ve 30 A) ele alınmıştır. Deneyler 6S4P yapılandırmasına sahip 18650 silindirik LIB hücrelerinden oluşan ve içerisine 9 adet GG/FDM kompozit matris yerleştirilen batarya paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl yönetim sistemi performansı, bataryaların yüzey sıcaklıkları, bataryalar arası sıcaklık dağılımı ve batarya paketinin güvenilir çalışma süresi voltaj-zaman, voltaj-kapasite, voltaj-enerji kapasitesi ve bataryaların sıcaklık-zaman eğrileri üzerinden tartışılmıştır. Ayrıca, incelenen GG/FDM kompozit matris batarya ısıl yönetim sistemleri FDM ve GG ilavesiz yalın batarya paketi durumu ile karşılaştırılmış ve kompozit matrislerin ısıl performans üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

2.1. Genişletilmiş Grafit Köpük/FDM Matris Kompozit Batarya Termal Yönetim Sistemi Modelleme

FDM/Grafit matris batarya paketi 3 boyutlu modeli Şekil 10'da görülmektedir. Üç boyutlu paket modelinde kullanılan grafit matris parçalı üretime dayalı olup, 102x48x20 mm boyutlara sahip 9 adet grafit matristen oluşmaktadır. Parçalı üretimin amacı, paket içerisindeki sıcaklığın düzgün dağılımlı olmasının sağlanmasının yanı sıra pratik ve kolay değiştirilebilir bir ısıl yönetim sistemi sunmaktır. Böylelikle istenildiğinde parçalı üretim sayesinde batarya paketinin farklı kısımlarında değişik özelliklere sahip kompozit yapılar kolaylıkla uygulanabilir ve bataryalar arası yüzey sıcaklık farklarının düşürülmesi sağlanabilir.

Şekil 10'da görülen grafit köpük matrisin her biri 20 mm kalınlıkta olup sekiz adet silindirik batarya yuvasına sahiptir. Kompozit ısıl yönetim sistem tasarımı, yüksekliği 65 mm olan 18650 LIB'in alt ve üst kısımlarından 2,5 mm mesafe kalacak şekilde sekiz adet batarya için üç adet ve 24 adet batarya için toplam dokuz adet grafit köpük matris kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Kompozit ısı yönetim sistemi ve batarya paketi üç boyutlu modelinin (a) üst ve (b) alt görünüşleri

2.2. Grafit Matris Köpük Üretim Süreci

GG/FDM kompozit matris üretim aşamaları Şekil 11’de görüldüğü gibi grafitin ısı işlem sonucu genişletilmiş grafitte dönüştürülmesi ile başlamaktadır. Devamında, genişletilmiş grafit elde edilecek matris şekline göre uygun bir kalıba istenilen grafit matris yığın yoğunluğu değeri göz önünde bulunarak olabildiğince homojen bir şekilde doldurulmaktadır. Daha sonra basınç altında şekil verme işlemi ile genişletilmiş grafit istenilen forma dönüştürülmekte ve oluşturulan matris kalıptan çıkarılmaktadır. Son olarak, genişletilmiş grafit köpüğe FDM emdirilmesi işleminin ardından kompozit GG/FDM kompozit matris yapı elde edilmektedir.



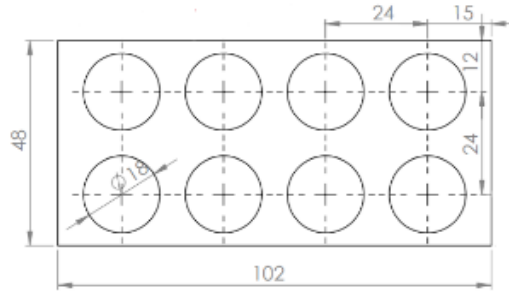
Şekil 11. Genişletilebilir grafitten GG/FDM kompozit matris üretim süreci

2.2.1. Genişletilmiş Grafite Köpük Matris Presleme işlemi için Kalıp Tasarımı ve retimi

Grafit köpük matris oluşturmak amacıyla üretilen kalıp şekil 12 ‘de gösterilmektedir. Kalıplar, şekil 13 ‘te st görünüşü verilen genişletilmiş grafit köpük matrisi istenilen boyutlarda üretecek şekilde tasarlanmıştır. Kalıp içerisinde yer alan sekiz adet mil, sekiz adet 18 mm çapında silindirik LIB yuvasını açma görevi görmektedir. Bu kalıpta 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yıgın yoğunluklarına sahip grafit köpük matrislerin üretilmesi planlandığından genişletilmiş grafitin presleme öncesi kalıba doldurulması esnasında yeteri kadar genişletilmiş grafit alabilmesi açısından kalıp derinliği 250 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca kalıp tabanında, üretilecek grafit matris köpüğün üzerinde son şeklini aldığı 10 mm et kalınlığına sahip bir plaka bulunmaktadır. Presleme işlemi sonucunda itici zımba ile bu plakanın kalıp ağzına doğru itilmesi ile üretilen grafit köpük matrisin kalıp dışına alınması sağlanmaktadır.



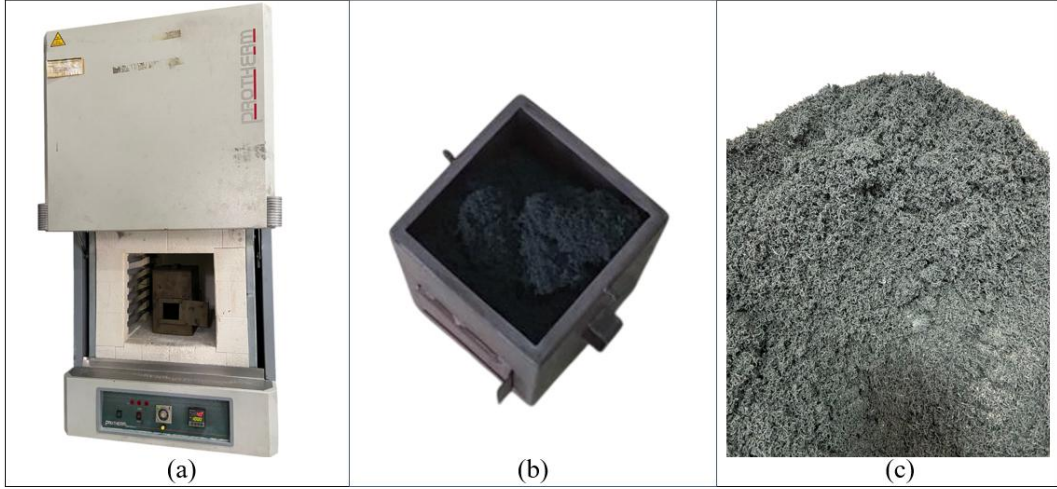
şekil 12. Presleme ile grafit köpük matris oluşturmak için üretilen kalıp



şekil 13. Grafit köpük matris st görünüşü

2.2.2. Genişletilebilir Grafitin Isıl İşlem ile Genişletilmiş Grafit Dönüştürölmesi

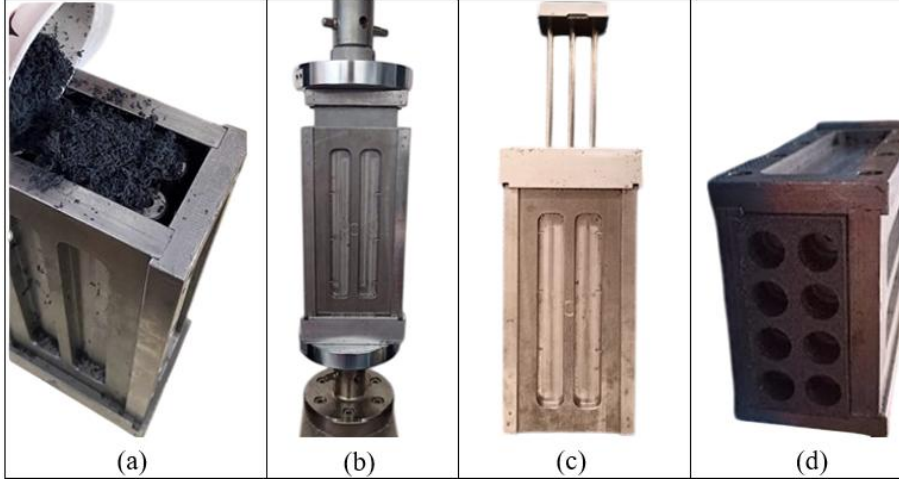
şekil 14' teki laboratuvar ölçekli fırın içerisine tasarımı yapılan ve ürettirilen grafit genişletme kabı ön penceresi açık şekilde yerleştirilmiş ve fırın 1000 °C'ye ulaşması için ęalıřtırılmıştır (Yazici, 2022). Fırın 1000 °C'e ulaştıktan sonra açık olan pencereden 60 cm sap uzunluğuna sahip kaşık yardımı ile genişletilebilir grafit kap içerisine dökülmüş ve ilk olarak kap ön penceresi daha sonra da fırın kapağı kapatılmıştır. 50mesh/300µ boyutlara sahip ve genleşme oranı 700:1 olan genişletilebilir grafit (PTC chemicals firmasından) iç sıcaklığı 900-1000 °C olan laboratuvar ölçekli fırın içerisinde 60 s boyunca tutularak kompozit yapının ana matrisini oluşturacak olan grafit genişletilmiştir (Yazici, 2022). 1 dakika sonunda fırın ağılarak genişletme kabı fırından alınmış ve soğuması beklenmiştir. Son olarak, soğuyan kap içerisinden alınan genişletilmiş grafit sonraki aşamalarda kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.



şekil 14. Grafit genişletme süreci (a) Fırına ön penceresi açık şekilde yerleştirilmiş genişletme kabı (b) Fırından alınan ve soğutulan genişletme kabı içerisindeki genişletilmiş grafit (c) Genişletilmiş grafit

2.2.3. Basınę Altında şekil Verme İşlemi ile Genişletilmiş Grafitin Grafit Köpük Matris şeklini Alması

Bu kısımda, ana tasarım parametresi grafit matris yığm yoğunluğudur. 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığm yoğunluğuna sahip grafit köpük matrisler için sırasıyla yaklaşık olarak 2.8 g, 4.2 g ve 5.6 g genişletilmiş grafit kullanılmıştır.



Şekil 15. Genişletilmiş grafitin sıkıştırılması süreci (a) Kalıba genişletilmiş grafit doldurulması (b) Genişletilmiş grafitin preslenmesi (c) İtici zımba yardımı ile preslenen genişletilmiş grafitin kalıptan çıkarılması (d) Kalıp ağzındaki preslenmiş ürün

Şekil 15(a)'da kalıba doldurulan genişletilmiş grafit kütlesi hassas terazi yardımı ile her defasında terazinin darası alınarak hazırlanmış ve kalıba dökülen grafitin metal şerit yardımı ile kalıp içerisine olabildiğince homojen dağıtılması sağlanmıştır. Yine Şekil 15(b)'de görüldüğü gibi şekil verme amacıyla kalıp içerisindeki genişletilmiş grafitte çekme-basma test cihazı yardımı ile kuvvet uygulanarak grafit köpük matrisler oluşturulması gösterilmektedir. Şekil 15(c) ise şekil verme sonucu üzerinde grafit köpük matrisin olduğu metal plakanın itici zımba ile kalıp ağzına doğru itilmesi sürecini ifade etmektedir. Son olarak, Şekil 15(d)'de kalıp ağzında bulunan ve kalıptan çıkarılmadan hemen önce grafit köpük matrisi görülmektedir.

Oluşturulan grafit köpük matrisler 18,75-19,25 mm arası kalınlıklarda üretilmiştir. Bunun nedeni matris esnasındaki FDM'nin sıvı fazdayken veya sıvı faza geçişi esnasında grafit köpüğün genişlererek modelde tasarlanan 20 mm kalınlığa ulaşmasıdır. Genişletilmiş grafitin belirlenen kalınlıklarda basılması sonucunda test cihazı ekranından okunan kuvvet değerleri 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip çeşitli numuneler için sırasıyla 270-310 N, 420-460 N ve 540-640 N arasında değişiklik göstermiştir.

2.2.4. Üretilen Grafit Köpük Matrise FDM Emdirilerek Nihai GG/FDM Kompozit Matris Yapının Elde Edilmesi

Enerji depolama malzemesi olarak Rubitherm'den tedarik edilen RT-35 ve RT-42 parafinler kullanılmıştır (Tablo 13 ve Tablo 14). Parafin, yüksek gizli ısı depolama

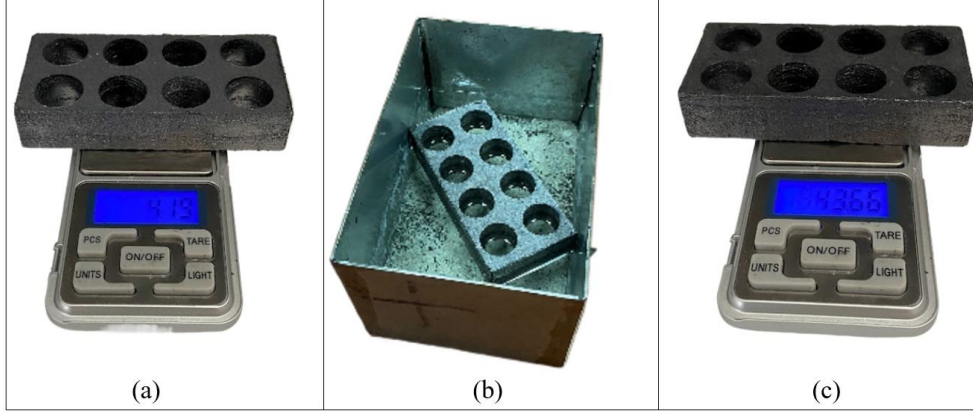
kabiliyeti, fiziksel/kimyasal/ısısal olarak kararlılık, faz ayrışımının olmaması, diğer malzemeler ile uyum, reaktif olmaması ve güvenilir olma gibi özellikleri ile önemli bir potansiyele sahiptir.

Tablo 13. RT 35'e ait termofiziksel özellikler (Rubitherm, 2024)

RT-35	Tipik Değerler	Birim
Erime Aralığı	32-38 Ana Zirve: 35	[°C]
Donma Aralığı	38-32 Ana Zirve: 35	[°C]
Isı Depolama Kapasitesi $\pm$ %7,5 (26°C ila 41°C sıcaklık aralığında gizli ve duyulur ısının birleşimi)	160	[kJ/kg]
	45	[Wh/kg]
Özgül Isı	2	[kJ/kg.K]
15 °C'de Katı Yoğunluğu	0,86	[kg/L]
45 °C'de Sıvı Yoğunluğu	0,77	[kg/L]
Isı İletkenliği (her iki fazda)	0,2	[W/m.K]
Hacimsel Genişleme	12,5	[%]
Alev Alma Noktası	165	[°C]
En Yüksek Çalışma Sıcaklığı	65	[°C]

Tablo 14. RT 42'ye ait termofiziksel özellikler (Rubitherm, 2020)

RT-42	Tipik Değerler	Birim
Erime Aralığı	38-43 Ana Zirve: 41	[°C]
Donma Aralığı	43-37 Ana Zirve: 42	[°C]
Isı Depolama Kapasitesi $\pm$ %7,5 (35°C ila 50°C sıcaklık aralığında gizli ve duyulur ısının birleşimi)	165	[kJ/kg]
	48	[Wh/kg]
Özgül Isı	2	[kJ/kg.K]
15 °C'de Katı Yoğunluğu	0,88	[kg/L]
80 °C'de Sıvı Yoğunluğu	0,76	[kg/L]
Isı İletkenliği (her iki fazda)	0,2	[W/m.K]
Hacimsel Genişleme	12,5	[%]
Alev Alma Noktası	186	[°C]
En Yüksek Çalışma Sıcaklığı	72	[°C]



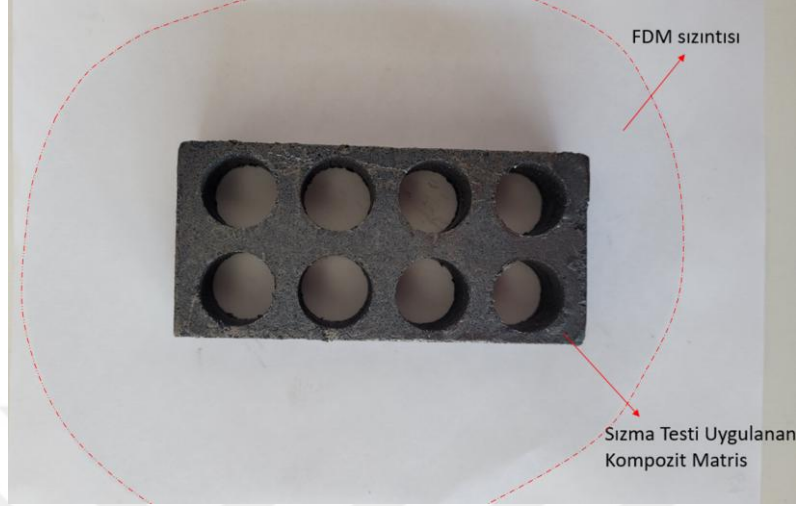
Şekil 16. Genişletilmiş grafitte FDM emdirme süreci (a) Presleme sonucu oluşan Grafit Matris (b) Grafit Matrise FDM Emdirilmesi (c) Grafit/FDM Kompozit Matris

Şekil 16’da grafit matrise FDM emdirilme aşamaları görsel olarak verilmiştir. İlk olarak, içerisinde katı FDM bulunan emdirme kapları 70 - 75 °C sıcaklığa ayarlanan inkübatör içerisine bırakılarak FDM’lerin erimeleri sağlanmış ve grafit matris eriyik FDM içerisine bırakılmıştır. FDM emdirilme esnasında 10, 20, 30, 40, 50, 80 140, 200, 260, 290 dakikalarda grafit/FDM kompozit matrisin kütlesindeki değişimleri belirlemek amacı ile kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda, 4 saat 50 dakika sonunda grafit/FDM matrisin doygunluğa ulaştığı, ayrıca genişletilmiş grafit matrisin toplam emdiği FDM miktarının %80 den fazlasını ilk 30 dakikada emdiği ilk 4 saatte ise bu miktarın genellikle %99’dan fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, FDM emdirme süresi 4 saat olarak tespit edilmiştir (Yazici, 2022).

2.2.5. Batarya Paketinde Kullanmadan önce Oluşturulan GG/FDM Grafit Matrislerin Sızıntı Testine Tabi Tutulması

Şekil 17’de faz değiştiren kompozit numunesi için sızıntı testinin sonuçlarını gösteren görüntüleri sunulmaktadır. Bu test için grafit/FDM matris kompoziti bir inkübatör içindeki kâğıda yerleştirildi ve 150 dakika boyunca 75 °C’de ısıtıldı. Şekilden de görüldüğü üzere, grafit/FDM matrisi yapısal bütünlüğünü korudu ve emilen FDM kütlesinin kâğıda yalnızca minimal bir kısmını sızdırdı. Kâğıda sızan miktarın bir kısmı, grafit matrise FDM emdirme işlemi sırasında yüzeyde katılaştırılmış FDM’lerin erimesine atfedilebilir. Geriye kalan sızıntı ise, matristen salınan FDM’lerin erimesinden kaynaklanır ve bu miktar matrisin yığın yoğunluğundan etkilenir. Sonuç olarak, farklı yığın yoğunluklarına sahip grafit köpükler

sızıntı testlerine farklı tepkiler göstermiştir. Genel olarak, yığın yoğunluğu arttıkça, FDM sızıntı miktarı azalmıştır.



Şekil 17. GG/FDM kompozit matrise sızma testi uygulanması

Tablo 15. Grafit/RT-35 kompozit matris emdirme ve sızıntı testi sonuçları

	Numune	Grafit Köpük Kütlesi (g)	FDM Emdirme Sonrası Kütle (g)	Sızıntı Testi sonrası Kütle (g)	Sızıntı Yüzdesi (%)
50 g/L Grafit/RT-35	Matris-1	2,9	42,38	40,71	3,95
	Matris-2	2,78	42,11	40,38	4,1
	Matris-3	2,77	41,18	39,15	4,86
	Matris-4	2,88	42,19	40,35	4,36
	Matris-5	2,73	41,76	39,91	4,45
	Matris-6	2,66	41,58	39,82	4,23
	Matris-7	2,73	41,17	39,35	4,42
	Matris-8	2,75	42,5	41,07	3,36
	Matris-9	2,92	42,9	40,94	4,56
75 g/L Grafit/RT-35	Matris-1	4,14	41,88	41,23	1,55
	Matris-2	4,13	41,28	40,54	1,79
	Matris-3	4,15	41,14	40,51	1,44
	Matris-4	4,13	41,45	40,72	1,76
	Matris-5	4,18	41,75	41,09	1,58
	Matris-6	4,14	41,9	41,21	1,65
	Matris-7	4,12	42,57	41,98	1,39
	Matris-8	4,12	41,54	40,78	1,82
	Matris-9	4,13	41,25	40,49	1,84

Tablo 15'in devamı

100 g/L Grafit/RT-35	Numune	Grafit Köpük Kütlesi (g)	FDM Emdirme Sonrası Kütle (g)	Sızıntı Testi sonrası Kütle (g)	Sızıntı Yüzdesi (%)
	Matris-1	5,54	42,90	42,45	1,05
	Matris-2	5,65	44,3	43,87	0,97
	Matris-3	5,77	42,36	41,91	1,06
	Matris-4	5,67	44,6	44,23	0,83
	Matris-5	5,68	42,88	42,42	1,07
	Matris-6	5,52	43,43	42,94	1,12
	Matris-7	5,67	42,88	42,38	1,16
	Matris-8	5,71	43,12	42,64	1,11
	Matris-9	5,55	42,67	42,22	1,05

Tablo 16. Grafit/RT-42 kompozit matris emdirme ve sızıntı testi sonuçları

	Numune	Grafit Köpük Kütlesi (g)	FDM Emdirme Sonrası Kütle (g)	Sızıntı Testi sonrası Kütle (g)	Sızıntı Yüzdesi (%)
50 g/L Grafit/RT-42	Matris-1	2,85	42,08	40,47	3,82
	Matris-2	2,81	42,66	40,9	4,13
	Matris-3	2,71	43,20	41,38	4,21
	Matris-4	2,8	42,67	40,94	4,05
	Matris-5	2,84	41,83	40,29	3,68
	Matris-6	2,75	42,85	41,14	3,99
	Matris-7	2,93	41,24	39,83	3,42
	Matris-8	2,73	41,23	39,84	3,37
	Matris-9	2,8	42,77	41,03	4,07
75 g/L Grafit/RT-42	Matris-1	4,14	42,28	41,55	1,72
	Matris-2	41,13	42,45	41,52	2,19
	Matris-3	4,16	42,68	41,97	1,66
	Matris-4	4,09	42,94	42	2,19
	Matris-5	4,17	42,5	41,71	1,85
	Matris-6	4,19	42,62	42,04	1,36
	Matris-7	4,14	42,63	42,04	1,38
	Matris-8	4,11	42,08	41,44	1,52
	Matris-9	4,10	42,08	41,39	1,63

Tablo 16'nın devamı

100 g/L Grafit/RT-42	Numune	Grafit Köpük Kütlesi (g)	FDM Emdirme Sonrası Kütle (g)	Sızıntı Testi sonrası Kütle (g)	Sızıntı Yüzdesi (%)
	Matris-1	5,65	43,12	42,86	0,6
	Matris-2	5,72	43,7	43,35	0,8
	Matris-3	5,45	42	41,86	0,33
	Matris-4	5,7	42,05	41,75	0,71
	Matris-5	5,61	42,98	42,78	0,47
	Matris-6	5,57	42,63	42,35	0,66
	Matris-7	5,42	42,74	42,46	0,66
	Matris-8	5,66	42,64	42,26	0,89
	Matris-9	5,55	42,58	42,25	0,78

Tablo 15 ve Tablo 16'da 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip ve iki farklı FDM içeren (RT-35 ve RT-42) kompozit grafit matris yapıların çeşitli üretim aşamalarındaki kütleleri sunulmuştur. Bu kütleler, genişletilmiş grafitte ön şekil verme işlemi sonrası oluşturulan grafit köpük matris kütleleri, grafit köpük matrislere FDM emdirilmesi sonucu toplam kompozit matris kütleleri ve FDM emdirilmiş kompozit matrislerin sızıntı testine tabi tutulması sonucu elde edilen kütleler olarak sıralanabilir. Bu değerleri kullanarak, sızıntı yüzdeleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\text{Sızıntı (\%)} = \left(\frac{\text{Emdirme Sonrası Kütle} - \text{Sızıntı Sonrası Kütle}}{\text{Emdirme Sonrası Kütle}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Sızıntı yüzdeleri farklı yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM matrislerin bünyelerinde FDM tutma kapasitesini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Kompozit grafit/FDM matrisleri değerlendirirken kullanılan önemli parametrelerden birisi de gözeneklilik değeridir. Bu değer FDM tutucu malzemenin (grafit köpük matris) içindeki boşluk oranını ifade etmek için kullanılır. Emdirme işlemi sonrası bu boşluklar FDM ile doldurulacağından gözeneklilik değerleri yardımıyla kompozit yapının yoğunluğu, ısı iletkenliği, gizli ısı depolama kapasitesi ve ısı depolama kapasitesi değerlerine ulaşılabilir. Farklı yığın yoğunluklarına sahip grafit köpüklere FDM emdirilmesi sonucu üretilen kompozit yapıların sızıntı testi öncesi gözeneklilik değerleri (GZ) ile gösterilir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$GZ = \left(\frac{\text{Emdirme Sonrası Kütle} - \text{Grafite Köpük Ağırlığı}}{\text{FDM yoğunluğu}} \right) \times \frac{1}{\text{Matris Hacmi}} \quad (9)$$

Sızıntı testi sonrası kompozit grafit/FDM yapıların gözeneklilik değerleri ise etkin gözeneklilik (EGZ) olarak ifade edilmiştir. Bunun nedeni, kompozit batarya paketleri üzerinde gerçekleştirilecek olan deşarj testleri için sızıntı testleri uygulanmış kompozit matrislerin kullanılacak olmasıdır. Etkin gözeneklilik değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$EGZ = \left(\frac{\text{Sızdırma Sonrası Kütle} - \text{Grafite Köpük Ağırlığı}}{\text{FDM yoğunluğu}} \right) \times \frac{1}{\text{Matris Hacmi}} \quad (10)$$

Tablo 17. Saf parafin ve grafit/FDM matris özellikleri

Özellikler	Saf RT 35	RT35/Grafite Kompozit Matris			Saf RT 42	RT42/Grafite Kompozit Matris		
		50 g/L	75 g/L	100 g/L		50 g/L	75 g/L	100 g/L
Erime Noktası (°C)	38	37,5	37,2	36,8	43	42,5	41,9	41,7
Gizli Isı (J/g)	160	146,6	142,3	136,7	165	144,2	140,1	133,3
Yoğunluk (kg/m ³)	860	768	782,5	811	880	776,7	797,6	817,6
Isı İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	0.2	5,02	5,74	5,91	0.2	4,80	5,78	6,17

Parafin ve kompozit grafit/FDM matrislerin özellikleri Tablo 17’de verilmiştir. Saf parafin ve kompozit yapıların sıcaklığının bir fonksiyonu olan ısı akısı Hitachi-7020 (DSC) cihazı ile ölçülmüştür. Isıl iletkenlik katsayıları ise FlashLine-2000 cihazı kullanılarak laserflash yöntemi ile ölçülmüştür.

2.3. Yalın ve Kompozit Batarya Paketleri

Çalışmada, iki farklı ısıl yönetim sistemi arasında karşılaştırmalı bir analiz yürütülmüştür: biri yalnızca ortam havasına maruz kalan yalın batarya paketini kullanırken, diğeri ise kompozit grafit/FDM matrislerini kullanmaktadır. Bu karşılaştırmmanın amacı, grafit/FDM kompozit matris kullanılan batarya paketlerinin, yalın batarya paketlerine kıyasla maksimum sıcaklığı düşürme, daha düzgün bir sıcaklık dağılımı elde etme ve aynı deşarj yükü altında kritik çalışma sıcaklığına ulaşınca kadar (60 °C) geçen süreyi (çalışma

süresi) uzatma açısından üstün performans sunup sunmadığını belirlemektir. Batarya paketlerinde, yüksek deşarj akımı kapasiteleriyle bilinen Panasonic-Sanyo NCR18650 GA LIB hücreleri kullanılmaktadır. Silindirik lityum-iyon hücreye ait özellikler Tablo 18’de verilmiştir.

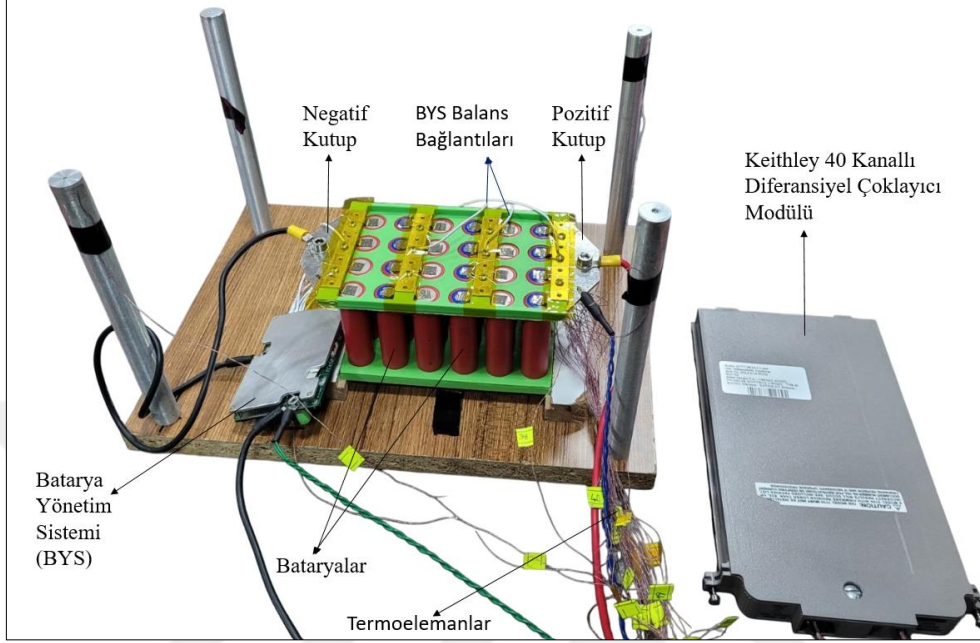
Tablo 18. Panasonic-Sanyo NCR18650 GA lityum iyon hücre özellikleri (Nguyen, 2021; Panasonic, t.y.)

Model	NCR18650GA
Üretici	Panasonic-Sanyo
Batarya Türü	Lityum-iyon
Katot	NCA
Anot	Graphite+SiOx
Minimum Kapasite	3350 mAh
Tipik Kapasite	3450 mAh
Nominal Voltaj	3.6 V
Üst Kesme Voltajı	4.2 V
Alt Kesme Voltajı	2.5 V
Standart Şarj Akımı	0.5C
Maksimum Sürekli Deşarj	10 A
Enerji Yoğunluğu	224 Wh/kg
Maksimum Kütle	48 g
Maksimum Çap	18.5 mm
Maksimum Yükseklik	65.3 mm
Çalışma Sıcaklık Aralığı	Şarj: 0°C ila 45°C, Deşarj: -20°C ila 60°C, Saklama: -20°C ila 50°C

2.3.1. Yalın Batarya Paketinin Oluşturulması

Yalın batarya paketi yapılandırması ve bileşenleri Şekil 18’de gösterilmiştir. Bu batarya paketi, 4’lü gruplar halinde paralel bağlı bataryaların 6 seri bağlantısını içeren bir 6s4p yapılandırmasına sahiptir. Bu 6s4p düzenlemesiyle, batarya paketi üst kesme voltajının maksimum 25,2 V’ a ulaşması hesaplanırken, nominal kapasitesi 13400 mAh olarak bulunur. Batarya paketindeki silindirik hücreler alüminyum busbarlar ve nikel şerit teller aracılığıyla birbirine bağlanır. Hücreler arasında dengeli şarjı sağlamak ve önceden ayarlanmış voltaj eşiğine ulaşıldığında deşarj sürecini sonlandırarak sistemi korumak için yalın batarya paketi ile birlikte bir batarya yönetim sistemi (BYS) kullanılmaktadır. Şekil ayrıca, şarj ve deşarj işlemleri için ilgili cihaz kutuplarından gelen test kablolarının bağlandığı batarya negatif ve pozitif terminallerini göstermektedir. Batarya paketi, 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak üretilen ve yeşil renkle vurgulanan 5 mm kalınlığındaki destek bileşenleriyle hem üst

kısımdan hem de alt kısımdan yapısal olarak güçlendirilmiştir ve silindirik hücreler bu iki plaka arasına yerleştirilmiştir.



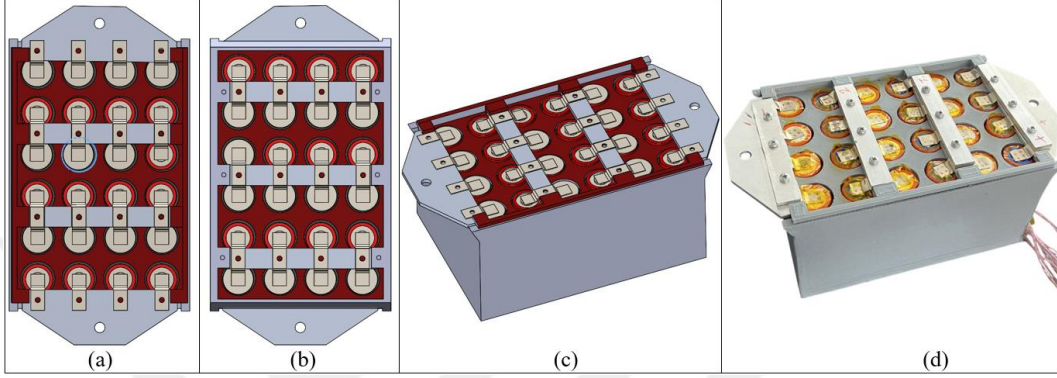
Şekil 18. Yalın paket ve test bağlantı elemanları

2.3.2. Grafit/FDM Kompozit Batarya Paketinin Oluşturulması

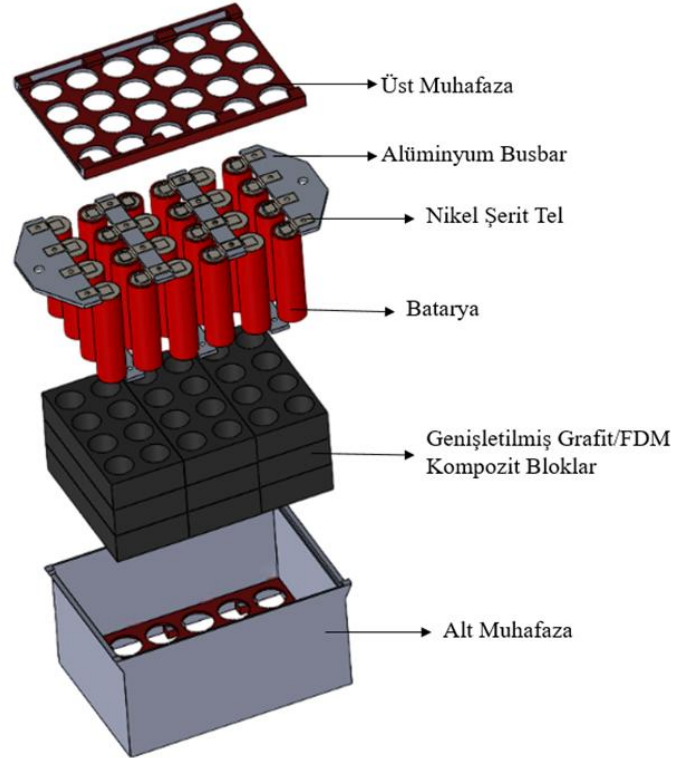
Şekil 19'da 3 boyutlu tasarımın üst, alt ve izometrik görünümünü sunulmaktadır. Özellikle, Şekil 19(d)'de, kontrollü bir laboratuvar ortamında titizlikle tasarlanmış fiziksel batarya paketindeki 24 adet bataryanın, nikel şerit bağlantıları ve busbar bağlantılarıyla birlikte düzenlenmesi gösterilmektedir. Bu kompozit paketi ile herhangi bir ısı yönetim sistemi bulundurmeyen yalın batarya paketi arasındaki en önemli fark, bataryaların kapsüllenmesinde yatmaktadır. Kompozit batarya paketinde, bataryalar grafit/FDM matris bloklar içine yerleştirilmiştir. Bu tasarım, kompozit malzemelerin koruyucu ve iletken özelliklerinden yararlanarak batarya paketinin genel ısı kontrol performansını, güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Şekil 20'de batarya paketinin patlatılmış bir görünümünü sunmakta ve grafit/FDM kompozit matrislerini içeren düzeni ve içyapıyı detaylandırılmaktadır. Bu çizim, bileşenlerin karmaşık montajı ve yapılandırması hakkında derinlemesine bir bakış açısı sunarak, yapısal bütünlüğü ve termal yönetimi geliştirmek için tasarlanmış kompozit malzemelerin uyum içerisinde birleşmesini vurgular. Şekil, batarya paketinin dokuz kompozit yapı içerdiğini

ortaya koymaktadır. Üst ve alt korumalar, bataryaların silindirik çaplarına uygun yuvalarla hassas bir şekilde tasarlanmıştır ve bataryaların paket içinde güvenli bir şekilde yerleştirilmesini ve sabitlenmesini sağlamaktadır. Ek olarak, alt koruma, kompozit blokları sıkıca yerinde tutan 2 mm kalınlığında yan duvarlara sahiptir, böylece genel yapısal bütünlük korunur ve tüm tertibatın sağlamlığı ve dayanıklılığı artırılır.



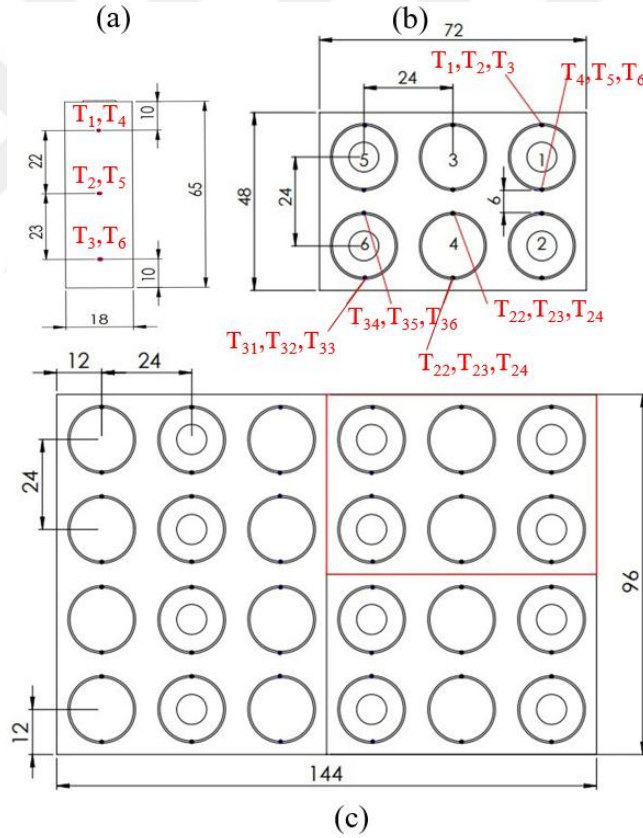
Şekil 19. Kompozit batarya paketi (a) Tasarımın üstten görünüşü (b) Tasarımın alttan görünüşü (c) Tasarımın izometrik görünüşü (d) Laboratuvar ortamında oluşturulan batarya paketi



Şekil 20. Grafit/FDM kompozit batarya paketi patlatılmış görünümü

2.3.3. Oluşturulan Batarya Paketlerinde Sıcaklık Ölçümü İçin Yerel Sıcaklık Noktalarının Belirlenmesi ve Termoeleman Bağlantıları

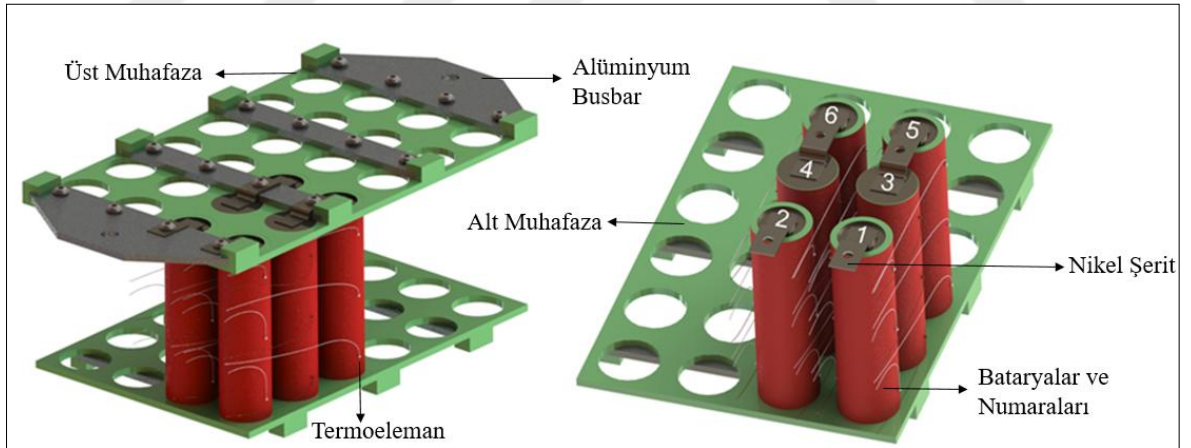
Şekil 21(a), altı termočiftin tek bir hücreye yerleştirilmesi yöntemini göstermektedir. Yerleştirme esnasında, biri dışarıya, diğeri içeriye bakacak şekilde tek silindirik hücrenin iki farklı yüzeyi seçilmiştir. Termočiftler şu şekilde yerleştirilmiştir: T_1 dışa bakan yüzeyde, T_4 içe bakan yüzeyde, pozitif kutuptan 10 mm uzaklıkta; T_2 dışa bakan yüzeyde, T_5 içe bakan yüzeyde, hücrenin orta kısmında (32,5 mm) ve T_3 dışa bakan yüzeyde, T_6 içe bakan yüzeyde, negatif kutuptan 10 mm uzaklıkta. Tek bir hücre için toplam altı yerel sıcaklık noktası belirlenmiştir. Bu altı nokta hücrenin üst, orta ve alt bölümleri kapsayacak şekilde üçü hücrenin dış yüzeyinden ve diğeri üçü ise hücrenin iç yüzeyinden olacak şekilde seçilmiştir. Tüm sıcaklık ölçümleri Omega marka T tipi termočift kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. Çizim üzerinde sıcaklık ölçüm noktaları (a) Tekli batarya üzerinde 6 adet termoelemanın konumlandırılması (b) Pakette batarya numaralandırılmaları ve sıcaklık ölçüm noktaları (c) Batarya paketinin üst görünüşü ve sıcaklık ölçümü için seçilen kırmızı referans bölge

Şekil 21(b), termal performans değerlendirmesi için tüm batarya paketini temsil etmek üzere seçilen altı adet bataryayı göstermektedir. Ön çalışmalar, en yüksek sıcaklıkların 4 ve 6 numaralı bataryalarda kaydedildiğini, buna karşın 1 numaralı bataryanın en düşük sıcaklıkları gösterdiğini belirlemiştir. 2, 3 ve 5 numaralı bataryalar ise maksimum ve minimum sıcaklık aralığına düşmüştür. Bu bataryalar maksimum sıcaklık farkını etkilemediğinden, ölçüm sürecinden hariç tutulmuştur. Bunun yerine, 1, 4 ve 6 numaralı bataryaların hem iç hem de dış yüzeylerinden üç ölçüm alınmış ve toplam 18 yerel ölçüm noktası belirlenmiştir. T_1 , T_2 ve T_3 , 1 numaralı bataryanın dış yüzeyine tutturulmuş termočiftleri belirtirken, T_4 , T_5 ve T_6 , iç yüzeyindeki termočiftlere karşılık gelir. Benzer şekilde, T_{19} , T_{20} ve T_{21} ile T_{22} , T_{23} ve T_{24} , sırasıyla 4 numaralı bataryanın dış ve iç yüzeylerindeki termočiftleri belirtir. 6 numaralı batarya için, T_{31} , T_{32} ve T_{33} , dış yüzeydeki termočift noktalarını belirtirken, T_{34} , T_{35} ve T_{36} , iç yüzeydeki termočift noktalarını belirtir.

Şekil 21(c)'de tüm batarya paketindeki bataryaların üst görünüşü görülmektedir ve kırmızı bir sınırla belirlenmiş altı adet referans batarya içeren alanı vurgulamaktadır. Açıkça, bu belirlenmiş referans bölgesindeki bataryalar paketteki diğer tüm bataryalara simetrik ve bu sayede sıcaklık ölçümü için tüm paketin temsili bir örneği olarak hizmet eder.

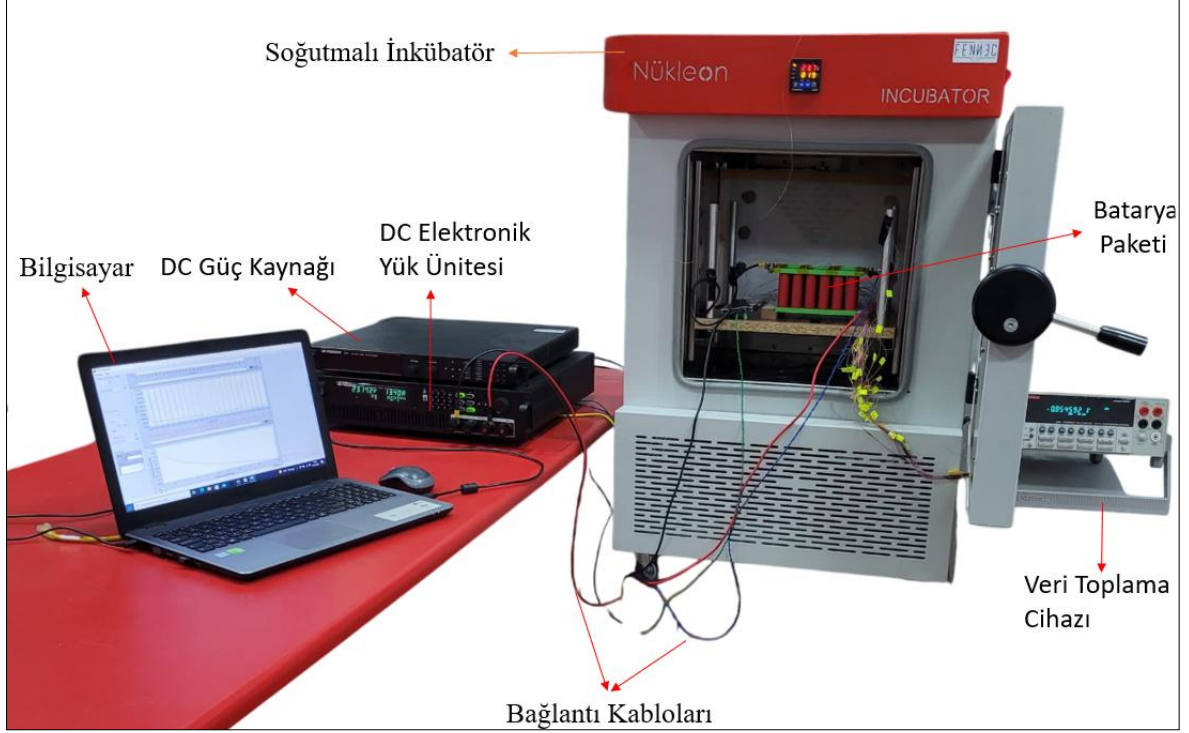


Şekil 22. Referans olarak seçilen bataryalar ve termoeleman yerleşimi

Şekil 22'de tanımlanan hücre grubunun üç boyutlu bir tasvirini ve termočiftleri düzenlemesini gösterilmektedir. Bu gösterim, termočiftlerin batarya yüzeylerinde açıkça görülebilmesini sağlamak için yalın batarya paketi üzerine işlenmiştir. Şekil, altı bataryayı, alt ve üst muhafazaları, bağlantı elemanlarını ve 1'den 6'ya kadar numaralandırılmış bataryalara tutturulmuş 18 termočifti açıkça göstermektedir.

2.4. Deneysel Yöntem

Şekil 23’de performans testi için tasarlanmış deneysel kurulum gösterilmektedir. Bu düzenlemedeki altı temel bileşen şu şekilde sıralanabilir: test alanı (Yalın batarya paketi veya FDM/grafit matris kompozit içeren paket), inkübatör, DC elektronik yük ünitesi, DC elektronik güç kaynağı, veri toplama sistemi ve bir bilgisayar.



Şekil 23. Deney düzeneği ve kullanılan cihazlar

Deneyisel testlere başlamadan önce, batarya paketinin şarj ve deşarj edilmesi için gerekli parametrelerin belirlenmesi üzerine, 6S4P yapılandırmasının dikkate alınması esastır. Şarj işlemi sırasında üst kesme voltajı 4,2 V (Tablo 18) olan tek bir hücrenin üst kesme voltajının, seri olarak bağlanan hücre sayısı olan 6 ile çarpılmasıyla hesaplanır. Bu, tüm batarya paketi için 25,2 V'luk ($4,2 \text{ V} \times 6$) bir üst kesme voltajı ile sonuçlanır. Ayrıca, kapasite değeri, Tablo 18’de belirtilen tek bir hücrenin kapasitesinin (3350 mAh) paralel bağlantı sayısı olan 4 ile çarpılmasıyla bulunur. Sonuç olarak toplam kapasite 13400 mAh’dır ($4 \times 3350 \text{ mAh}$). Batarya paketinin daha güvenli aralıkta çalışabilmesi ve potansiyelinin üzerinde aşırı gerilim durumuna maruz kalmaması adına deneysel yöntemde tek bir batarya hücresinin üst kesme gerilimi 4,175 V olarak seçilmiştir. Dolayısıyla, bu değer batarya paketine uygulandığında 25,05 V’ye dönüşür. Alt kesme gerilimine

gelindiğinde ise deşarj işlemini daha güvenilir aralıkta gerçekleştirmek ve aşırı deşarj durumunun neden olabileceği risklerden kaçınmak adına bu değer tek bir batarya hücresi için 2,8 V olarak belirtilmiştir. Seri bağlı altı hücreden oluşan bir batarya paketi için alt kesme gerilimi, tek hücre kesme geriliminin 6 katı olarak hesaplanır 16,8 V değeri elde edilir. Bu nedenle, batarya paketi için alt kesme gerilimi 16,8 V olarak belirlenmiştir.

Tablo 19. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler

Ölçüm Cihazı	Cihaz/Ürün	Ölçüm Aralığı	Hata Oranı
Veri toplama cihazı	Keithly 2700 integra serisi ve 7708 kart modülü	-200 °C – +1820 °C	± 1 °C (% 1)
DC Elektronik Yük Ünitesi	BK PRECISION 8514B	0 – 120V/0 – 240A/ 0 – 1500W	CC mod: $\pm(0.05\% + 0.05\% \text{ FS})$ CV mod: $\pm(0.05\% + 0.025\% \text{ FS})$
DC Güç Kaynağı	BK PRECISION 9115	0 – 80V/0 – 60A 0 – 1200W	Voltaj: $\pm (0.02\% + 30 \text{ mV})$ Akım : $\pm (0.1\% + 60 \text{ mA})$
1000W 55L Soğutmalı İnkübatör	Nükleon	-25 °C – +100 °C	± 1.5 °C
12 Kanallı Sıcaklık Kayıt Cihazı	PCE-T 1200	-100 °C – +400 °C (t tipi termoeleman için)	$\pm(\% 0.4 + 1 \text{ °C})$
Termoeleman Çifti	Omega / TFCC ve TFCP (T tipi)	-200 °C – +350 °C	$\pm 0,5$ °C (% 0,75)

Deneyisel testler, 25°C kontrollü bir ortama ayarlanmış bir inkübatörde PRECISION 9115 DC güç kaynağı kullanılarak batarya paketinin şarj edilmesiyle başlamıştır. Şarj işlemi, batarya voltajı 25,05 V'ye ulaşana kadar 6,7 A'da sabit akım moduyla sürmektedir. Daha sonra, cihaz 25,05 V'yi koruyarak sabit voltaj moduna geçer ve akım 0,25 A'ya düşene kadar şarj devam eder, bu noktaya ulaşıncaya kadar şarj işlemi sonlandırılmıştır. Burada, 6,7 A sabit şarj akımının seçimi, bataryanın karakteristik özelliklerine dayanmaktadır. Batarya veri sayfasından alınan Tablo 18'inde belirtildiği gibi, standart şarj akımı 0,5 C'dir. C oranı, uygulanan akımın sistemin toplam kapasitesine oranı olarak tanımlanır ve batarya

kapasitesine göre şarj veyadeşarj oranını değerlendirmek için kesin bir ölçüt sağlar. C-oranı Denklem 11 verilen ifade ile hesaplanır. Daha önce belirtildiği gibi, batarya paketinin toplam kapasitesi 13,400 Ah'dir. Buradan, Denklem 11'nin uygulanması, 0,5C şarj oranının 6,7A'lık bir akım değerine eşit olduğunu ortaya koyar.

$$C = \frac{\text{Uygulanan Akım}}{\text{Batarya Kapasitesi}} \quad (11)$$

Şarj işleminin tamamlanmasının ardından, inkübatörün sıcaklığı, yaklaşandeşarj testi için belirtilen ortam koşullarına ayarlanmıştır. Sonrasında batarya paketi,deşarj işlemi başlatılmadan önce elektriksel dengeye ulaştığından emin olmak için inkübatörün içerisinde 14-16 saat boyunca bu ortam sıcaklığında tutulmuştur. Isıl ve elektriksel denge (açık devre gerilimi = 24,90-24,80 V arası) sağlandığında ise, batarya paketi BK PRECISION 8514B DC elektronik yük ünitesi kullanılarak çeşitlideşarj akımları altında test edilmiştir. Test sürecinin başlatılması üzerine, 15 s aralıklarla sıcaklık değişimleri ve 1 s aralıklarla elektriksel parametreler (voltaj,deşarj kapasitesi, enerji kapasitesi) bir bilgisayar ara yüzü aracılığıyla titizlikle kaydedilmiştir. Deşarj testleri, 13,4 A ve 30 Adeşarj akımları altında kontrollü bir kabin/inkübatörde (Nükleon marka) gerçekleştirilmiştir. Tüm batarya paketleri ve -15 °C, 25 °C ve 35 °C ortam sıcaklıklarında test edilmiştir.

Deneyler, batarya özelliklerine uygun olarak 16,8 V'luk bir kesme gerilim değeri veya 60°C'lik bir maksimum sıcaklık eşiği (Tablo 18) çalışma sınır koşulundan birine ulaşıldığında sonlandırılmıştır. Hücre sıcaklık ölçümüne ek olarak şartlandırılmış iç ortam (inkübatör) için 3 adet termoeleman kullanılmıştır. Deney/test sürecinde inkübatörün ortam sıcaklığını ± 1.5 °C tolerans ile arzu edilen sıcaklık değerinde tuttuğu gözlenmiştir.

Deneysel araştırmaların bir sonucu olarak, sıcaklık-zaman ve voltaj-zaman grafiklerinin yanı sıra, değişendeşarj akımları altında batarya paketinin kapasite ve enerji kapasitesi ölçümleri, yalın paket ve kompozit paketler arasındaki karşılaştırmalı analizler için kullanılacaktır. Bu nedenle, bu değerleri doğru bir şekilde hesaplanması son derece önemlidir. Batarya kapasitesi aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$Q_{Kap} = \int_0^{t_d} I(t) dt \quad (12)$$

Denklem (12)'de , (Q_{Kap}) batarya kapasitesini amper-saat (Ah) cinsinden, ($I(t)$) zamana bağlı olarak akımı ve (t_d) toplam deşarj süresini göstermektedir. Enerji kapasitesi ise Watt-saat (Wh) cinsinden aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$Q_{EK} = \int_0^{t_d} V(t) I(t) dt \quad (13)$$

Denklem 13'de, (Q_{EK}) bataryanın (Wh) cinsinden kapasitesini, ($V(t)$) gerilimi zamana bağlı olarak, ($I(t)$) akımı zamana olarak ve t_d deşarj süresini göstermektedir (Zhao, 2020). Ayrıca, test başlangıcında 24,80-24,90 V aralığında olan batarya paketi gerilim değeri (açık devre gerilimi) deşarj akımı büyüklüğüne bağlı olarak ani bir düşüş göstermektedir. Bu ani düşüş sonrası elde edilen gerilim değeri terminal gerilimi olarak adlandırılır ve yük ünitesi (BK PRECISION 8514B) tarafından başlangıç gerilim değeri olarak kabul edilir. Açık devre gerilimi (hücreden güç çekilmediği durum) ve terminal gerilimi (hücreden güç çekildiği durum) arasındaki fark bataryaların iç direncinden kaynaklanmaktadır. Terminal gerilimi ve açık devre gerilimi arasındaki değişim Kirchhoff gerilim kanunu ile açıklanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$V = E - IR \quad (14)$$

Burada, E açık devre voltajını, I bataryadan çekilen akımı, R bataryanın iç direncini, V bataryadan elde edilebilen gerilim değerini göstermektedir (Wang vd., 2024).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, grafit/FDM matrisler içeren batarya paketlerinin performansını incelemek için 6S4P yapılandırmasına sahip 24 adet silindirik LIB hücreden oluşan yalın batarya paketi referans olarak alınmıştır. Çalışmada, farklı kompozit matrislerin ısı performansının iyileşmesi üzerine etkileri incelenmiş ve bu kompozit yapıların etkinliği karşılaştırılmıştır.

İncelenen grafit/FDM kompozit yapılar, üç farklı yığın yoğunluğunda (50g/L, 75g/L ve 100g/L) ön şekillendirme yöntemi kullanılarak üretilen grafit köpük matrislere iki farklı parafin FDM'nin (RT-35 ve RT-42) emdirilerek elde edilmiştir. Bu kompozit yapılar, performans testlerinden önce sıvı FDM sızdırmazlık verimliliği ve gözeneklilik değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

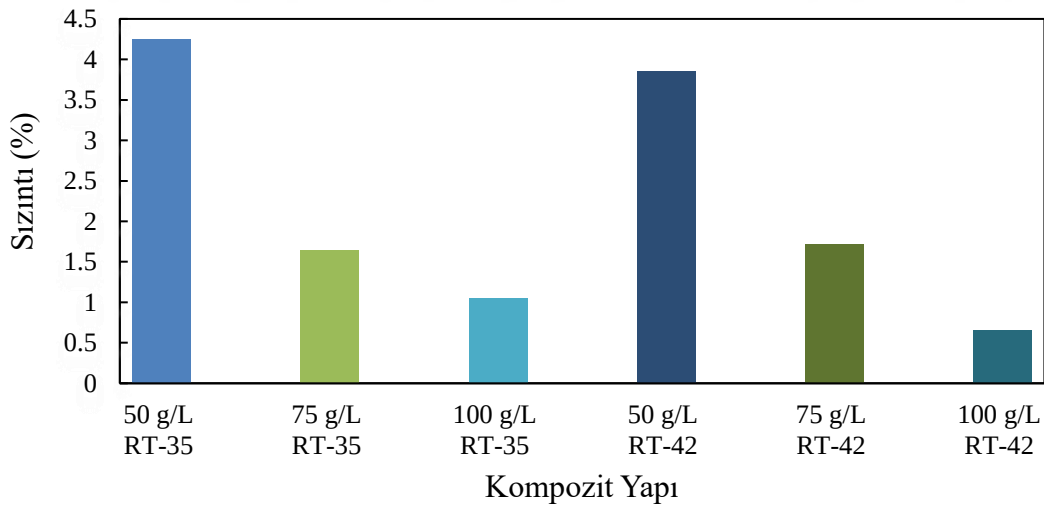
Referans batarya paketi ve grafit/FDM kompozit batarya paketleri -15°C (düşük sıcaklık değeri), 25°C (orta sıcaklık değeri) ve 35°C (yüksek sıcaklık değeri) olmak üzere üç farklı sıcaklıkta, $I = 13,4\text{ A}$ (1C) orta deşarj ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{C}$) yüksek deşarj akımları altında performans testlerine tabi tutulmuştur. Her bir performans testi için, batarya paketlerinin seçilmiş referans bölgelerindeki toplam 18 noktada (Şekil 21(b)'de $T_1 - T_6$ arası, $T_{19} - T_{24}$ arası ve $T_{31} - T_{36}$ arasında) yerel sıcaklıklar ölçülmüş ve ölçülen değerler tartışılmıştır. Tartışma, gerilim-zaman, gerilim-kapasite ve gerilim-enerji kapasitesi grafikleri üzerinden yapılmıştır. Çalışma kapsamında, çeşitli deşarj akımları ve ortam sıcaklıkları altında batarya paketinin maksimum sıcaklığını ve sıcaklık farkını en aza indirecek ideal kompozit grafit/FDM yapılar belirlenirken hücre sıcaklıklarının 60°C 'lik kritik çalışma sıcaklığına ulaşması önlemek için deşarj işlemi sırasında belirlenen alt kesme voltaj değerine ulaşması ve paket kapasitesinin kullanımının en üst düzeye çıkarılması sağlanmıştır.

3.1. Grafit Köpük Yığın Yoğunluğunun FDM Sızdırmazlık Verimliliği Üzerindeki Etkisi

Şekil 24'de farklı erime noktalarına sahip iki faz değiştiren malzeme (RT-35 ve RT-42) ile emdirilmiş, üç farklı yığın yoğunluğundaki kompozit grafit/FDM yapıları için ortalama sızıntı yüzdeleri gösterilmektedir. Ortalama sızıntı yüzdeleri farklı yığın yoğunlukları ve farklı FDM türleri için daha önce Tablo 15 ve Tablo 16'da verilen değerler ile Denklem 8 kullanılarak elde edilmiştir. Yığın yoğunluklarına bağlı olarak, RT-35 ve RT-

42 içeren GG köpüklerin sızıntı yüzdeleri farklı eğilimler göstermiştir. 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarındaki grafit/RT-35 matrislerin sızıntı yüzdeleri sırasıyla %4,25, %1,65 ve %1,05'dir. Bu durum, daha yüksek yığın yoğunluklarındaki matrislerin kullanımının grafit/FDM matrisin yapısal bütünlüğünü ve FDM tutma kapasitesini iyileştirdiği anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, aynı yığın yoğunlukları için, RT-42 içeren kompozit matris sızıntı yüzdeleri sırasıyla %3,86, %1,72 ve %0,65'lik olarak bulunmuştur. Burada da, yüksek yığın yoğunluklarının kullanımının daha düşük sızıntı yüzdesine neden olduğu görülmektedir.

RT-35 FDM içeren matrislerin kullanımı ile kıyaslandığında, RT-42 FDM içeren matrislerin kullanımı daha düşük sızıntı yüzdeleri sağlamıştır. Bu durum özellikle sızıntı yüzdesinin %0,65'e düştüğü 100 g/L'lik maksimum yığın yoğunluğuna sahip grafit köpükler için geçerlidir. Ayrıca, RT-35 içeren 75 g/L yığın yoğunluklu matrislerin ortalama sızıntısının, aynı yığın yoğunluğunda RT-42 içeren kompozit yapıların sızıntısından biraz daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ön şekillendirme sırasında bazı GG köpüklerinde kapalı form gözeneklerinin varlığına veya FDM emdirme işlemi sırasında GG köpüklerinin yüzeyinde daha fazla RT-42 FDM birikmesi ile açıklanabilir.



Şekil 24. Farklı yığın yoğunluğuna sahip kompozit yapıların ortalama FDM sızıntısı oranları

Sonuçlar incelendiğinde, aynı yığın yoğunlukları için RT-42 FDM kullanılan kompozit yapıların FDM tutma açısından daha üstün olduğu ve yüksek yığın yoğunluklarının daha az FDM sızıntısına neden olduğu görülmektedir.

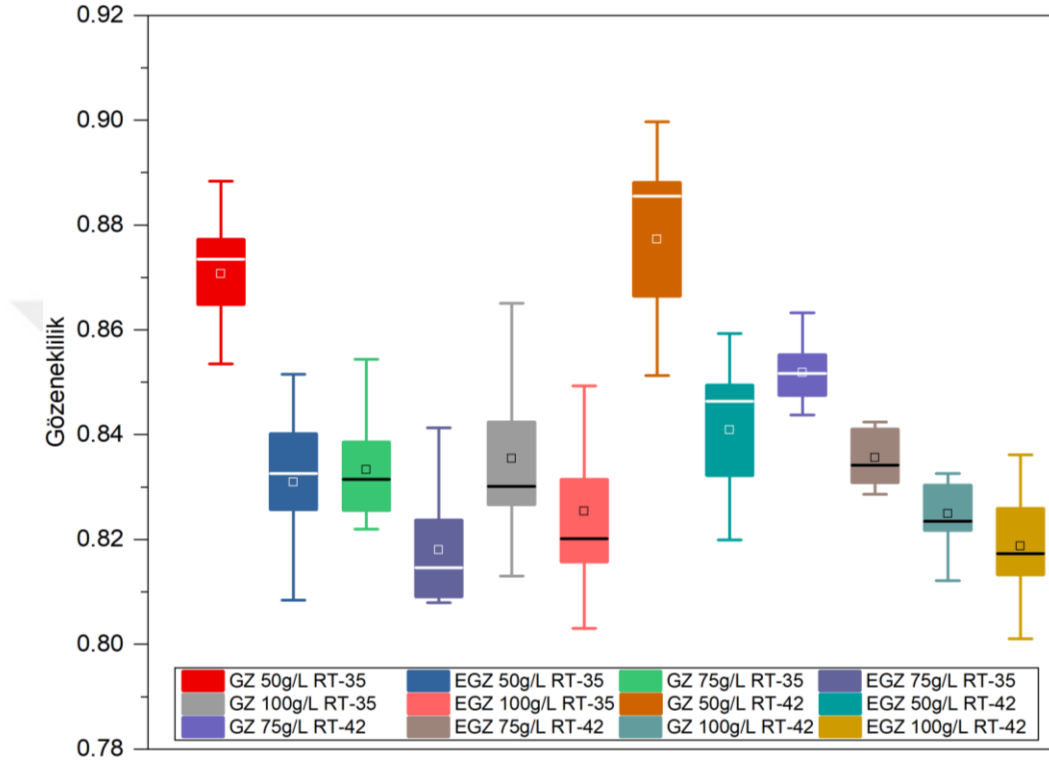
3.2. Grafit Köpük Yığın Yoğunluğunun Gözeneklilik ve Etkin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi

Şekil 25'te, farklı yığın yoğunluklarına sahip grafit köpüklere FDM emdirilmesi sonucu üretilen kompozit yapıların gözeneklilik (GZ) ve etkin gözeneklilik (EGZ) değerleri görülmektedir. Şekilde, değerlerin istatistiksel dağılımını gösteren bir grafik olan kutu grafiklerinden yararlanılmıştır. Her kutu grafiği, aynı yığın yoğunluğuna ve FDM türüne sahip dokuz kompozit matris için elde edilen gözeneklilik veya etkin gözeneklilik değerlerinin dağılımı sonucu elde edilmiştir.

Gözeneklilik ve etkin gözeneklilik sırasıyla daha önce verilen Denklem 9 ve 10 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 25'te her kutu grafiğindeki küçük karecikler dokuz adet kompozit matris için hesaplanan değerlerin aritmetik ortalamasını belirtir. Kutuları bölen çizgiler ise bu dokuz adet gözeneklilik veya etkin gözeneklilik değerinin medyan değerlerini göstermektedir. Grafit/FDM(RT-35) ve grafit/FDM(RT-42) kompozit yapıların ortalama gözeneklilik ve etkin gözeneklilik değerleri, 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunlukları için incelenmiştir. Grafit/FDM(RT-35) yapılarında, 50 g/L yığın yoğunluğu için ortalama gözeneklilik ve etkin gözeneklilik değerleri sırasıyla 0,87 ve 0,83 iken, 75 g/L için 0,833 ve 0,818, 100 g/L için ise 0,835 ve 0,825 olarak hesaplanmıştır. Grafit/FDM(RT-42) yapılarında 50 g/L için bu değerler 0,877 ve 0,84, 75 g/L için 0,85 ve 0,835, 100 g/L için ise 0,825 ve 0,819 olarak bulunmuştur.

Şekil 25'te görüldüğü üzere, gözeneklilik değerleri etkin gözeneklilik değerlerinden her zaman daha yüksektir. Bunun nedeni, etkin gözeneklilik hesabından önce kompozit matrise sızdırma testi uygulanması ve böylelikle bünyesindeki FDM'nin bir kısmını sızdırmasıdır. Ayrıca, artan yığın yoğunluğu ile birlikte, hem gözeneklilik hem de etkin gözeneklilik değerleri azalma eğilimindedir. Bu durum, daha yüksek yığın yoğunluğuna sahip grafit köpük matrislerin daha düşük gözeneklilik değeri sergilediğini göstermektedir. Fakat unutulmamalıdır ki, yüksek yığın yoğunlukları daha düşük gözeneklilik oranına sahip olmanın sakıncalarını yaşarken, daha yüksek sızdırmazlık performansının da üstünlüklerine sahiptirler. Deneysel veya sayısal çalışmalarda, gözeneklilik değerinden ziyade etkin gözeneklilik değerini kullanmak daha yüksek doğruluk sağlar, çünkü bu değer, çalışma

koşulları altında kompozit matrisin FDM tutma kapasitesini dolayısıyla kompozit matris yapısını daha doğru bir şekilde temsil eder. Bu nedenle, gizli ısı veya termal iletkenlik ölçümleri için, sızdırma testine tabi tutulmuş ve etkili gözenekliliği belirlenmiş numuneleri kullanmak gerekir.



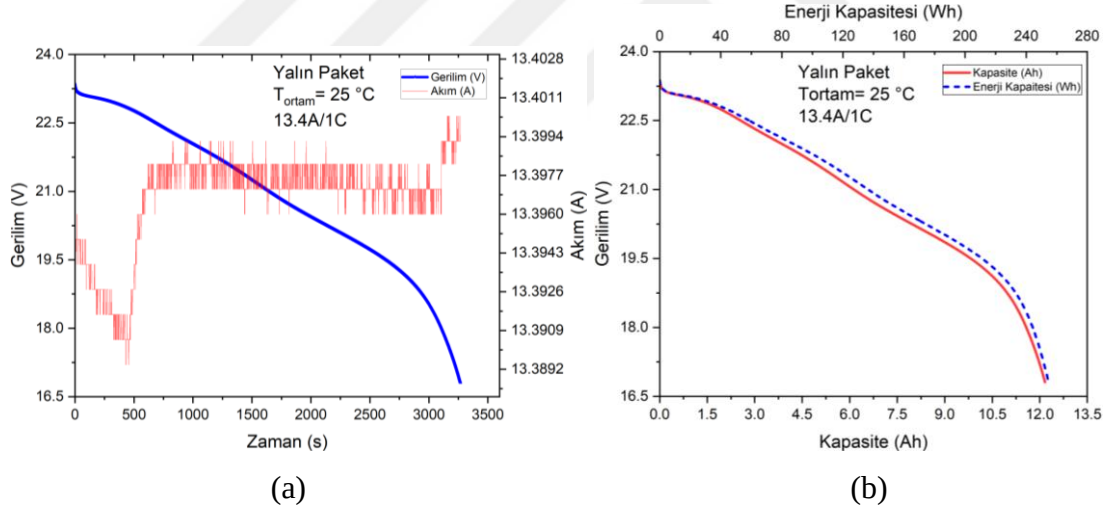
Şekil 25. Farklı yığın yoğunlukları ve farklı FDM türlerinden oluşan grafit/FDM matrislerin gözeneklilik ve etkili gözeneklilikleri

3.3. Yalın Batarya Paketi Performans Testleri

Performans testleri üç farklı ortam sıcaklığı (-15, 25 ve 35 °C) koşullarında ve iki farklı çalışma yükü (13,4 A ve 30 A) altında batarya paketinin termal ve elektriksel davranışını ortaya koymak için gerçekleştirilmiştir. Tortam= -15 °C sıcaklık değeri referans/yalın batarya paketi kullanılarak paketin soğuk çevre şartları altındaki davranışını ortaya koymak için belirlenmiştir. 25 °C ılıman veya orta sıcaklıkta bir çevreyi temsil etmesi nedeniyle seçilmiştir. 35 °C ise nispeten yüksek sıcaklık bölgesini temsil etmesi nedeniyle seçilen bir sıcaklıktır.

3.3.1. Performans Testi, $T_{ortam} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

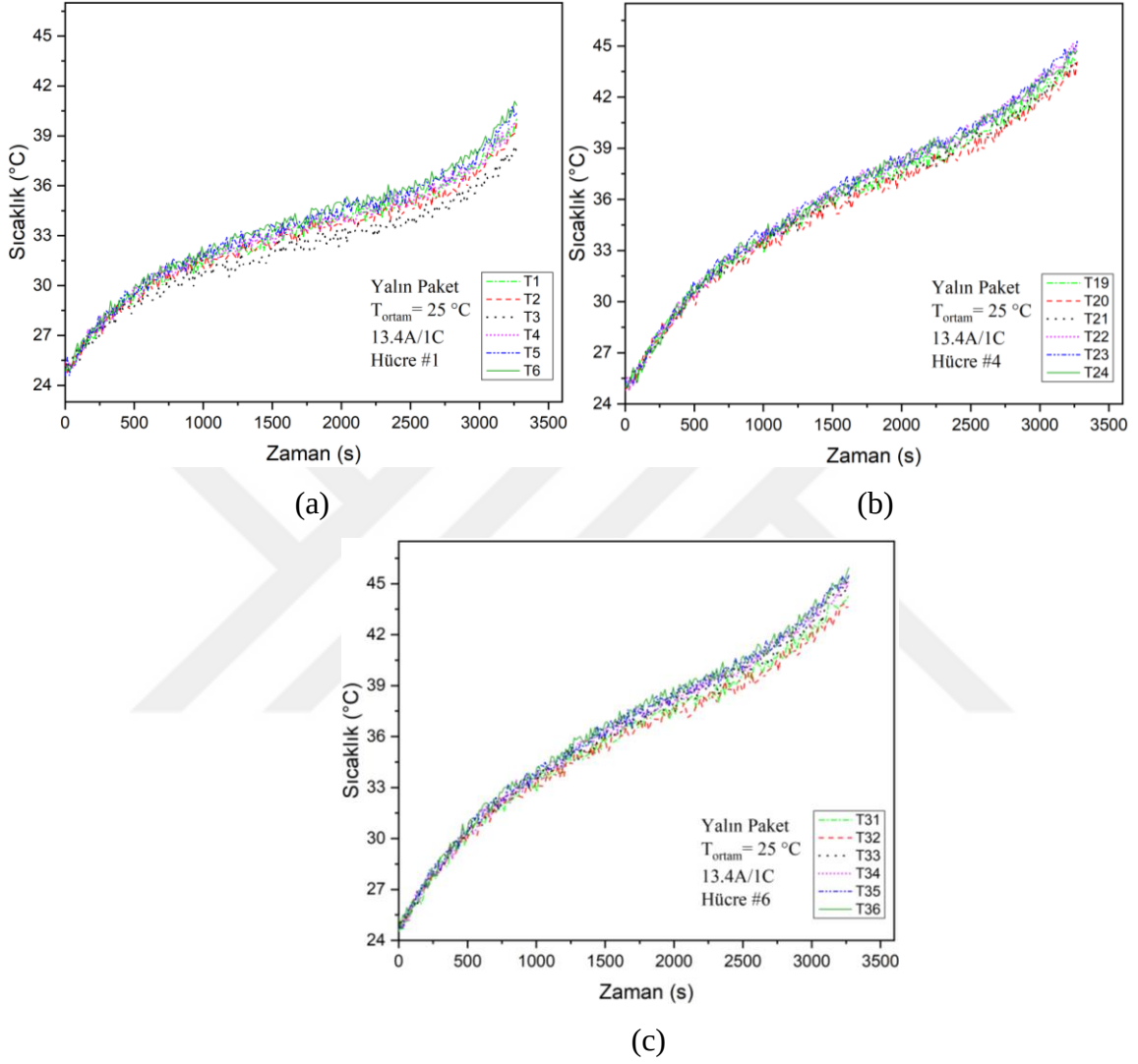
Gerilim (V) ve akım (A) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 26(a)'da verilmiştir. Batarya paketinin sahip olduğu potansiyel farkın, beklenildiği üzere, zamana bağlı olarak azaldığı ve yaklaşık 3261 s sonra alt-kesme gerilim (16,81 V) değerine ulaştığı görülmektedir. Alt-kesme gerilim değerine ulaşılması ile deney sonlanmıştır. Şekil 26(a) incelendiğinde başlangıç voltaj değeri 23,37 V olarak görülmektedir. Bu durum, test başlangıcında 24,80-24,90 V aralığında olan batarya paketi gerilim değerinin (açık devre gerilimi) deşarj akımı büyüklüğüne bağlı olarak ani bir düşüş göstermesi (terminal gerilimi) ve bu değer in yük ünitesi (BK PRECISION 8514B) tarafından başlangıç gerilim değeri olarak kabul edilmesi ile ilgilidir. Bu durum, daha önce Denklem 14'te verilen Kirchhoff gerilim yasası ile açıklanır. Bu yasaya göre bataryadan elde edilen voltaj değerinin iç dirençlere bağlı olarak değiştiği net olarak görülmektedir. Akım-zaman eğrisinde ise 13,4 A seviyesinde sabit akımla deşarj işleminin gerçekleştirildiği gözlenmiştir.



Şekil 26. Yalın paket ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 26(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin yalın batarya paketi için, sırasıyla, 12,166 Ah ve 254,544 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Yalın batarya paketi ile $T_{ortam}=25$ ($13,4\text{ A/1C}$) koşulunda kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 Ah) kıyasla % 9,21'lik bir fark/kayıp olduğu görülmektedir. Bu durum, önemli ölçüde yakınsanan alt kesme gerilim değeri

farklılığı ile açıklanabilir. Hücre özellik bilgi kataloğunda maksimum deşarj kapasitesi değerinin (13,4 Ah) hesaplanmasında alt kesme gerilim değeri 2,5V olarak alınırken, mevcut uygulamada bu değer yaklaşık olarak 2,8 volt olarak alınmıştır.



Şekil 27. Yalın Paket (25 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Isıl performans değerlendirmesinde, 1,4 ve 6 numaralı bataryalar için sıcaklık değişimleri Şekil 27’de sunulmuştur. Burada, deneysel sonuçlar ile 1 numaralı hücre için yüzey sıcaklıklarının en düşük değerlere sahip olduğu ve 6 numaralı hücre için ise maksimum yüzey sıcaklıklarının elde edildiği ifade edilmelidir. Sıcaklık değişimlerinin verildiği grafiklerde T_1 , T_2 , T_3 bataryanın dış yüzeyine bağlanan termoelemanları; T_4 , T_5 ve T_6 ise bataryanın iç yüzeyindeki 3 adet termoelemanı temsil ettiği hatırlanmalıdır.

1 numaralı hücreye ait sıcaklık profilleri Şekil 27(a)'da sunulmuştur. Genel karakter olarak, ilk periyotta ($t < 450$ s), sıcaklık artış oranlarının göreceli olarak hızlı olduğu (lineer artışa yakın bir profil), ikinci periyotta ($450 \text{ s} < t < 2400$ s) sıcaklık artış hızlarının taşınım etkisi ve bu aralıkta gerilim değerlerindeki azalma hızlarının (Şekil 27a) düşmesi sebebiyle azaldığı (pozitif azalan eğim/azalarak artan profil), sonraki periyotta ($t > 2400$ s) ise sıcaklık artış hızının gerilim değerinde hızlı düşüş nedeniyle (pozitif artan eğim/artarak artan karakter) arttığı görülmektedir. Daha önce bataryalarda ısı üretimi kısmında da bahsedildiği üzere, gerilimdeki değişim hızının artması ısı üretiminde de aynı yönde etki etmektedir. Dolayısıyla, sıcaklıklar daha hızlı bir şekilde yükselmektedir. Şekil incelendiğinde, dış yüzey dış ortama, iç yüzey ise iki numaralı bataryaya komşu olduğundan, iç yüzeydeki ısınmanın biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak, T_1 , T_2 ve T_3 karşılaştırıldığında T_1 ve T_2 sıcaklık değerlerinin T_3 'den yüksek olduğu ve ayrıca iç yüzey sıcaklıklarına oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Örnek olarak, $t=2370$ için, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri, sırasıyla, 34,46, 34,93, 33,90, 34,77, 35,27, 34,97 °C şeklindedir. Bu durum iki sebep-sonuç ilişkisi açıklanabilir; birincisi deşarj esnasında bataryanın pozitif kutbunun daha fazla ısınması, ikincisi ise T_1 ' in batarya paketinin pozitifine yani ana busbarlardan birine çok daha yakın bir noktaya bağlı olması ve buradan da T_2 'ye T_3 'e göre daha fazla ısı geçişi olmasıdır. Deşarj işlemi boyunca batarya (1 numaralı) iç kısmı incelendiğinde ise üst, orta ve alt kısım ölçümlerinde daha homojen bir sıcaklık dağılımının olduğu ($\Delta T_{\max} = 1,48$ °C) görülmektedir. 1 numaralı bataryanın iç (T_4 , T_5 , T_6) ve dış yüzey (T_1 , T_2 , T_3) sıcaklık ölçümleri arasındaki sıcaklık farkının ($t=3270$) 2,86 °C seviyesinde olduğu gözlenmiştir.

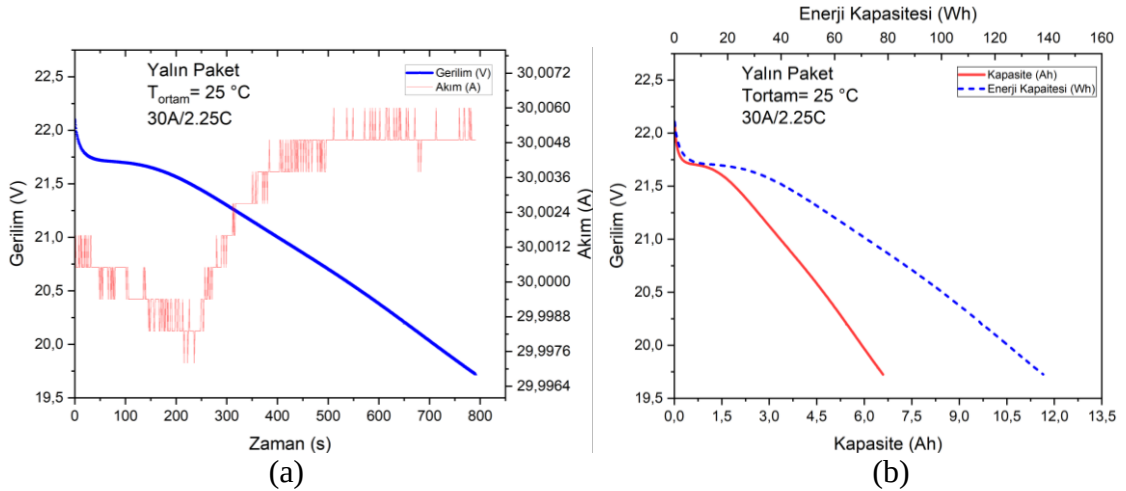
4 numaralı hücreye ait yerel sıcaklık değişimleri Şekil 27(b)'de verilmiştir. 1 numaralı hücre ile benzer eğri karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 27(b)'de iç yüzey ve dış yüzey yerel sıcaklık farklarının 1 numaralı hücreye kıyasla daha hissedilir olduğu gözlenmiştir. Deney süresince T_{22} , T_{23} , T_{24} değerlerinin T_{19} , T_{20} , T_{21} dış yüzey sıcaklık değerlerinden 0,17- 2,07 °C arası daha yüksek olduğu görülmektedir. Ek olarak, deney sonunda 4 numaralı batarya yüzeylerinden alınan sıcaklık değerlerinin 1 numaralı hücreye kıyasla yaklaşık 3-7,28 °C arası daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Örnek olarak, $t=3270$ s zaman adımı, 1 ve 4 numaralı hücreler için T_3 ve T_{23} yerel noktalara ait sıcaklık değerleri sırasıyla, 37,98 °C ve 45,26 °C şeklindedir.

Şekil 27(c)'de 6 numaralı hücreye ait sıcaklık profilleri sunulmuştur. Sıcaklık eğrilerinin benzer değişimler sergilediği ve 4 numaralı hücreden daha yüksek sıcaklık

değerlerinin okunduğu görülmektedir. T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} , T_{36} noktalarındaki sıcaklık değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı ve noktalar arası sıcaklık farkının 1-1,5 °C seviyesinde olduğu gözlenmiştir. 1, 4 ve 6 numaralı hücelere ait yerel sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, örnek olarak ($t=3270$ s), 1, 4 ve 6 numaralı hücreler için T_3 , T_{23} ve T_{36} yerel noktalara ait sıcaklık değerleri sırasıyla, 37,98 °C, 45,26 °C ve 45,95 °C şeklindedir. Dolayısıyla, 13,4 A deşarj akımı yükleme durumu için hücreler arası (1,4 ve 6) maksimum yerel sıcaklık farkı (deney sonu) 7,97 °C olarak elde edilmiştir.

3.3.2. Performans Testi, $T_{ortam} = +25$ °C ve $I = 30$ A ($\approx 2,25$ C)

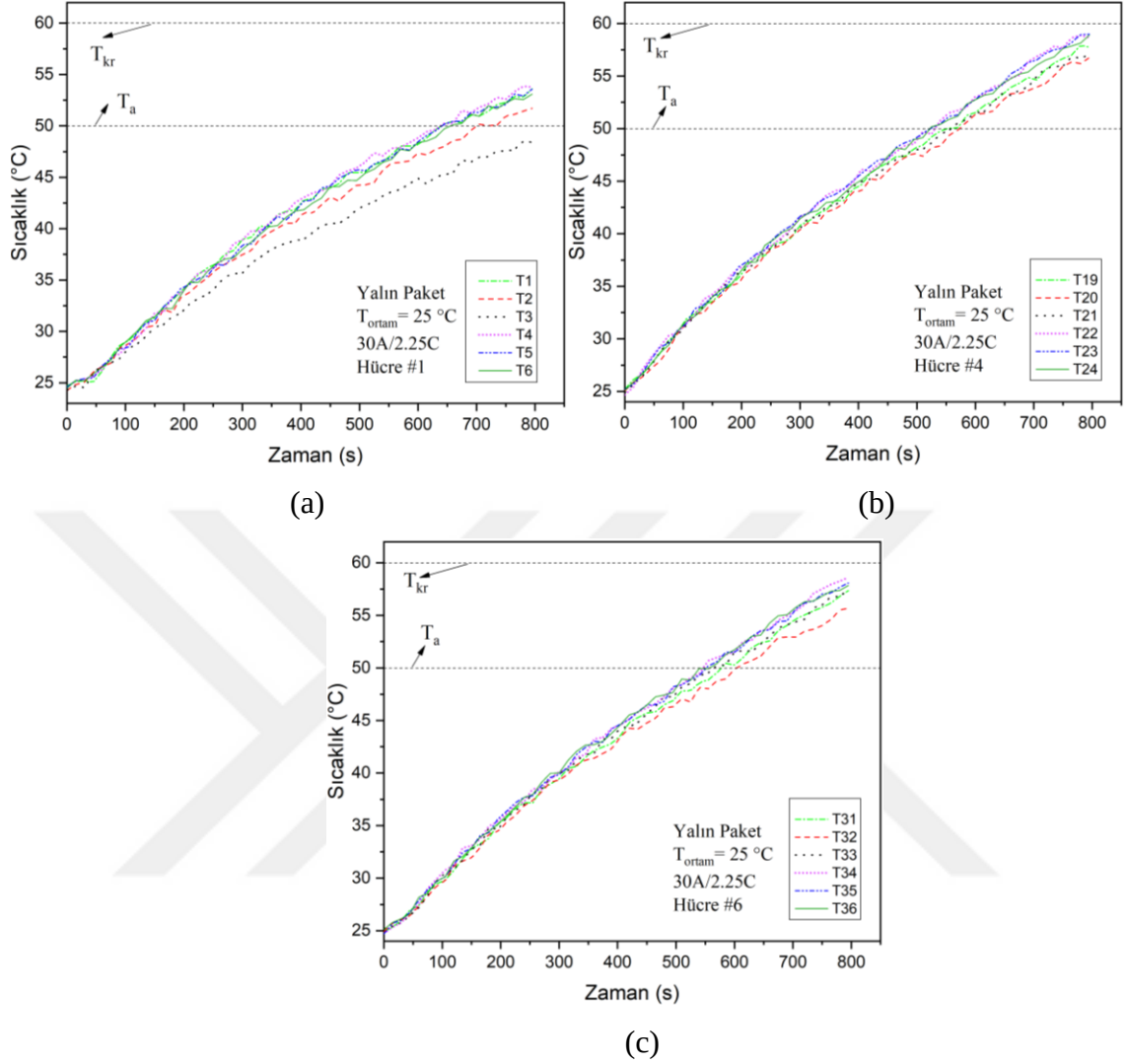
Batarya paketinin +25 °C ortam sıcaklığı ve yüksek deşarj akım değeri (30A) yükü altındaki performans testine ait sonuçlar Şekil 28(a)'da verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde başlangıç gerilim değerinin (22,1 V) 1C deşarj oranındaki değere (23,37 V) kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek deşarj akımı değerine bağlı olarak iç direnç kaynaklı gerilim düşümünün daha yüksek olması ile ilişkilidir. Ayrıca, deney sonunda gerilim değerinin 791 s sonunda 19,72 V değerine ulaştığı, bir başka ifade ile arzu edilen alt kesme gerilim değerine (16,8 V) ulaşamadığı görülmektedir. Bu davranış deneyin limit sıcaklık değerine daha önce ulaşması ve deneysel sürecin sonlandırılması ile ilişkilidir. Akım değerinin ise 30 A olarak sağlandığı Şekil 28(a)'da (sağ eksen) görülmektedir



Şekil 28. Yalın paket (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 28(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi yalın batarya paketi için, sırasıyla, 6,59 Ah ve 138,1 W h değerlerine ulaşmaktadır. 30 A ve 25 °C çalışma koşullarında ulaşılan deşarj kapasitesi değerinin kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 A h) kıyasla % 50,82 daha düşük olduğu görülmektedir. 30 A deşarj akımı yükü altında ulaşılan deşarj kapasitesinin aynı sıcaklıkta 13,4 A deşarj akımı altındaki deşarj kapasitesine kıyasla da %45,83 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, alt kesme gerilim değeri farklılığı ile açıklanabilir. Hücre özellik bilgi kataloğunda maksimum deşarj kapasitesi değerinin (13,4 Ah) ölçümünde hücre için alt kesme gerilim değeri 2,5V olarak alınırken, mevcut uygulamada alt kesme gerilimi yaklaşık olarak 3,286 V (paket için $3,286 \times 6 = 19,72$) volt olarak alınmıştır. 30 A deşarj akımı durumu için enerji kapasitesi değeri 13,4 A durumuna kıyasla benzer şekilde daha düşük değer (% 45,75) elde edilmiştir. Bu durum, yukarıda ifade edildiği üzere, yüksek sıcaklık artış oranlarına bağlı olarak limit çalışma sıcaklığına daha erken ulaşılarak deneysel prosedürün sonlandırılması ile ilişkilidir.

Şekil 29'da +25 °C ortam sıcaklığı ve 30A deşarj yükü altında batarya paketinin yerel sıcaklık değişim profilleri 1, 4 ve 6 numaralı hücreler üzerinden sunulmaktadır. Yerel sıcaklık eğrilerini gösteren grafiklerde, literatürün kabul edilebilir sıcaklık sınırı olarak belirttiği 50 °C T_a ile gösterilmiştir. Ayrıca, batarya veri sayfasında belirtildiği üzere maksimum çalışma sıcaklığı 60 °C ise T_{kr} ile gösterilmiştir. 1, 4 ve 6 numaralı hücrelere ait yerel nokta sıcaklık değişimlerinin ($T_{iç\ yüzey} > T_{dış\ yüzey}$) 1C ile benzerlik gösterdiği gözlenmektedir. Sıcaklık eğrilerine ait karakteristiğin ise ilk iki periyot için (lineer artış, artış hızlarının azalması/azalarak artan) 1C durumu ile benzerlik gösterdiği, ancak son periyottaki (artış hızlarının tekrar arttığı) değişimin gerçekleşmediği gözlenmiştir. 30 A deşarj akımı yükü altında hücre yüzeyleri üzerindeki sıcaklık artış oranlarının 13,4 A yük durumuna kıyasla oldukça yüksek olduğu ve bu doğrultuda yerel sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Hücre yüzey sıcaklıklarının 791 s sonra limit çalışma sıcaklığı değeri olan 59-60 °C'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 29(b)). 30 A deşarj akımı için 1 (T_3), 4 (T_{23}) ve 6 (T_{32}) numaralı hücrelere ait maksimum yerel nokta sıcaklık değerleri ($t=780$ s), sırasıyla 48,51 °C, 58,94 °C, 58,25 °C (30 A) şeklindedir. Ayrıca, 30 A ve 13,4 A deşarj akımı yükleme durumları için hücreler arası (1, 4 ve 6) maksimum yerel sıcaklık farkı, sırasıyla, 10,57 °C ($t=791$ s) ve 7,97 °C ($t=3270$ s) olarak elde edilmiştir. Güvenilir çalışma süresi 30 A deşarj yükü (791 s) için 13,4 A deşarj yüküne (3261 s) kıyasla %75,74 oranında azalmıştır.

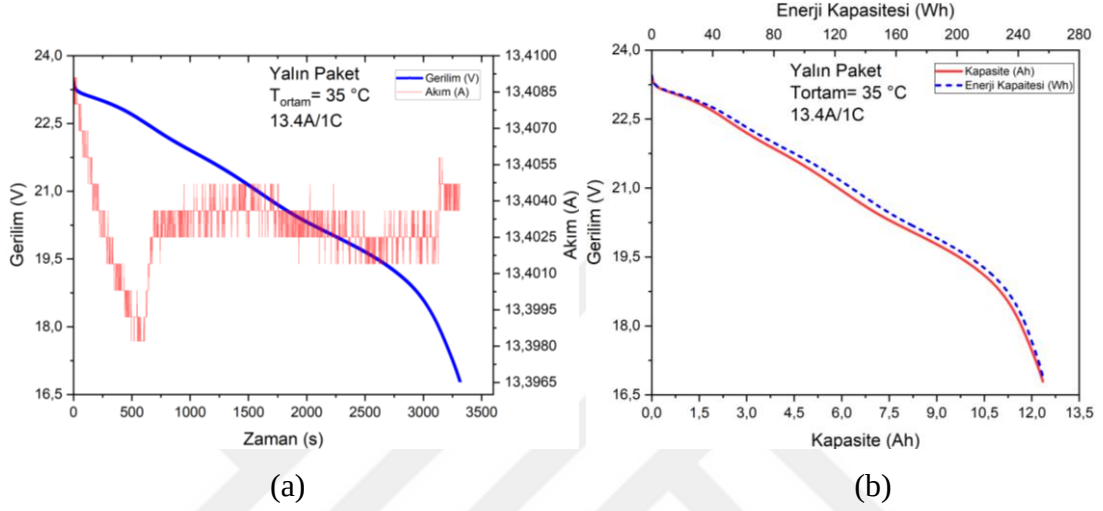


Şekil 29. Yalın Paket (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.3.3. Performans Testi, $T_{\text{ortam}} = +35\text{ °C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

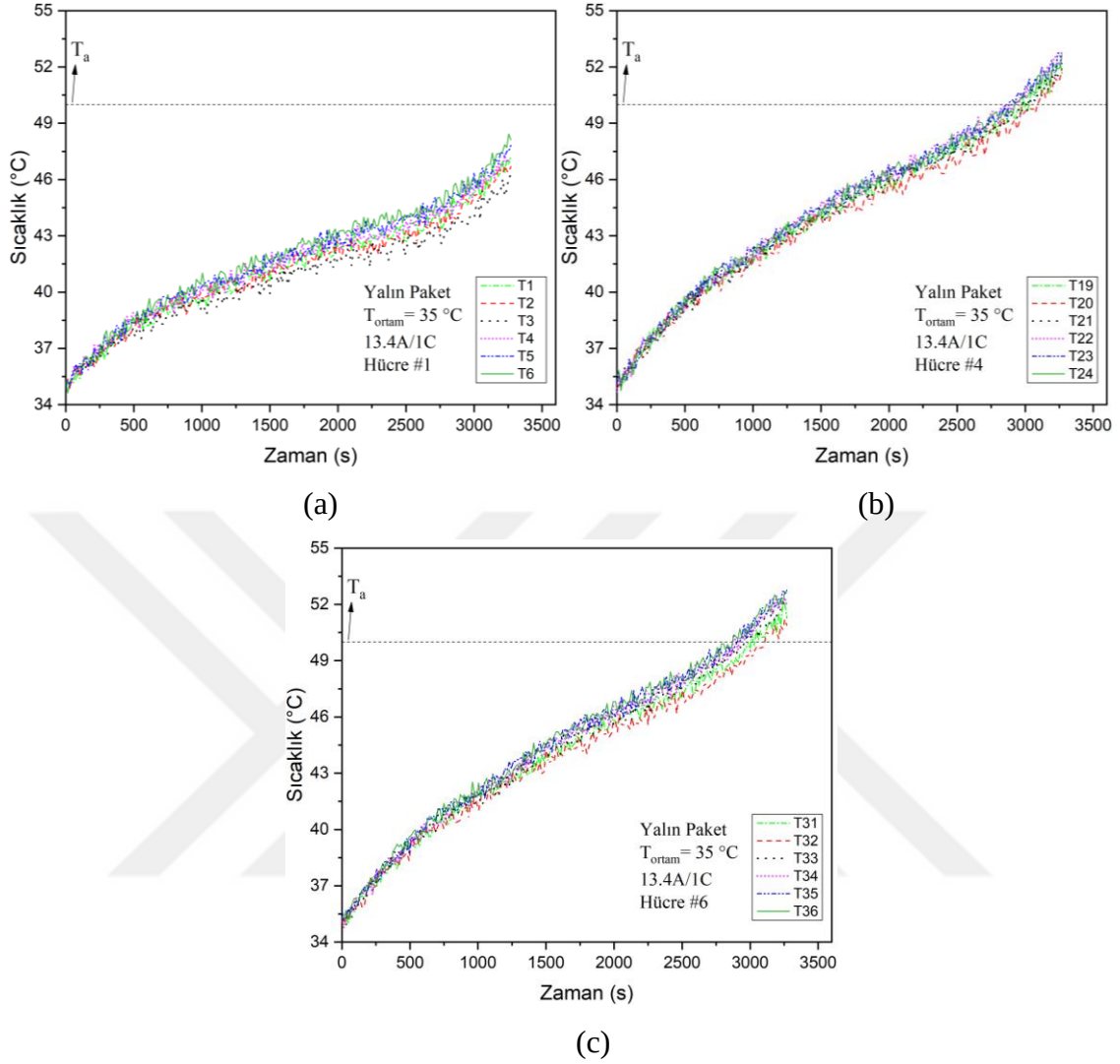
Batarya paketinin $+35\text{ °C}$ ortam sıcaklığı ve 1C deşarj akım değeri (13,4 A) yükü altında göstermiş olduğu elektriksel performansa ait sonuçlar Şekil 30'da verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde $+25\text{ °C}$ ortam sıcaklığı ve 1C çalışma koşulları ile benzer değişimlerin ortaya çıktığı ve gerilim değerinin 23,45 V başlangıç geriliminin 3315 s sonunda alt kesme değerine (16,81 V) azaldığı görülmektedir. Akım değerinin ise 13,4 A olarak uygulandığı görülmektedir (Şekil 30(a), sağ y-eksen). Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 30(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ($T_{\text{ortam}}=35\text{ °C}$, $I=13,4\text{ A}$) ile deşarj kapasitesinin

ve enerji kapasitesinin yalın batarya paketi için, sırasıyla, 12,346 Ah ve 256,92 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Aynı deşarj akımı için $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen deneye kıyasla $T_{ortam}=35^{\circ}\text{C}$ durumu için deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesi değerinin sırasıyla %1,48 ve % 0,93 oranında daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, artan çalışma sıcaklıkları ile hücre içerisindeki iyonik iletkenliğin artması ile açıklanabilir.



Şekil 30. Yalın paket (35°C , $13,4\text{ A}$) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Şekil 31 incelendiğinde, 4 ve 6 numaralı hücelere ait yerel nokta sıcaklık değişimleri ($T_{iç\ yüzey} > T_{dış\ yüzey}$) ve eğri karakteristikleri $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ ile benzerlik gösterdiği gözlenmektedir. 4 ve 6 numaralı hücre sıcaklıklarının izafi olarak daha homojen olduğu belirtilmelidir. Çalışma koşullarının $35^{\circ}\text{C} - 1\text{C}$ olduğu koşul için, $25^{\circ}\text{C} - 1\text{C}$ durumuna kıyasla, hücre yüzey sıcaklıklarının yaklaşık 8°C kadar artan yönde ötelendiği görülmektedir. Örnek olarak, $t=2325\text{ s}$ 'de, $T_{ortam}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ için 1 numaralı (T_4), 4 numaralı (T_{22}) ve 6 (T_{34}) numaralı hücelere ait maksimum yerel sıcaklık noktası değerlerini sunmak daha açıklayıcı olacaktır. Bu değerler sırasıyla, $42,89^{\circ}\text{C}$, $47,79^{\circ}\text{C}$, $47,79^{\circ}\text{C}$; $35,31^{\circ}\text{C}$, $39,60^{\circ}\text{C}$ ve $39,14^{\circ}\text{C}$ şeklindedir. Ayrıca, $T_{ortam}=35^{\circ}\text{C}$ ($13,4\text{ A}/1\text{C}$) ve $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ ($13,4\text{ A}/1\text{C}$) için hücreler arası (1, 4 ve 6) maksimum yerel sıcaklık farkı, sırasıyla, $7,42^{\circ}\text{C}$ ($t=3225\text{ s}$) ve $7,97^{\circ}\text{C}$ ($t=3270\text{ s}$) olarak elde edilmiştir. $T_{ortam}=35^{\circ}\text{C}$ 'nin $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ 'ye göre güvenilir çalışma süreleri açısından %1,38 daha uzun süre faaliyet gösterdiği bulunmuştur. Güvenilir çalışma süreleri içerisinde $T_{ortam}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ durumları için ulaşılan hücre maksimum yüzey sıcaklıkları, sırasıyla, $53,12^{\circ}\text{C}$ ve $45,95^{\circ}\text{C}$ şeklindedir.

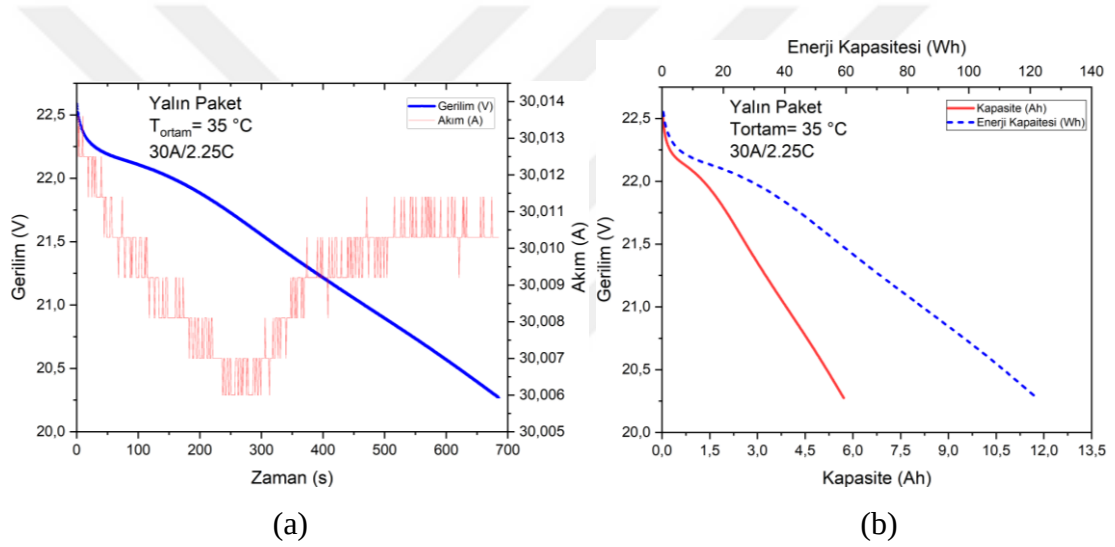


Şekil 31. Yalın Paket (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.3.4. Performans Testi, $T_{ortam} = +35\text{ °C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Şekil 32(a) incelendiğinde, 30 A akım altında gerilim grafiğinin, aynı akım altında 25 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen test sonuçlarına benzerliği görülmektedir. Ancak, 35 °C ortam sıcaklığındaki batarya paketinin daha hızlı ısınması ve daha erken 60 °C'ye ulaşması nedeniyle, test süresi 25 °C testindeki 791 s'ye kıyasla 685 s'ye düşmüştür. Ayrıca, 25 °C ve 30 A testinde alt kesme voltajı 19,72 V iken, 35 °C ve 30 A testinde 20,27 V olarak kalmıştır. Akım değerinin ise 30 A olarak uygulandığı görülmektedir (Şekil 32(a), sağ y-eksen). Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin değişimi Şekil 32(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile ulaşılan deşarj ve enerji kapasitesi değerleri

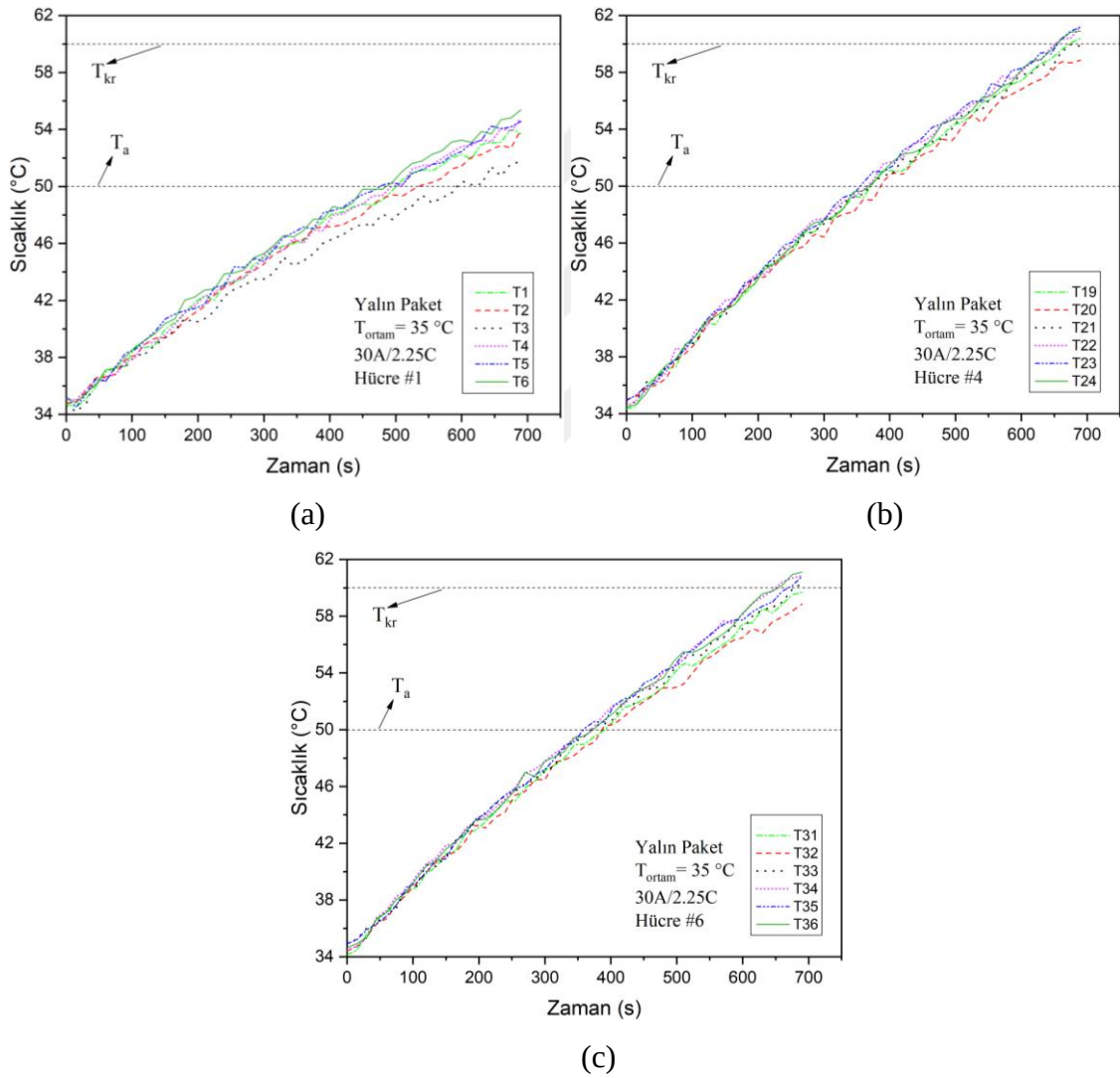
yalın batarya paketi için, sırasıyla, 5,71 Ah ve 122,1 W h şeklindedir. 30 A ve 35 °C çalışma koşullarında ulaşılan deşarj kapasitesi değerinin kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 Ah) kıyasla % 53 daha düşük olduğu görülmektedir. $T_{ortam} = 35\text{ °C}$ (30 A/2,25C) koşulu altında ulaşılan deşarj kapasitesi değerinin $T_{ortam} = 35\text{ °C}$ (13,4 A /1C) ve $T_{ortam} = 25\text{ °C}$ (30 A/2,25C) koşulu altında elde deşarj kapasitesi değerlerinden, sırasıyla, % 53,7 ve % 13,35 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Enerji kapasitesi değeri ise 30 A ve 35 °C çalışma koşulları için $T_{ortam} = 35\text{ °C}$ -13,4 A /1C ve $T_{ortam} = 25\text{ °C}$ -30 A/2,25C çalışma şartlarına kıyasla, sırasıyla, %52,48 ve %11,59 oranında daha düşük değerler almıştır. Yüksek çalışma sıcaklığı koşullarının, limit/güvenilir çalışma sıcaklıkları göz önüne alındığında, batarya performansını sınırlandığı görülmektedir.



Şekil 32. Yalın paket (35 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Batarya paketinin ısı davranışı ($T_{ortam} = 35\text{ °C}$ - 30 A/2,25C) 1, 4 ve 6 numaralı hücreler üzerinden Şekil 33'te sunulmuştur. 1, 4 ve 6 numaralı hücrelere ait yerel nokta sıcaklık değişimleri ($T_{iç\ yüzey} > T_{dış\ yüzey}$) ve eğri karakteristikleri $T_{ortam} = 25\text{ °C}$ - 30 A/2,25 C ile benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. 35 °C - 30A/2,25 C durumu için, 35 °C - 13,4A/1C ve 25 °C - 30 A /2,25 C durumlarına kıyasla, sırasıyla, hücre yüzey sıcaklıklarının yaklaşık 7-8 °C ve 1-2 °C kadar daha yüksek olduğu görülmektedir. Örnek olarak ($t=675\text{ s}$), $T_{ortam} = 35\text{ °C}$ - 30A/2,25 C, $T_{ortam} = 35\text{ °C}$ - 13,4A/1 C ve $T_{ortam} = 25\text{ °C}$ - 30A/2,25 C için 1 numaralı (T4), 4 numaralı (T22) ve 6 (T34) numaralı hücrelere ait maksimum yerel sıcaklık noktası değerleri verilebilir. Bu değerler sırasıyla, 53,85 °C, 60,42 °C, 60,69 °C (35 °C- 30A/2,25 C); 39,62 °C, 40,76 °C, 40,72 °C (35 °C- 13,4A/1C); 51,26 °C, 54,80 °C, 54,53 °C (25 °C-

30A/2,25 C) şeklindedir. Ayrıca, $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C, $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 13,4A/1 C ve $T_{ortam}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C koşulları için hücreler (1, 4 ve 6) arasındaki maksimum yerel sıcaklık farklarının sırasıyla $9,47\text{ }^{\circ}\text{C}$, $7,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $10,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu gözlemlenmiştir. $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C için güvenilir çalışma süresi $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 13,4A/1 C ve $T_{ortam}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C'ye kıyasla, sırasıyla, %79,33 ve %13,4 oranında kısalmıştır. Güvenilir çalışma süreleri içerisinde $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C, $T_{ortam}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 13,4A/1 C ve $T_{ortam}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 30A/2,25 C için ulaşılan maksimum hücre yüzey sıcaklıkları, sırasıyla, 61°C , $53,2$ ve 60°C şeklindedir.

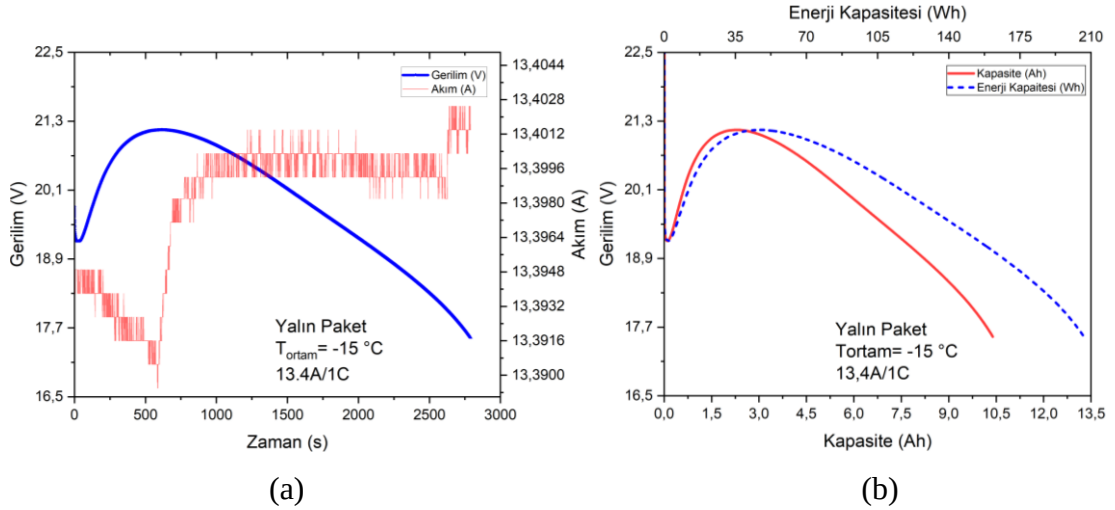


Şekil 33. Yalın Paket ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.3.5. Performans Testi, $T_{ortam} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

Sıfırın altındaki çalışma sıcaklıklarında bataryalar sahip oldukları kapasite değerini önemli bir oranını (% 80-90, $T_{ortam} = -20/-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) kaybederler ve çalışma sıcaklığı deşarj akımı sağlayabilecek sıcaklığa artmazlar ise uygulanan akım değerinde faaliyet gösteremezler. Düşük sıcaklık performans testlerinde, batarya paketi, pozitif sıcaklık performans testlerinde olduğu üzere, oda sıcaklığında 25,05 V üst kesme voltajına kadar şarj edilmiştir. Sonrasında, düşük sıcaklık testlerinin gerçekleştirileceği $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ kabin içerisinde 24 saat süre ile bekletilerek batarya paketinin dengelenmesi sağlanmıştır.

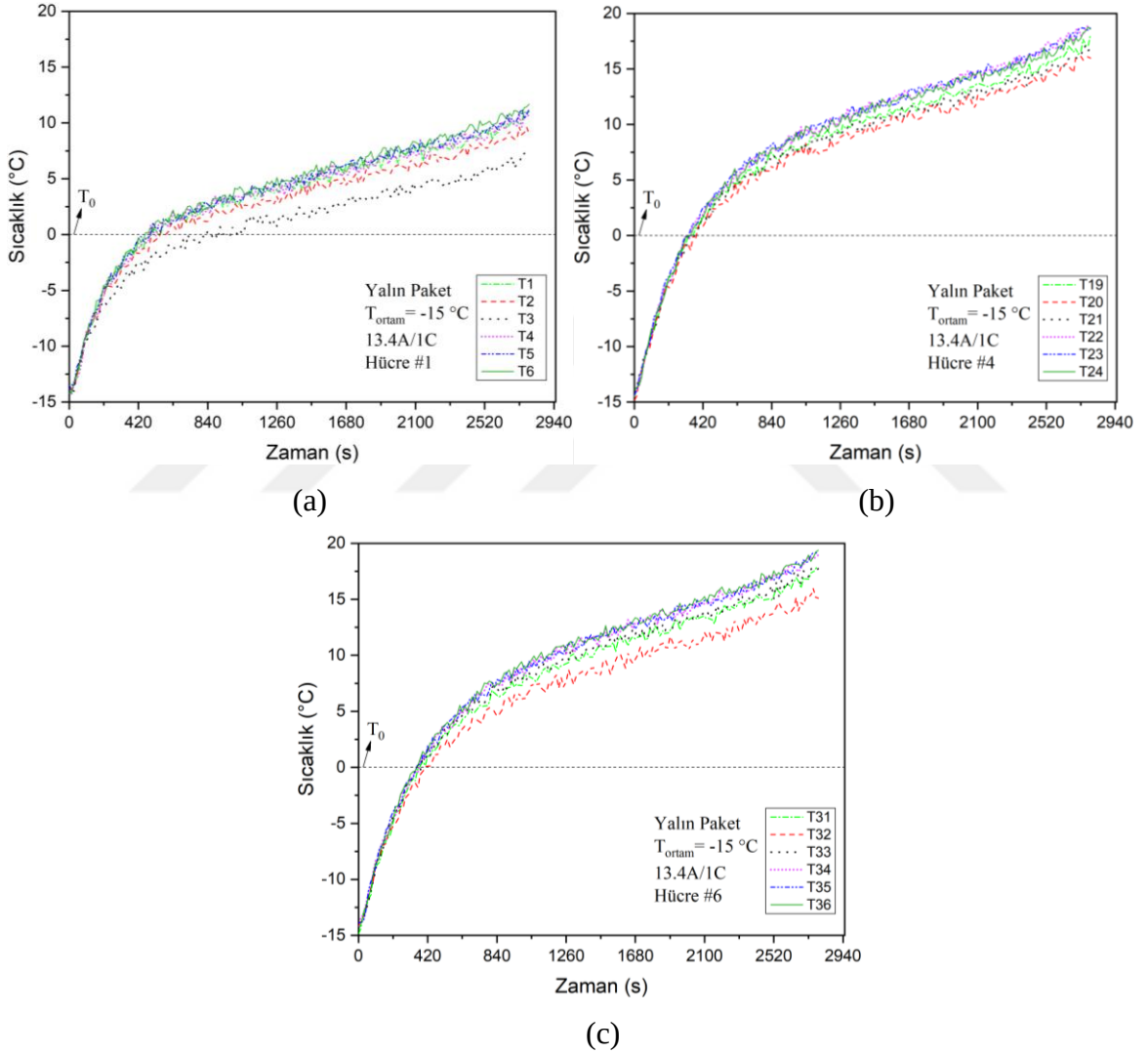
Batarya paketinin $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 1C deşarj akım değeri ve 13,4 A altında sergilediği elektriksel performansa ait veriler Şekil 34(a)'da verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde, ilk periyotta, yüksek iç direnç sebebiyle gerilim değerinin hızla düştüğü (19,8 V) görülmektedir. İlerleyen periyotta, batarya paketinden güç çekilmesiyle hücrelerin ısınmasına bağlı olarak gerilim değerinin arttığı (21 V) olduğu görülmektedir. Sonraki periyotta ise, $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ durumlarına benzer olarak gerilim değeri sürekli olarak azalarak alt kesme gerilim değerine ulaşmaktadır (17,531V (BYS tarafından)) ($t=2791\text{ s}$). DC yük ünitesi ile akım değerinin ise 13,4 A olarak uygulandığı görülmektedir (Şekil 34(a), sağ y-eksen).



Şekil 34. Yalın paket ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Deşarj ve enerji kapasitesi değerlerinin değişimi Şekil 34(b)'de sunulmuştur. Deşarj sürecinin tamamlanması ($T_{ortam} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 13,4 A/1C) ile ulaşılan deşarj ve enerji kapasitesi değerleri yalın batarya paketi için, sırasıyla, 10,4 Ah ve 206,5 Wh şeklindedir. 13,4 A ve -

15 °C çalışma koşullarında ulaşılan deşarj kapasitesi değerinin kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 A h) kıyasla % 22,3 daha düşük olduğu görülmektedir. $T_{ortam} = -15$ °C (13,4A/1C) altında ulaşılan deşarj kapasitesi değerinin $T_{ortam} = 25$ °C (13,4 A /1C) koşulu altında elde deşarj kapasitesi değerinden % 14,51 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Enerji kapasitesi değerinin ise $T_{ortam} = -15$ °C (13,4A/1C) için $T_{ortam} = 25$ °C (13,4 A /1C)'ye kıyasla, %19 oranında daha düşük değer almıştır. $T < 0$ °C çalışma sıcaklığı koşullarının batarya performansını sınırladığı görülmektedir.



Şekil 35. Yalın Paket (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Batarya paketinin ısı davranışı ($T_{ortam} = -15$ °C, 13,4 A/1C) 1, 4 ve 6 numaralı hücreler üzerinden Şekil 35'te sunulmuştur. 1, 4 ve 6 numaralı hücelere ait yerel nokta sıcaklık

değişimleri ($T_{iç\ yüzey} > T_{dış\ yüzey}$) ve eğri karakteristikleri $T_{ortam} = 25/35\ ^\circ\text{C}$ -30 A/2,25C ile benzerlik göstermektedir. Örneğin, T_{ortam} 'ın $-15\ ^\circ\text{C}$ ve akımın 13,4A/1C olduğu senaryoda, $t=675\text{ s}$ 'de hücre 1 (T_4), 4 (T_{22}) ve 6 (T_{34}) için maksimum yerel sıcaklık değerleri sırasıyla $1,20\ ^\circ\text{C}$, $5,81\ ^\circ\text{C}$ ve $5,44\ ^\circ\text{C}$ 'dir. Bu değerler, $t=1800\text{ s}$ 'de sırasıyla $6,55\ ^\circ\text{C}$, $13,52\ ^\circ\text{C}$ ve $13,57\ ^\circ\text{C}$ 'ye yükselmiştir. $-15\ ^\circ\text{C}$ ve 13,4A/1C test koşulları ($t=2790\text{ s}$) için hücreler arası (1, 4 ve 6) maksimum yerel sıcaklık farkı $12,3\ ^\circ\text{C}$ olarak elde edilmiştir. Çalışma süreleri içerisinde $T_{ortam} = -15\ ^\circ\text{C}$ - 13,4A/1 C için ulaşılan maksimum hücre yüzey sıcaklığı $19,37\ ^\circ\text{C}$ şeklindedir (Şekil 35(c)). Ayrıca, şekilde gösterilen T_0 referans çizgisi $0\ ^\circ\text{C}$ 'yi temsil eder. Bu değer, bataryaların sıfırın altındaki sıcaklıklarla ilişkili olumsuz etkilerden kurtulması için gereken süreyi belirlemek amacıyla stratejik olarak seçilmiştir. Bu sıcaklık eşiği referans olarak kullanıldığında, 4 ve 6 numaralı bataryaların ölçülen tüm sıcaklık noktalarının ilk 400 s içinde bu değeri aştığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, $-15\ ^\circ\text{C}$ dış ortama yakın konumlanan 1 numaralı batarya için bu sürenin uzadığı ve son yerel sıcaklık noktasının $0\ ^\circ\text{C}$ 'yi aşmasının yaklaşık 800 s sürdüğü belirlenmiştir.

3.4. Kompozit Grafit/FDM(RT-42) Batarya Paketi Performans Testleri

Bu bölümde, her biri 75 g/L yığın yoğunluğuna sahip, kompozit grafit/FDM (RT-42) matrislerinden oluşan batarya paketinin elektriksel ve ısı performans değerlendirmelerine odaklanılmaktadır. Bu değerlendirmeler üç farklı ortam sıcaklığı koşulunda gerçekleştirilmiştir: $-15\ ^\circ\text{C}$, $25\ ^\circ\text{C}$ ve $35\ ^\circ\text{C}$. Batarya paketi 13,4A ve 30A olmak üzere iki farklı çalışma yükü altında test edilmiştir. Tez, farklı yığın yoğunluklarına (50 g/L ve 100 g/L) sahip RT-42 içeren kompozit grafit/FDM matris batarya paketleri üzerindeki testleri de kapsamına rağmen, bu testlerin elektriksel ve ısı performansları ağırlıklı olarak kullanılan FDM türünden etkilenmektedir. Başka bir deyişle, yığın yoğunluğundaki değişiklikler benzer karakteristik özellikler sergilemekte olup, yalnızca performans seviyesini artırıp azaltabilir. Bu nedenle, tezde anlatım sadeliği adına, benzer karakteristikleri açıklamaktan ziyade, tek bir yığın yoğunluğu (75 g/L) seçilmiş ve bu yoğunluğa ait elektriksel ve ısı performans verileri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Benzer şekilde, sonraki bölümde, anlatımda sadelik adına, 75 g/L grafit matris yığın yoğunluğuna sahip bir kompozit grafit/FDM (RT-35) batarya paketi üzerinde gerçekleştirilen testler seçilmiştir. Bu batarya paketi için ayrıntılı elektriksel ve ısı performans testlerine ait sonuçlar ve bu sonuçlara ait değerlendirmeler verilmiştir. Daha

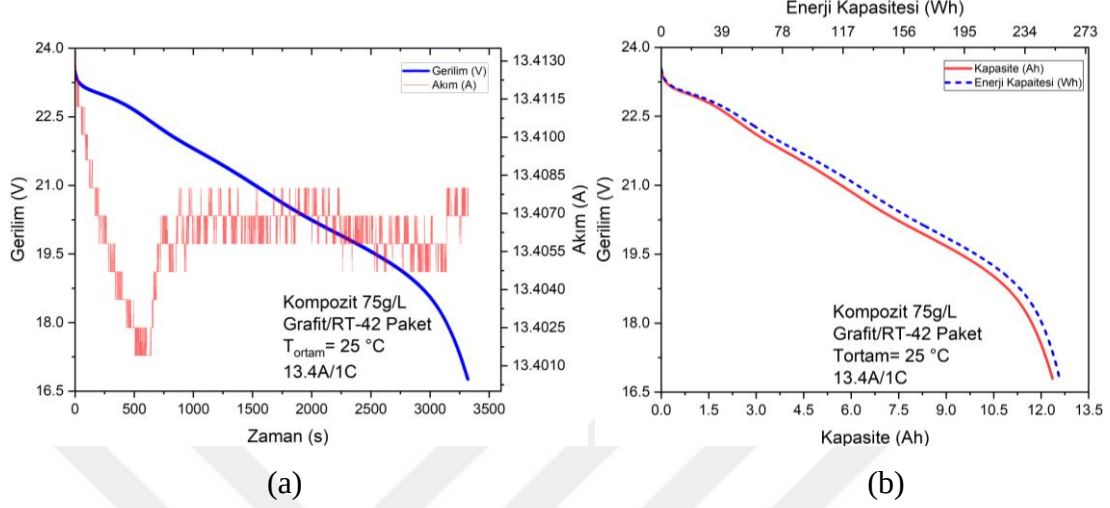
sonraki bölümde ise, RT-42 FDM içeren batarya paketlerinin 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarındaki performans verileri, yalın batarya paketi ve aynı yığın yoğunluklarına sahip kompozit grafit/FDM (RT-35) batarya paketlerinin verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya yönelik ayrıntılı analizler, kapsamlı ve karşılaştırmalı grafiklerle detaylı bir şekilde sunulmuştur. Performans testlerinin sonuçları, her iki FDM türü ve farklı yığın yoğunlukları için kapsamlı bir değerlendirme sağlamaktadır.

3.4.1. Performans Testi, $T_{ortam} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

Gerilim (V) ve akım (A) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 36(a)'da verilmiştir. Batarya paketinin sahip olduğu potansiyel farkın, beklenildiği üzere, zamana bağlı olarak azaldığı ve tam olarak 3318 s sonra alt kesme gerilim (16,8 V) değerine ulaştığı görülmektedir. Bu gerilim değerine ulaşılması ile deney sonlandırılmıştır. Şekil 36(a) incelendiğinde başlangıç voltaj değerinin 23,52 V olarak görülmektedir. Akım-zaman eğrisinde (Şekil 36(a), ikincil y eksen) ise 13,4 A seviyesinde sabit akımla deşarj işleminin gerçekleştirildiği gözlenmiştir.

Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 36(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 12,36 Ah ve 256,35 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi ile $T_{ortam} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (13,4 A/1C) koşulunda kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 mAh) kıyasla % 7,76'lık bir fark/kayıp olduğu saptanmıştır. Aynı çevre koşulları ve akım (A) altında gerçekleştirilen yalın batarya paketi testinde, başlangıç voltajı 23,37 V olarak ölçülmüştü. Deşarj işlemi, batarya paketi 16,81 V'luk alt kesme değerine ulaştığında 3261 s sonunda sonlandırılmıştı. Deşarj işleminin sonunda, deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi sırasıyla 12,166 Ah ve 254,544 Wh olarak belirlenmişti. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin elektriksel davranışı yalın batarya paketi ile karşılaştırıldığında, kompozit matris içeren batarya paketinin yalın batarya paketine göre sırasıyla %1,59 ve %0,71 daha yüksek kapasite ve enerji kapasitesi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Her iki senaryoda da, test alt kesme gerilimine ulaşıldığında sonlandırılmıştır. İdeal olarak, batarya özellikleri ve geçirdikleri döngü sayısı tutarlı olduğu varsayılarak kapasite değerleri aynı olmalıdır. Ancak pratikte, her testin başında 24 yeni batarya kullanılmasına rağmen, buna ulaşmak imkânsızdır. 24 batarya, benzer performans sunan 24 elektrokimyasal cihaz anlamına gelse

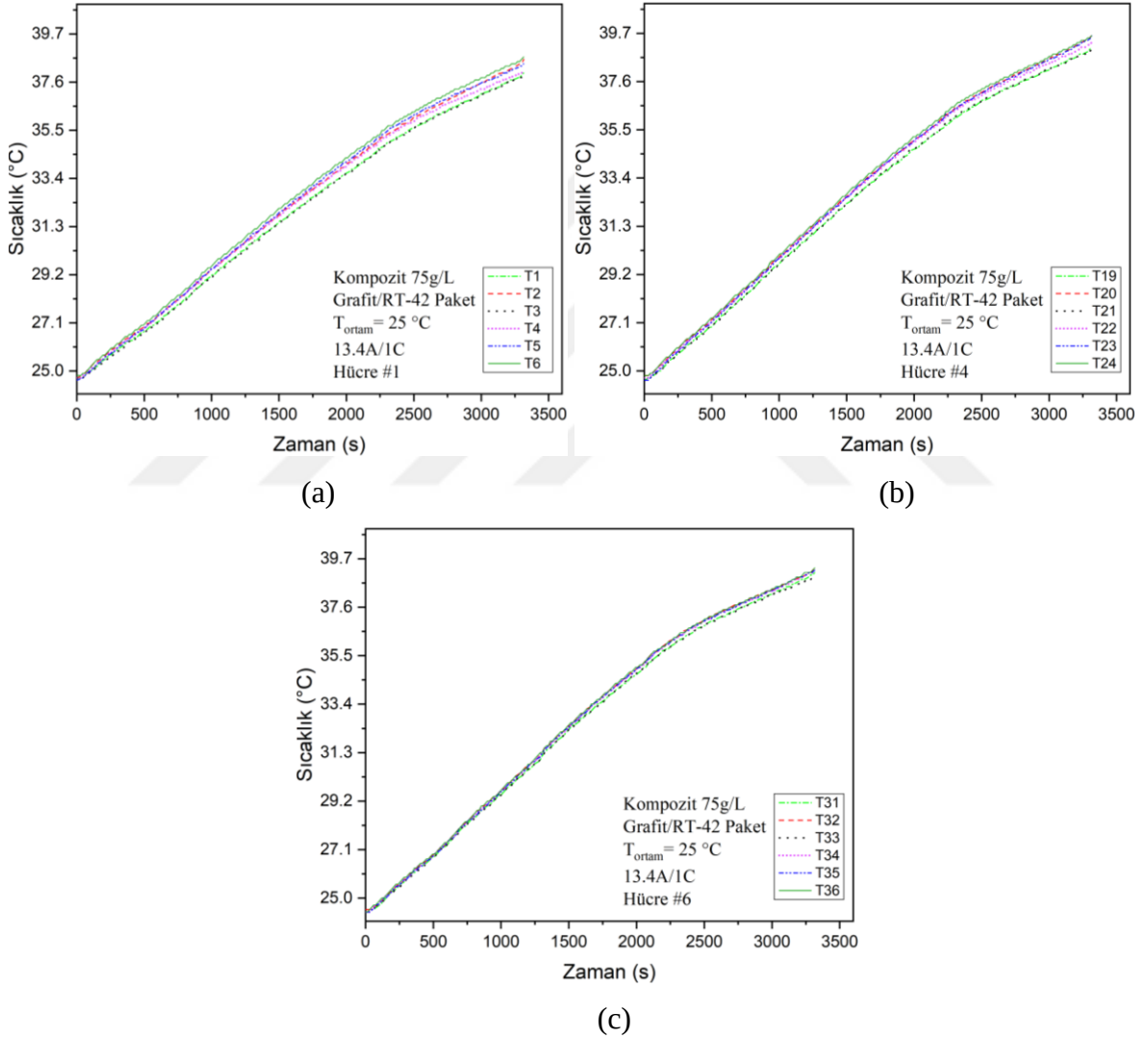
de, hiçbirini tıpatıp aynı özelliklere sahip değildir. Bu nedenle, batarya katalogları genellikle performans özelliklerini tanımlamak için belirli değerler yerine bir aralık veya toleranslı değerler sağlamaktadırlar.



Şekil 36. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1 numaralı hücreye ait sıcaklık değişimi Şekil 37(a)'da sunulmuştur. Karakteristik olarak, ilk periyot 2400 s'ye kadar doğrusal bir sıcaklık artışı gösterirken, ikinci periyot ($t > 2400$ s) RT-42'nin etkisi nedeniyle yavaşlamış bir sıcaklık artışı sergilemektedir. Grafit/FDM (RT-42) matrisinin 38°C ile 43°C arasında faz değişimine uğradığını ve ısı depolama kapasitesinin bu sıcaklıkların altında önemli ölçüde azaldığını belirtmek önemlidir. 1 numaralı hücrede, dış ortama yakınlığı ve onu çevreleyen daha ince grafit/FDM tabakası nedeniyle dış yüzeyde sıcaklık değerleri daha düşüktür. Tersine, 2 numaralı hücreye bitişik iç yüzey biraz daha yüksek sıcaklıklara sahiptir. 1 numaralı hücrenin iç ve dış yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkları diğer hücrelere kıyasla daha belirgin olsa da, bu farklar ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır ve deşarj süreci boyunca yaklaşık 1°C'lık bir maksimum değere ulaşır. Örnek olarak, $t=3300$ s için, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri, sırasıyla 37,8, 38,3, 37,8, 37,9, 38,2, 38,5 °C şeklindedir. 4 numaralı hücreye ait yerel sıcaklık değişimleri Şekil 37(b)'de verilmiştir. 1 numaralı hücre ile benzer eğri karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 37(b)'de deney süresince T_{22} , T_{23} , T_{24} değerlerinin T_{19} , T_{20} , T_{21} dış yüzey sıcaklık değerleri farkının oldukça yakın seyrettiği maksimum farkın yaklaşık olarak 0,6 °C olduğu bulunmuştur. Örnek olarak, $t=3300$ s için, T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} için sıcaklık değerleri, sırasıyla 38,9, 39,4, 38,8, 39,1, 39,4, 39,4 °C'dir. Şekil 37(c)'de 6 numaralı hücreye ait sıcaklık değerleri sunulmuştur. Sıcaklık

eğrilerinin 4 numaralı hücre ile benzer değişimler sergilediği görülmektedir. T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} , T_{36} noktalarındaki sıcaklık değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı ve noktalar arası maksimum sıcaklık farkının $0,4^{\circ}\text{C}$ olduğu saptanmıştır. Örnek olarak, $t=3300$ s için, T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} için sıcaklık değerleri, sırasıyla $38,9$, $39,1$, $38,8$, $39,1$, $39,1$, $39,1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 37 genel olarak değerlendirildiğinde, sıcaklığın oldukça tek düze olduğu görülmektedir. Ek olarak, test esnasında batarya yüzeyleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı yaklaşık olarak $1,7^{\circ}\text{C}$ olarak 3300 'üncü s'de alınan sıcaklık ölçümünde saptanmıştır.



Şekil 37. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25°C , $13,4$ A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

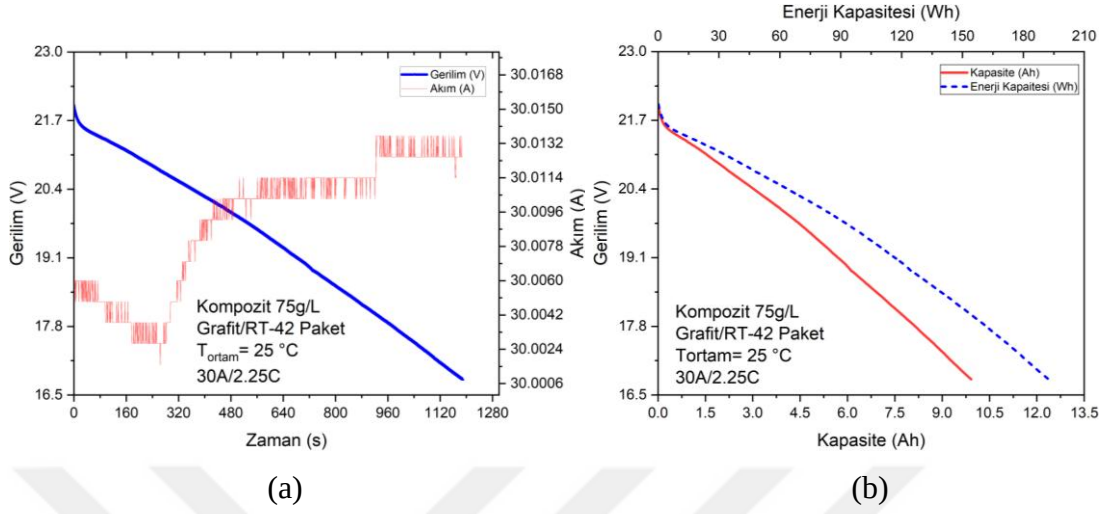
Daha önce aynı şartlarda gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde batarya yüzeyleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı 3270'inci s'de 7,97 °C olarak ölçülmüştü. İki batarya paketi kıyaslandığında, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin sıcaklıkta düzgünlüğü açısından %78,7'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. 25 °C dış ortam ve 13,4 A deşarj akımı için grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin maksimum yerel sıcaklık değerinin 39,5 °C olduğu bulunmuştur. Bu değer daha önce aynı şartlar altında gerçekleştirilen testlerde yalın batarya paketi için yaklaşık olarak 46 °C olarak bulunmuştu. Dolayısıyla, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi yalın batarya paketine göre maksimum yerel sıcaklık açısından da yaklaşık %14,1'lik bir iyileşme sağlamıştır.

3.4.2. Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 30 A ($\approx 2,25$ C)

Batarya paketinin +25 °C ortam sıcaklığı ve yüksek deşarj akım değeri (30A) yükü altındaki performans testine ait sonuçlar Şekil 38(a)'da verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde başlangıç gerilim değerinin (≈ 22 V) 1C deşarj oranındaki değere ($\approx 23,52$ V) kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek deşarj akımı değerine bağlı olarak iç direnç kaynaklı gerilim düşümünün daha yüksek olması ile ilişkilidir. Ayrıca, deney sonunda gerilim değeri 1189 s sonunda 16,8 V değerine ulaştığı anda ve test durdurulmuştur. Aynı ortam sıcaklığı ve deşarj akımı altında gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde deney sonunda gerilim değerinin 791 s sonunda 19,725 V değerine ulaştığı, bir başka ifade ile arzu edilen alt kesme gerilim değerine (16,8 V) ulaşamadığı görülmüştü. Bu davranış deneyin limit sıcaklık değerine (herhangi bir batarya yüzey sıcaklığı $\approx 60^\circ\text{C}$) daha önce ulaşması ve deneysel sürecin manuel olarak sonlandırılması ile ilişkiliydi. İki batarya paketi karşılaştırıldığında, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi yalın batarya paketine kıyasla aynı deşarj akımı akım altında %50,3 oranında daha uzun süre faaliyet göstermiştir.

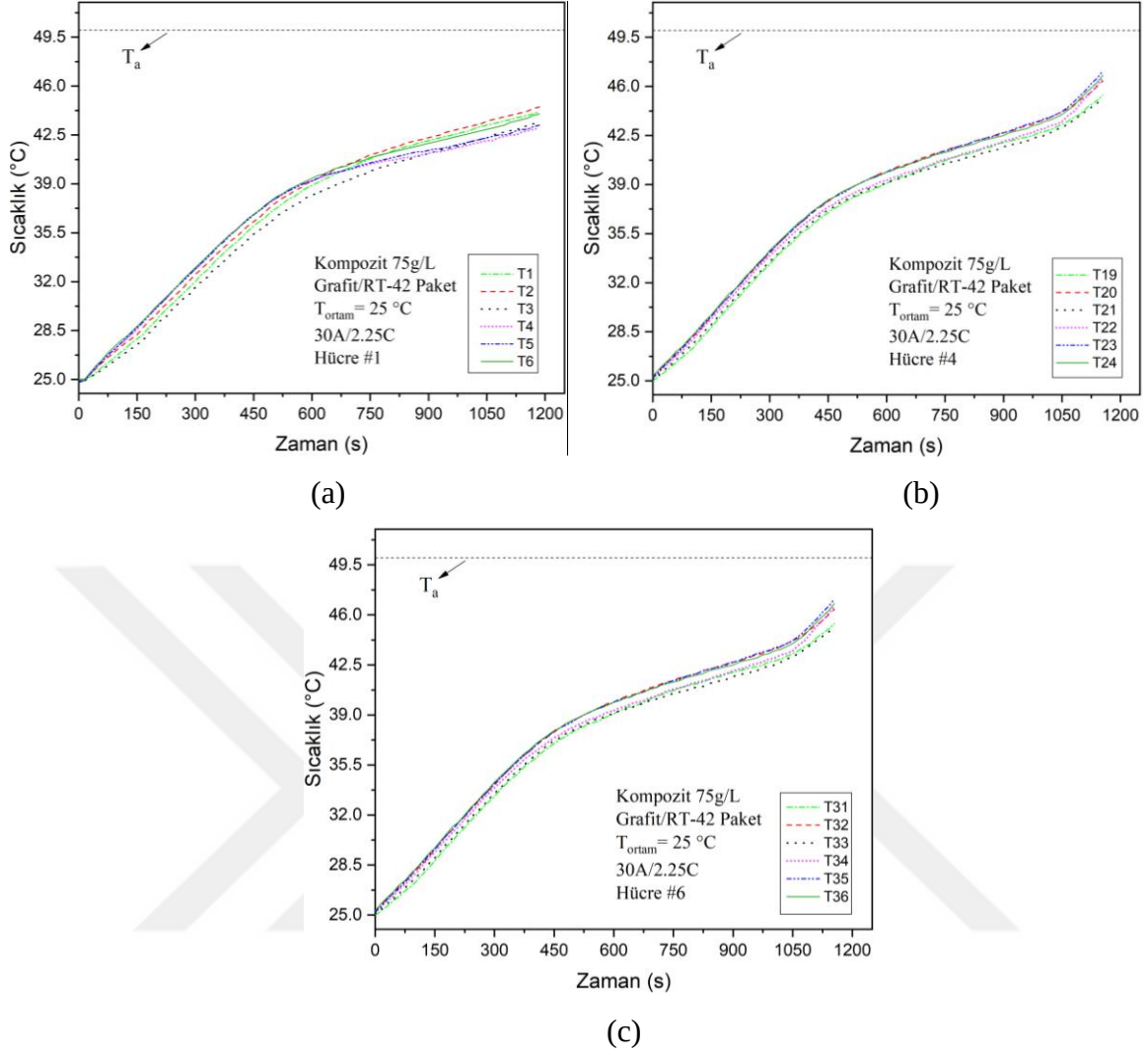
Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 38(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 9,92 Ah ve 192,42 Wh değerlerine ulaşmaktadır. Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi aynı şartlar altında yalın batarya paketi için 6,59 Ah ve 138,1 Wh idi. Bu durum da, deşarj esnasında grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin deşarj kapasitesinin faaliyet süresi ile benzer şekilde yalın batarya paketine göre %50,5 daha fazla olduğu açıktır. Ek olarak, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin enerji

kapasitesinin de yalın batarya paketine kıyasla %39,3 daha fazla olduğu bulunmuştur.



Şekil 38. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1 numaralı hücreye ait sıcaklık değişimi Şekil 39(a)'da sunulmuştur. Sıcaklık eğrisine ait karakteristiğin ise ilk kısım ($t < 500$ s) için sıcaklıkta lineer artış, ikinci kısım içinse artış hızlarının azalması/azalarak ile artan ($t > 500$ s) bir sıcaklık değişimi görülmüştür. Bir numaralı hücre dış ortama en yakın batarya olduğundan dolayı, referans hücreler arasında iç ve dış ölçüm noktalarının sıcaklık farkları diğer hücrelere kıyasla daha belirgindir. Aynı ortam sıcaklığı altında, 13,4 A akım ile gerçekleştirilen test ile mukayese edildiğinde çekilen yüksek akım (30 A) değerinin de bu farkın belirginleşmesinde etkisi büyüktür. Şekil 39(a)'da ayrıca $t < 660$ s'ye kadar batarya iç yüzeyinin dış yüzeyinden daha sıcak seyrettiği 660. s'den sonra ise iç yüzeydeki sıcaklık değişiminin daha az arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, bu saniyeden sonra kompozit matris içerisinde yer alan RT-42 için faz değişiminin (38-43 °C) başlamasının etkisiyle FDM'nin iç yüzeyden daha fazla gizli ısı depolaması ile açıklanabilir. 1 numaralı hücrenin yerel sıcaklık noktaları arasındaki sıcaklık farkı maksimum 1185. s'de 1,5 °C ile maksimum değerine ulaşmıştır. Bu saniyede T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri, sırasıyla 44, 44,4, 43,3, 42,9, 43,1, 43,9 °C'dir.



Şekil 39. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

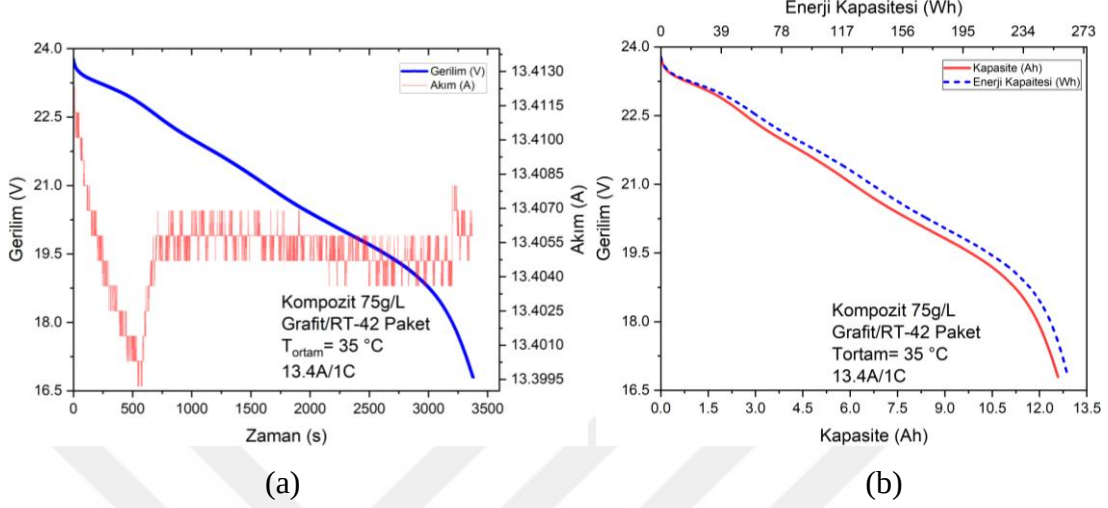
4 ve 6 numaralı hücelere ait yerel nokta sıcaklık karakteristik eğrilerinin 1 numaralı hücreden farklı olarak ilk kısımda ($t < 500\text{ s}$) sıcaklıkta lineer artış, ikinci kısımda artış hızlarının azalması/azalarak ile artan ($500\text{ s} < t < 1080\text{ s}$) sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Son kısımda ($t > 1080\text{ s}$) ise tekrar artan sıcaklık hızlarına sahip bir sıcaklık değişimi görülmüştür. Bu durum, test süresince bu hücrelerin bütün yerel sıcaklık noktalarının hücrelerin konumlarından dolayı 1 numaralı hücreden daha fazla ısınması ve 1080. s'den sonra RT-42'nin faz değişim aralığını ($T > 43\text{ °C}$) aşması ile açıklanabilir. T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} yerel noktaları arası sıcaklık farkları test boyunca maksimum 1,8 °C ile 1185. s'de saptanmıştır. Fakat Şekil 39(b) incelendiğinde, 4 numaralı batarya için maksimum sıcaklık farkının 1080 s'ye kadar 1°C altında olduğu ve RT-42 faz değişim aralığının aşılması

sonucunda bu sıcaklık farkında daha belirgin bir artış olduğu açıktır. Konumu itibari ile paketin orta kısmına yakın olan 6 numaralı batarya en tekdüze sıcaklık davranışı sergilemektedir (Şekil 39(c)) ve test boyunca yerel noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı $1,2^{\circ}\text{C}$ 'dir. Grafit/FDM (RT-42) batarya paketinin 25°C ortam sıcaklığı ve 30A akım altındaki deşarjının sonunda yani 1185. s'de T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} sıcaklıkları sırasıyla, 45, 46, 44,8, 46,1, 46, 46,3 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} sıcaklıkları ise sırasıyla 44,6, 45, 44,8, 44,1, 44,6, 45,1 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. Daha önce gerçekleştirilen deşarj testinde ise, yalın batarya paketinin 4 ve 6 numaralı hücrelerinde maksimum yerel sıcaklık noktası 791 s'de yani test sonunda 59°C 'ye ulaşmıştı. Ayrıca, aynı şartlarda gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde test sonunda batarya yüzeyleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı 790'ıncı s'de $10,57^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştü. Grafit/FDM(RT-42) paketinde ise test sonunda tüm yerel ölçüm noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı $4,1^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. Bu nedenle, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin, yalın batarya paketine kıyasla $+25^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 2,25C deşarj oranı altında sıcaklık düzgünlüğünde %157,8 oranında bir iyileştirme gösterdiğini belirtmek yerinde olacaktır.

3.4.3. Performans Testi, $T_{\text{ortam}} = +35^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4 \text{ A}$ (1 C)

Gerilim (V) ve akım (A) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 40(a)'da verilmiştir. Batarya paketinin sahip olduğu potansiyel farkın, beklenildiği üzere, zamana bağlı olarak azaldığı ve tam olarak 3378 s sonra (16,80 V) değerine ulaştığı görülmektedir. Alt kesme gerilim değerine ulaşıldığı anda deney sonlandırılmıştır. Şekil 40(a) incelendiğinde başlangıç voltaj değerinin 23,79 V olduğu görülmektedir. Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 40(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 12,586 Ah ve 262,795 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Yalın batarya paketi testinde aynı ortam şartları ve akım (A) altında yapılan testlerde başlangıç gerilimi 23,37 V olarak ölçülmüştü. 3315 s sonra batarya paketi 16,80 V değerine ulaştığında deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin sırasıyla 12,346 Ah ve 256,92 Wh olarak bulunmuştu. Buradan yola çıkarak , $+35^{\circ}\text{C}$ 'de ve 13,4A deşarj akımı altında grafit/FDM(RT-42) batarya paketi yalın batarya paketine göre deşarj kapasitesi açısından %1,94, enerji kapasitesi açısından ise %2,29'luk bir iyileşme göstermiştir. Bu fark, batarya paketindeki bataryaların kullanıldığı çevrim sayısı ile alakalıdır. Bir başka deyişle,

grafit/FDM(RT-42) batarya paketinde kullanılan bataryalar daha az döngüye maruz olmasından kaynaklı daha fazla deşarj kapasitesi sunmaktadır.

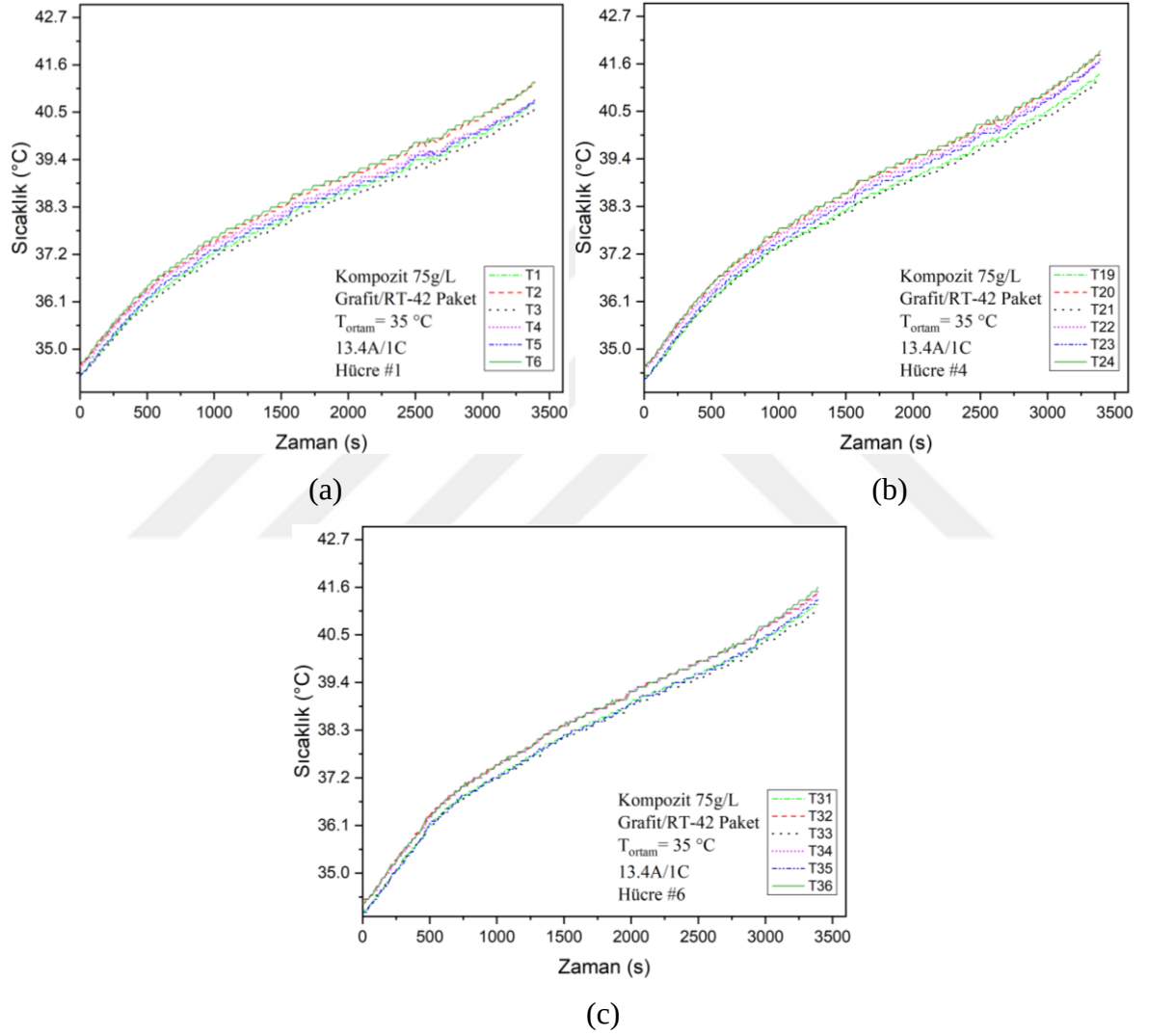


Şekil 40. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1, 4 ve 6 numaralı hücreler için sıcaklık değişimleri Şekil 41’de sunulmuştur. Bu performans testi, sıcaklık eğrilerinin iki farklı kısımdan oluştuğunu ortaya koymaktadır. İlk kısım ($t < 700$ s) sıcaklıkta doğrusal bir artışla karakterize edilirken, ikinci kısım ($700 \text{ s} < t < 3375$ s) yavaşlayan bir sıcaklık artış hızı ile başka bir doğrusal artışı göstermektedir. Bu olgu, 35°C’lik ortam sıcaklığının 37-38°C’deki faz değişim aralığının başlangıcına daha yakın olmasına atfedilebilir ve bu da bu bölgede daha belirgin bir sıcaklık artışına neden olur. Kompozit batarya paketinde, ısı iletme ek olarak, hücre yüzeylerinden gizli ısı depolama aracılığıyla ısının aktif olarak uzaklaştırıldığı ikinci kısımda ise FDM’nin (RT-42) faz değişim aralığının sonuna, yani 43°C’ye kadar uzanan daha düşük sıcaklık artış oranlarıyla başka bir doğrusal sıcaklık artışı görülmüştür.

1 numaralı hücreye ait sıcaklık noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 0.2 - 0.7 °C arasında değişmektedir. 4 numaralı hücre için Şekil 41(b) incelendiğinde test boyunca 1 numaralı hücreye benzer bir maksimum sıcaklık farkı aralığı görülmektedir ve bu aralık benzer şekilde 0.3 - 0.7 °C arasındadır. 6 numaralı hücre yerel sıcaklık noktaları bakımından test boyunca en tekdüze sıcaklık dağılımına sahiptir (Şekil 41(c)). Test boyunca bu yerel sıcaklık noktaları arası maksimum sıcaklık farkı 0.5 °C’dır. Örnek olarak, $t=3375$ s’de T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 sırasıyla, 40,7, 41,1, 40,5, 40,7, 40,7, 41,1 °C iken T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} sırasıyla, 41,3, 41,8, 41,2, 41,6, 41,6, 41,8 °C’dir. T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} ise

sırasıyla, 41,2, 41,4, 41, 41,4, 41,2, 41,5 °C' dir. Başka bir değerlendirme kıstası olarak, 1,4 ve 6 numaralı hücreler için, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi (test sonu maksimum sıcaklık $T_{24}= 41,9$ °C) yalın batarya paketi testi ile (test sonu maksimum sıcaklık $T_{23}= 53,12$ °C) maksimum sıcaklıklar açısından mukayese edilmiştir. Kompozit batarya paketinin maksimum sıcaklıkta %21,12'lik iyileşmeye neden olduğu görülmüştür. Son olarak, her iki testin sonunda 1,4 ve 6 numaralı hücrelerin maksimum sıcaklık farkları karşılaştırılmıştır.



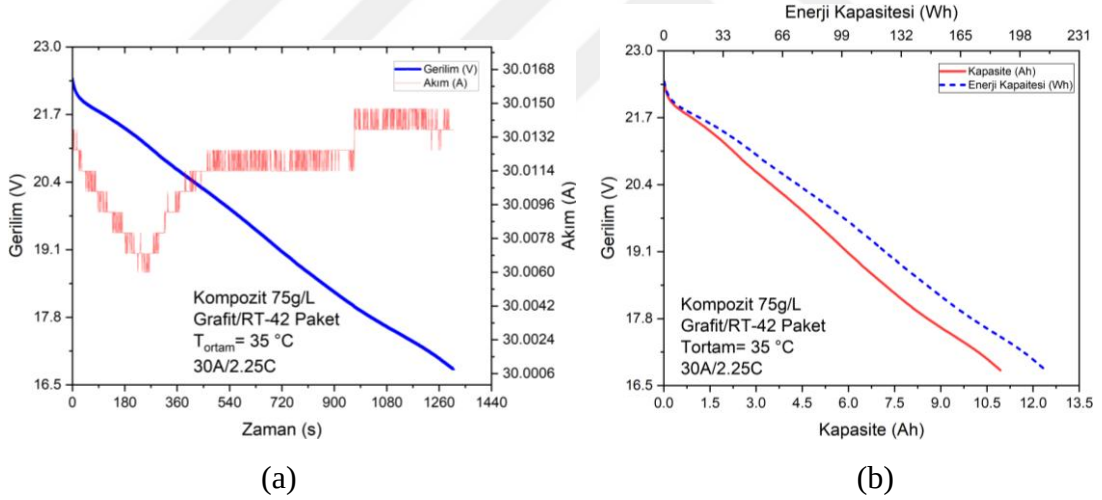
Şekil 41. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Yalın batarya paketi için maksimum sıcaklık farkı 7,42 °C olarak bulunmuştu. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi içinse 41,9 °C (T_{24})- 40, 6 °C (T_3)=1,3 °C'dir. Buradan yola çıkarak, grafit/FDM matrisin düzgün sıcaklık dağılımı açısından %82,5'lik bir iyileşme

sağladığı bulunmuştur.

3.4.4. Performans Testi, $T_{ortam} = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Batarya paketinin $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve yüksek deşarj akım değeri (30A) yükü altındaki performans testine ait sonuçlar Şekil 42(a)'da verilmiştir. Gerilimin zamana bağlı değişimi incelendiğinde başlangıç gerilim değerinin 22,2 V olduğu görülmektedir. Ayrıca, 1309 s sonunda gerilim değeri 16,8 V alt kesme gerilim değerine ulaşması nedeniyle deneysel süreç sonlandırılmıştır. Aynı ortam sıcaklığı ve deşarj akımı altında gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde deney sonunda gerilim değerinin 685 s sonunda 20,272 V değerine ulaştığı, alt kesme gerilim değerine (16,8 V) ulaşmadığı görülmüştü. Bunun nedeni, yalın batarya paketinin limit sıcaklık değerine ($\approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) daha önce ulaşması nedeniyle testin manuel olarak sonlandırılmasıdır. İki batarya paketi karşılaştırıldığında, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi yalın batarya paketine kıyasla aynı akım altında %91,1 oranında daha uzun süre faaliyet göstermiştir.



Şekil 42. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

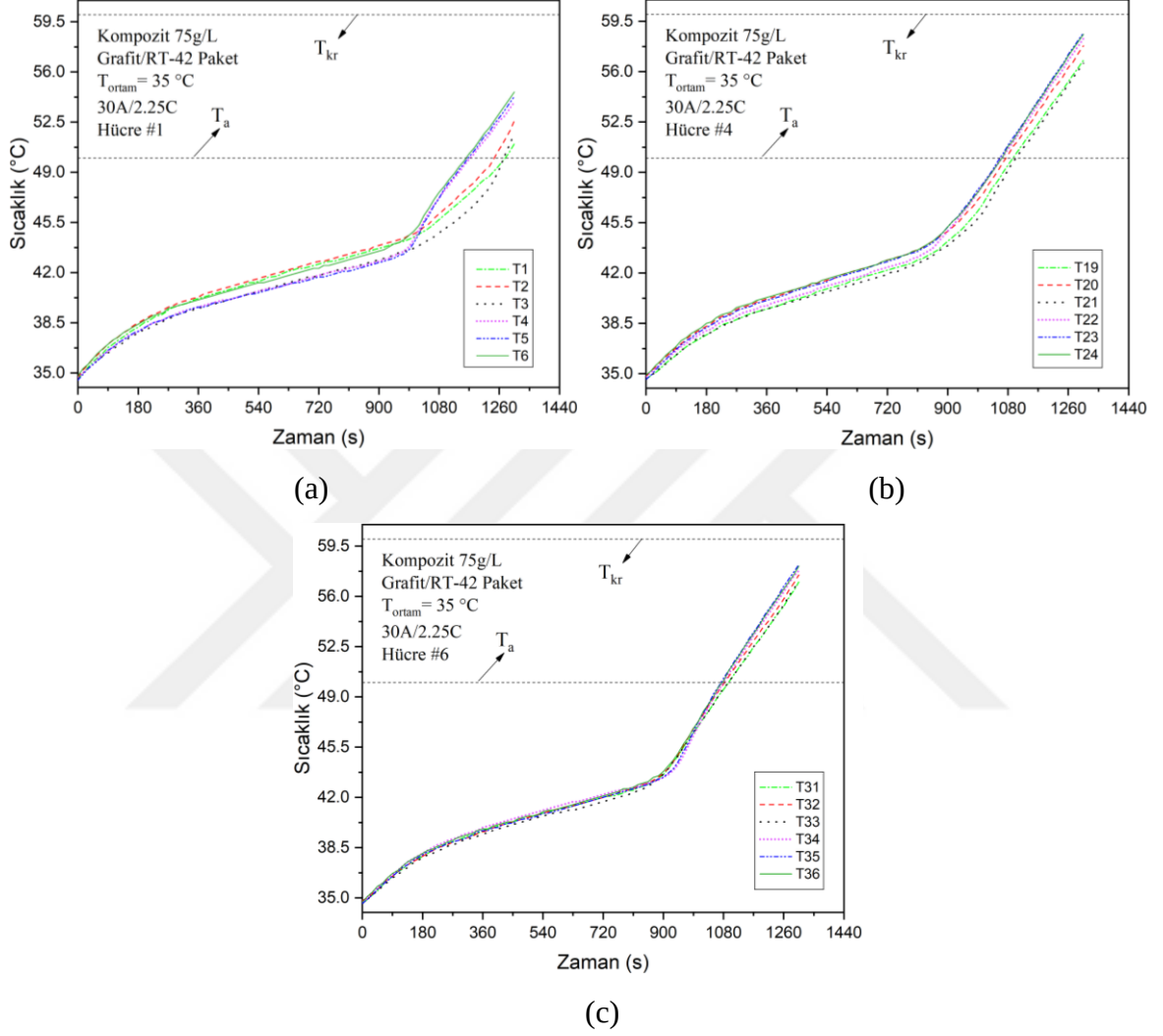
Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 42(b)'de verilmiştir. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi sırasıyla 10,93 Ah ve 212,113 Wh'dir. Aynı koşullar altında, yalın batarya paketinin deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi sırasıyla 5,71 Ah ve 122,12 Wh idi. Buradan, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin deşarj kapasitesinin yalın batarya paketindekinden %91,4 daha yüksek olduğu görülmektedir. Ek olarak, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin

enerji kapasitesinin yalın batarya paketindekinden %73,7 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

1,4 ve 6 numaralı hücrelere ait sıcaklık değişimi Şekil 43'te sunulmuştur. 1 numaralı hücrenin yerel sıcaklık ölçüm değerleri, 4 ve 6 numaralı hücrelere göre daha düşüktür. Bunun başlıca nedeni, hücrenin dış ortama yakın olması ve yüzeyinden iletim yoluyla daha fazla ısı dağılımı olmasıdır. 1 numaralı hücrenin sıcaklık eğrisine ait karakteristiğin ilk kısım ($t < 120$ s) için lineer artış, ikinci kısım içinse artış hızlarının azalmasına dayalı başka bir lineer artış ($120 \text{ s} < t < 975 \text{ s}$) gözlenmiştir. Üçüncü kısım ($t > 975 \text{ s}$) içinse tekrardan artan artış hızlarına sahip olan bir sıcaklık değişimi görülmüştür. 4 ve 6 numaralı hücrelerde farklı zaman aralıklarında benzer davranışlar sergilemişlerdir. Bu davranış, $t < 200 \text{ s}$ için lineer artış, $200 \text{ s} < t < 900$ için azalan sıcaklık artış hızlarına sahip lineer artış ve $t > 900 \text{ s}$ içinse tekrardan artan sıcaklık artış hızlarına sahip bir lineer artış olarak gözlenmiştir. Her üç hücre için de yerel sıcaklık noktalarındaki sıcaklığın RT-42'in faz değişim başlangıcı olan 37-38 °C aralığına kadar artarak yükseldiği ve faz değişim aralığı olan 38-43 °C arasında FDM'nin hem duyulur hem de gizli ısı depolama kabiliyetinden dolayı sıcaklık artış hızının azaldığı görülmüştür. Son kısımda ise, sıcaklığın 43 °C üzerine çıkması sonucu FDM'nin gizli ısı depolama özelliğinden yararlanamamasına bağlı olarak tekrar artarak artan bir sıcaklık trendi meydana gelmiştir. Şekil 43(a)'da 1 numaralı hücrenin için iç yüzey sıcaklıkları 37-43 °C arasında dış yüzey sıcaklık değerlerine yakın seyretmektedir. Sıcaklığın 43 °C üzerine çıkmasıyla yani faz değişim aralığının aşılmasıyla iç yüzey sıcaklıklarındaki değişim dış ortamdan uzak olunması ve faz değişim aralığının aşılması nedeniyle grafit/FDM(RT-42) kompozit matrisin iç yüzeylerden yeterli miktarda ısı uzaklaştıramamasına bağlı olarak dış yüzey sıcaklıklarına göre daha belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Dolayısıyla, iç ortam yerel sıcaklık noktaları dış ortam sıcaklıklarından daha yüksek değerlere ulaşmışlardır.

En düzgün sıcaklık dağılımı 6 numaralı hücre için tespit edilmiş olup, test boyunca yerel noktalar arasındaki sıcaklık farklarının oldukça az olduğu Şekil 43(c)'den anlaşılabilmektedir. 1 ve 4 numaralı hücreler kıyaslandığında ise 4 numaralı hücrenin yerel sıcaklık noktaları arası sıcaklık farklarının 1 numaralı hücreye kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Test sonuna doğru her üç hücrede de yerel noktalar arası sıcaklık farkının daha da arttığı görülmektedir. Test sonuna yaklaşırken $t=1305$ 'inci s'de T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri sırasıyla 50,4, 51,8, 50,9, 53,4, 53,8, 54,1 °C'dir. $T_{20}, T_{21}, T_{22}, T_{23}$ ve T_{24} için sıcaklık değerleri ise sırasıyla 56,3, 57,3, 56,1, 57,8, 58,2, 58,1 °C'dir. Son olarak, $T_{31}, T_{32}, T_{33}, T_{34}, T_{35}$ ve T_{36} değerleri ise 56,4, 56,9, 56,5, 57,4, 57,7, 57,5 °C'dir. Daha önce gerçekleştirilen yalın batarya paketinde, test sonunda 1,4 ve 6 numaralı hücrelerin sıcaklık

noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı $9,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, süre bakımından yalın batarya paketi testinden %91 oranında daha uzun olan bu performans testinde maksimum sıcaklık farkı $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.



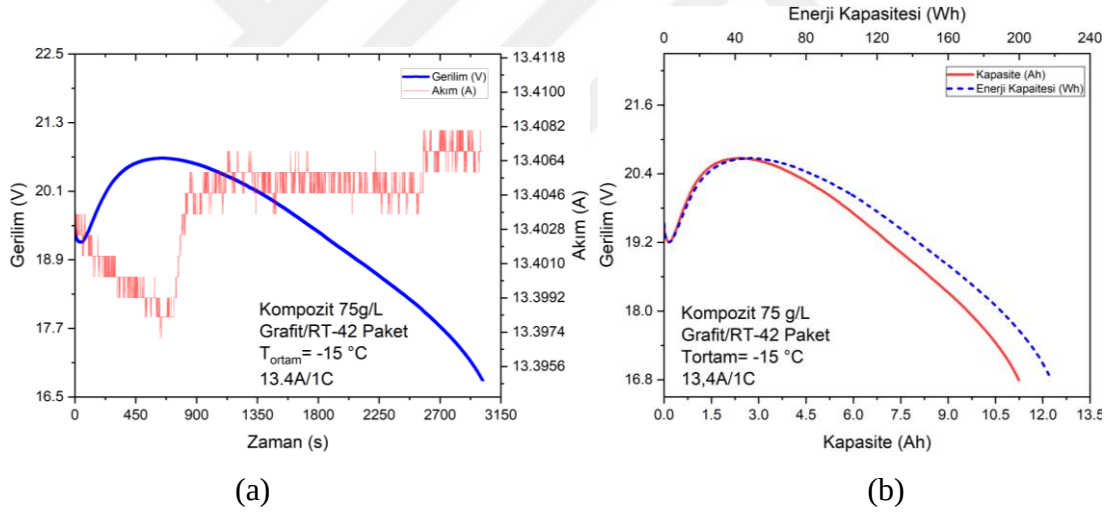
Şekil 43. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.4.5. Performans Testi, $T_{\text{ortam}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

Batarya paketinin $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 1C deşarj akım değeri (13,4A) yükü altında sergilediği elektriksel performansa ait eğriler Şekil 44(a)'da verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde, ilk periyotta, yüksek iç direnç sebebiyle gerilim değerinin hızla düştüğü ($19,2\text{ V}$) görülmektedir. İlerleyen periyotta, batarya paketinden güç çekilmesiyle hücrelerin ısınmasına bağlı olarak gerilim değerinin arttığı ($20,67\text{ V}$) olduğu

görülmektedir. Sonraki periyotta ise, $T > 0$ °C durumlarına benzer olarak gerilim değerinin sürekli olarak azalarak alt kesme gerilim değerine (16,8V) ulaşmaktadır ($t=3017$ s). DC yük ünitesi ile akım değerinin ise 13,4 A olarak uygulandığı görülmektedir.

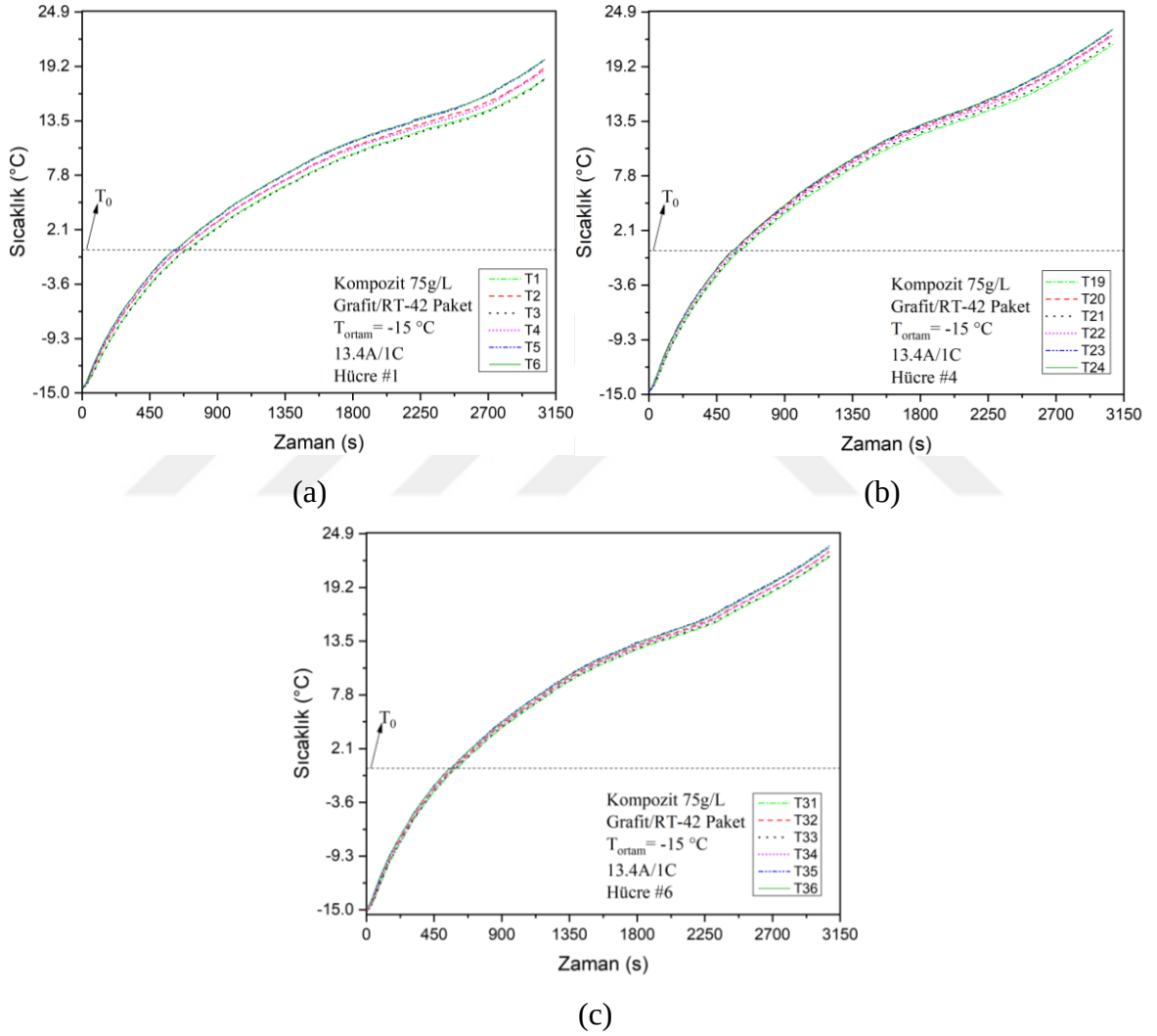
Deşarj ve enerji kapasitesi değerlerinin değişimi Şekil 44(b)'de sunulmuştur. Deşarj sürecinin tamamlanması ($T_{ortam} = -15$ °C - 13,4 A/1C) ile ulaşılan deşarj ve enerji kapasitesi değerleri grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 11,241 Ah ve 218,17 Wh şeklindedir. Aynı performans testi altında 2791 s sonunda yalın paket için, bu değerler 10,389 Ah ve 206,52 Wh şeklindeydi. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin 17,535 V değerindeki kapasite ve enerji kapasitesi değerlerine bakılacak olursa, 10,384 Ah ve 203,44 Wh olduğu tespit edilir. Dolayısıyla, aynı gerilim değerinde batarya paketleri için kapasite ve açısından fark yokken enerji kapasitesi açısından %1,5'lik bir fark mevcuttur. Ayrıca, $T < 0$ °C çalışma sıcaklığı koşullarının batarya performansını ciddi bir şekilde sınırladığı görülmektedir.



Şekil 44. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

Güvenilir çalışma süreleri içerisinde -15 °C ve 13,4A/1 C için ulaşılan maksimum hücre yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 23 °C şeklindedir (Şekil 45(c)). Bu değer, yalın batarya paketi testinde 19 °C bulunmuştu. Bu test özelindeki sıcaklık artışının nedeni grafit/FDM matrisin dış ortamla hücre yüzeyleri arasında bir yalıtım oluşturması olarak açıklanabilir. Şekil 45(a) incelendiğinde 1 numaralı hücrenin dış ortama yakın olması nedeniyle 4 ve 6 numaralı hücrelerden daha düşük bir maksimum sıcaklığa sahip olduğu ve bu değer 18,8 °C'de kaldığı görülmüştür. Örnek olarak, 3015. s'de T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık

değerleri sırasıyla 16,8, 17,8, 16,7, 17,7, 18,7, 18,8 °C'dir. T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} için sıcaklık değerleri ise sırasıyla 20,4, 21,5, 20,7, 21,4, 21,9, 22°C'dir. Son olarak, T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} değerleri ise 21,3, 21,8, 21,3, 21, 22,4, 22,3 °C'dir. Ayrıca, yalnız batarya paketinde 1,4 ve 6 numaralı hücrelerin sıcaklık noktaları arasında test sonunda 12,3 °C sıcaklık farkı saptanırken, bu fark grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için 5,7 °C'dir. Buna dayanarak, yalnız batarya paketine kıyasla grafit/FDM batarya paketinin eşit sıcaklık dağılımı açısından %53,6'lık bir iyileşme sağladığı söylenebilir.



Şekil 45. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.5. Kompozit Grafit/FDM(RT-35) Batarya Paketi Performans Testleri

Bu bölüm, her biri 75 g/L yığın yoğunluğuna sahip kompozit grafit/FDM (RT-35) matrislerden oluşan bir batarya paketinin elektriksel ve ısı performansının değerlendirilmesini araştırmaktadır. Değerlendirmeler üç farklı ortam sıcaklığı koşulunda gerçekleştirilmiştir: -15 °C, 25 °C ve 35 °C. Ayrıca, batarya paketi 13,4 A ve 30 A olmak üzere iki farklı çalışma yükü altında test edilmiştir. Tez, farklı yığın yoğunluklarına (50 g/L ve 100 g/L) sahip RT-35 içeren kompozit grafit/FDM matrislerden oluşan batarya paketi üzerinde de testler içermesine rağmen, bu testlerin elektriksel ve ısı performansları daha öncede belirtildiği üzere kullanılan FDM türünden önemli ölçüde etkilenmektedir. Esasen, yığın yoğunluğundaki değişiklikler benzer özellikler gösterir ve yalnızca performans seviyesini artırmaya veya azaltmaya yarar. Bu nedenle, anlatımda sadelik adına tek bir yığın yoğunluğu (75 g/L) seçilmiş ve bu yoğunluğa ait elektriksel ve ısı performans verileri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

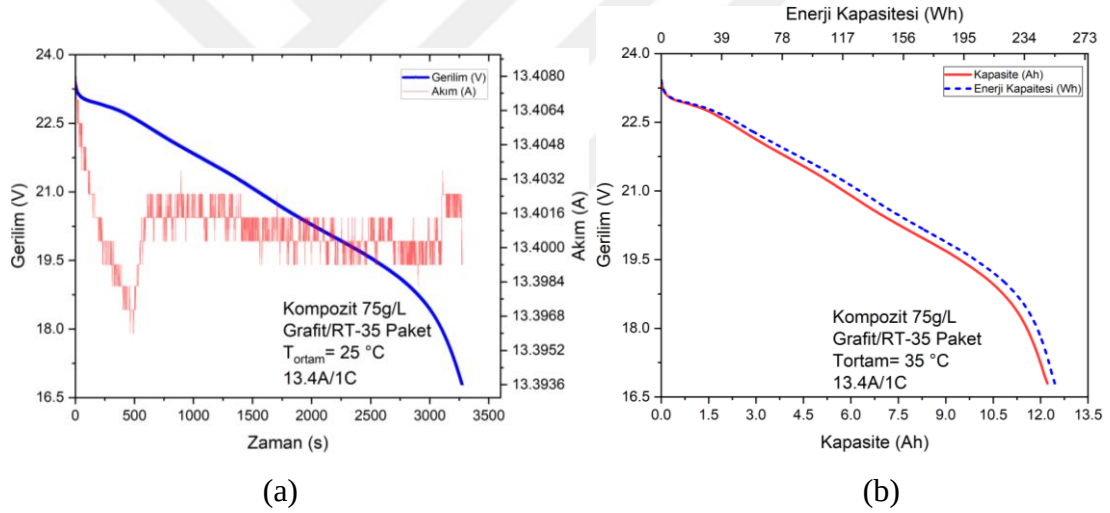
Sonraki bölümde, 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarında RT-35 FDM içeren batarya paketlerinin performans verileri, aynı yığın yoğunluklarına sahip kompozit grafit/FDM(RT-42) batarya paketi ve yalın batarya paketinin verileriyle karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmaya ilişkin ayrıntılı analizler kapsamlı ve karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur. Performans testlerinin sonuçları, hem FDM tipleri hem de farklı yığın yoğunlukları için kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

3.5.1. Performans Testi, Tortam = +25 °C ve I = 13,4 A (1 C)

Gerilim (V) ve akım (A) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 46(a)'da verilmiştir. Şekil 46(a) incelendiğinde grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin başlangıç voltaj değerinin 23,42 V olduğu zamana bağlı olarak azaldığı ve tam olarak 3275 s sonra alt kesme gerilim (16,8 V) değerine ulaştığı görülmektedir. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için başlangıç gerilim değeri 23,52 V olarak bulunmuştu ve test 3318 s sonunda alt kesme gerilim değeri olan 16,8 V'ye ulaşmıştı. Ayrıca, yalın batarya paketi testi için aynı ortam şartları ve akım (A) altında yapılan testlerde başlangıç geriliminin 23,37 V olduğu ve zamanla azalarak 3261 s sonunda 16,81 V alt kesme gerilim değerine ulaştığı görülmüştü.

Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 46(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesinin ve enerji

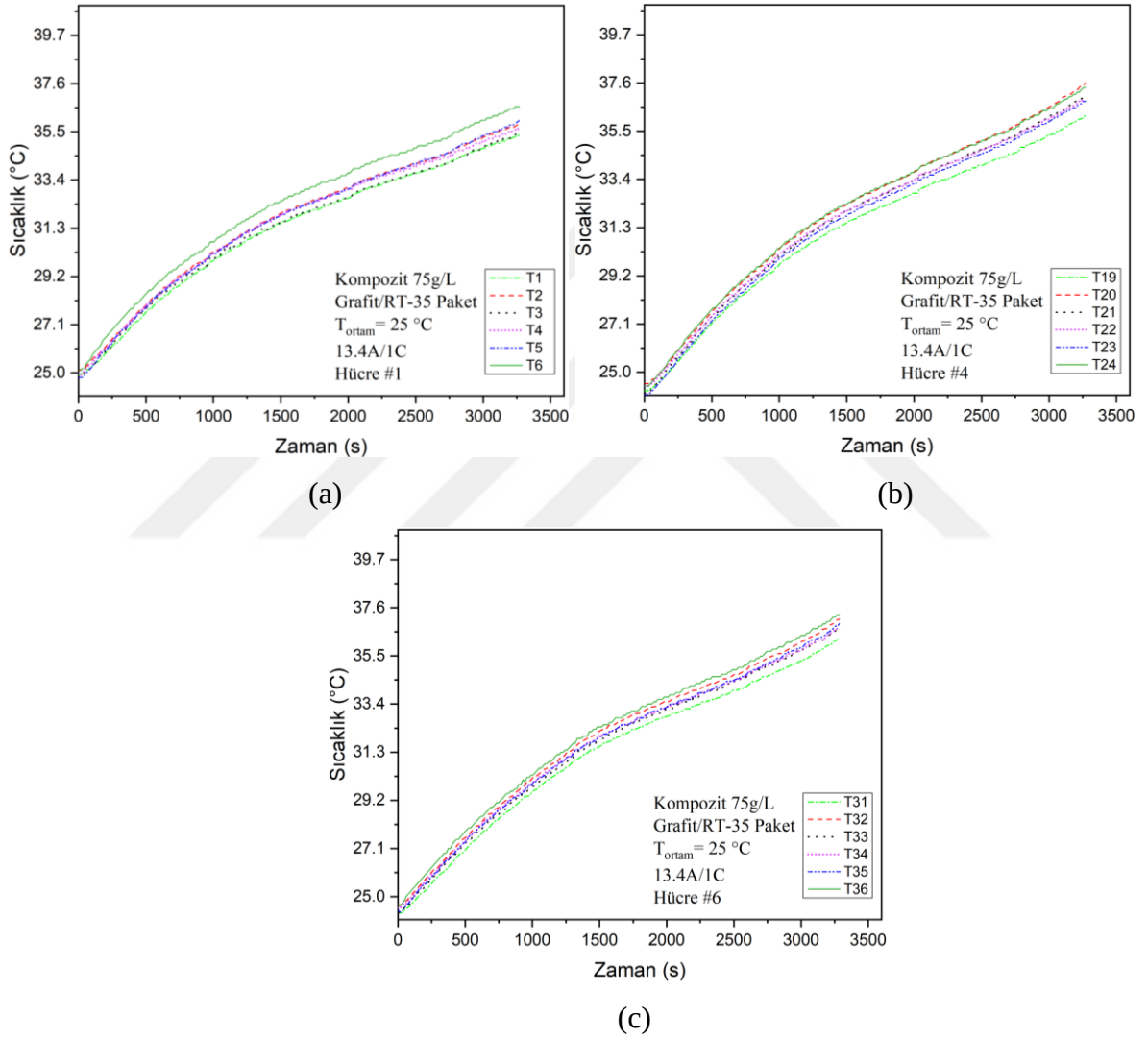
kapasitesinin grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için, sırasıyla, 12,215 Ah ve 253,58 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi ile $T_{ortam}=25$ (13,4 A/1C) koşulunda kullanılabilir maksimum deşarj kapasitesine (13,4 mAh) kıyasla % 8,84'lık bir fark/kayıp olduğu görülmektedir. Daha önce açıklandığı gibi bu durum seçilen alt ve üst kesme gerilim değerleri ile ve batarya paketinin belirli sayıda çevrime maruz kalması sonucunda kapasitedeki azalma ile açıklanabilir. Aynı ortam şartları ve aynı akım değeri için yapılan testte grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerleri sırasıyla, 12,36 Ah ve 256,35 Wh olarak bulunmuştu. Yalın batarya paketi için gerçekleştirilen deşarj işlemi sonunda ise deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin sırasıyla 12,166 Ah ve 254,544 Wh bulunmuştu. Dolayısıyla, her üç durum için deşarj kapasiteleri birbirine oldukça yakın olup, deşarj kapasiteleri arasındaki farklar %1,5 civarındadır. Enerji kapasiteleri içinse bu fark yaklaşık olarak %1'dir.



Şekil 46. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25°C , 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1 numaralı hücreye ait sıcaklık değişimi Şekil 47(a)'da sunulmuştur. Genel karakter olarak, ilk etapta 660 s'ye kadar lineer sıcaklık artışı, , ikinci etapta ($t > 660$ s) azalarak artan sıcaklık artışı görülmüştür. Şekil 47(a) incelendiğinde, 1 numaralı hücrenin iç yüzeyinin en altında yer alan yerel sıcaklık noktasının (T_6) en sıcak noktası olduğu ve 3270. s'de T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri, sırasıyla 35,4, 35,9, 35,4, 35,7, 36, 36,6 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. 4 ve 6 numaralı hücreler içinse ilk etapta 975 s 'ye kadar lineer sıcaklık artışı, , ikinci etapta ($t > 975$ s) azalarak artan sıcaklık artışı görülmüştür. 4 ve 6 numaralı hücreler için 3270. s'de T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} sıcaklık değerleri, sırasıyla 36,2, 37,6, 37,1, 36,9, 36,8, 37,4

°C'dir. T_{32} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} sıcaklık değerleri ise sırasıyla 36,2, 37,1, 36,6, 36,7, 36,8, 37,3 °C'dir. Bu test için, grafit/FDM(RT-35) matrisin içerisinde bulunan RT-35'in 32 °C - 38 °C arasında faz değiştirdiği ve bu sıcaklık aralığı dışında ısı depolama kapasitesinin daha az olduğu unutulmamalıdır. Şekil 47(a), 47(b) ve 47(c)' de de sıcaklığın test süresinin büyük bir kısmı boyunca faz değişim sıcaklık aralığında kaldığı ve bu aralık aşılmadan testin son bulduğu görülmektedir.



Şekil 47. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Test boyunca her üç hücrenin tüm yerel sıcaklık noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 2,2 °C olarak ölçülmüştür. Daha önce aynı şartlarda gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde batarya yüzeyleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı 7,97 °C

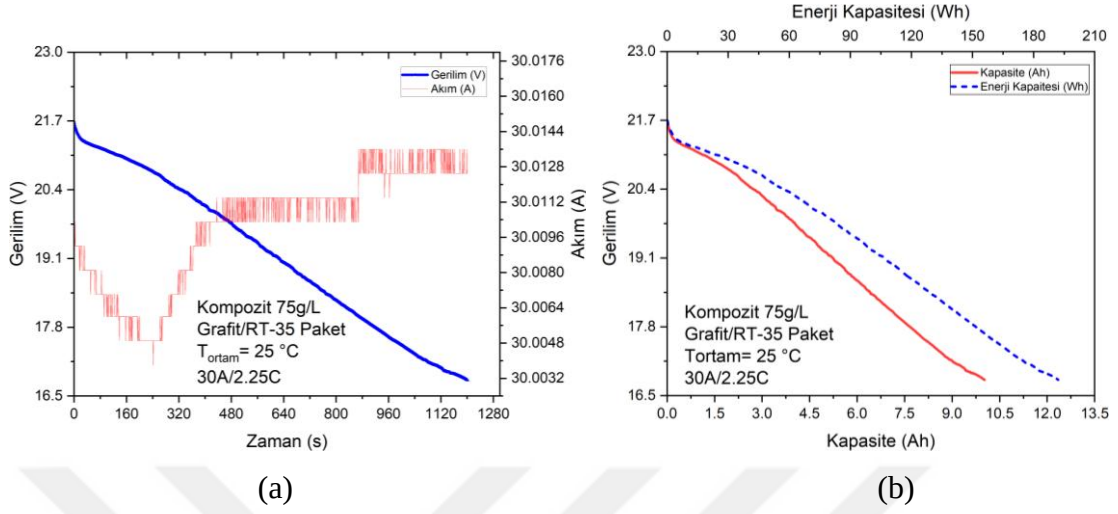
olarak ve grafit/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değer $1,6^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştü. Üç batarya paketi kıyaslandığında, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin sıcaklıkta düzgünlük açısından yalın batarya paketine göre %78,7'lik ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin ise yalın batarya paketine kıyasla %72,4'lük bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. 25°C dış ortam ve 13,4 A deşarj akımı için grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin maksimum yerel sıcaklık değerinin $37,6^{\circ}\text{C}$ olduğu bulunmuştur. Bu değer daha önce aynı şartlar altında gerçekleştirilen testlerde grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için $39,5^{\circ}\text{C}$ ve yalın batarya paketi için yaklaşık olarak 46°C olarak bulunmuştu. Dolayısıyla, grafit/FDM(RT-35) batarya paketi yalın batarya paketine göre maksimum yerel sıcaklık açısından yaklaşık %18,3'lük ve grafit/FDM(RT-42) batarya paketine kıyasla ise %4,8'lik bir iyileşme sağlamıştır.

3.5.2. Performans Testi, $T_{\text{ortam}} = +25^{\circ}\text{C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Batarya paketinin $+25^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve yüksek deşarj akım değeri (30A) yükü altındaki performans testine ait sonuçlar Şekil 48(a)'de verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde başlangıç gerilim değerinin 21,7 V olduğu ve 1200 s sonunda 16,8 V değerine ulaştığı anda testin durdurulduğu görülmektedir. Aynı ortam sıcaklığı ve deşarj akımı altında gerçekleştirilen grafit/FDM(RT-42) batarya paketi testinde deney sonunda gerilim değeri 1189 s sonunda 16,8 V değerine ulaşmıştı. Yalın batarya paketi testinde ise 791 s sonunda gerilim 19,725 V değerinde iken yerel sıcaklık noktalarından birisinin sıcaklığı $\approx 60^{\circ}\text{C}$ limit sıcaklığına ulaşmasından dolayı test durdurulmuştu. Bu ortam şartları için yalın, grafit/FDM(RT-35) ve grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri karşılaştırıldığında, grafit/FDM(RT-35) ve grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerinin yalın batarya paketine kıyasla sırasıyla %51,7 ve %50,3 oranında daha uzun süre faaliyet gösterdiği görülmüştür.

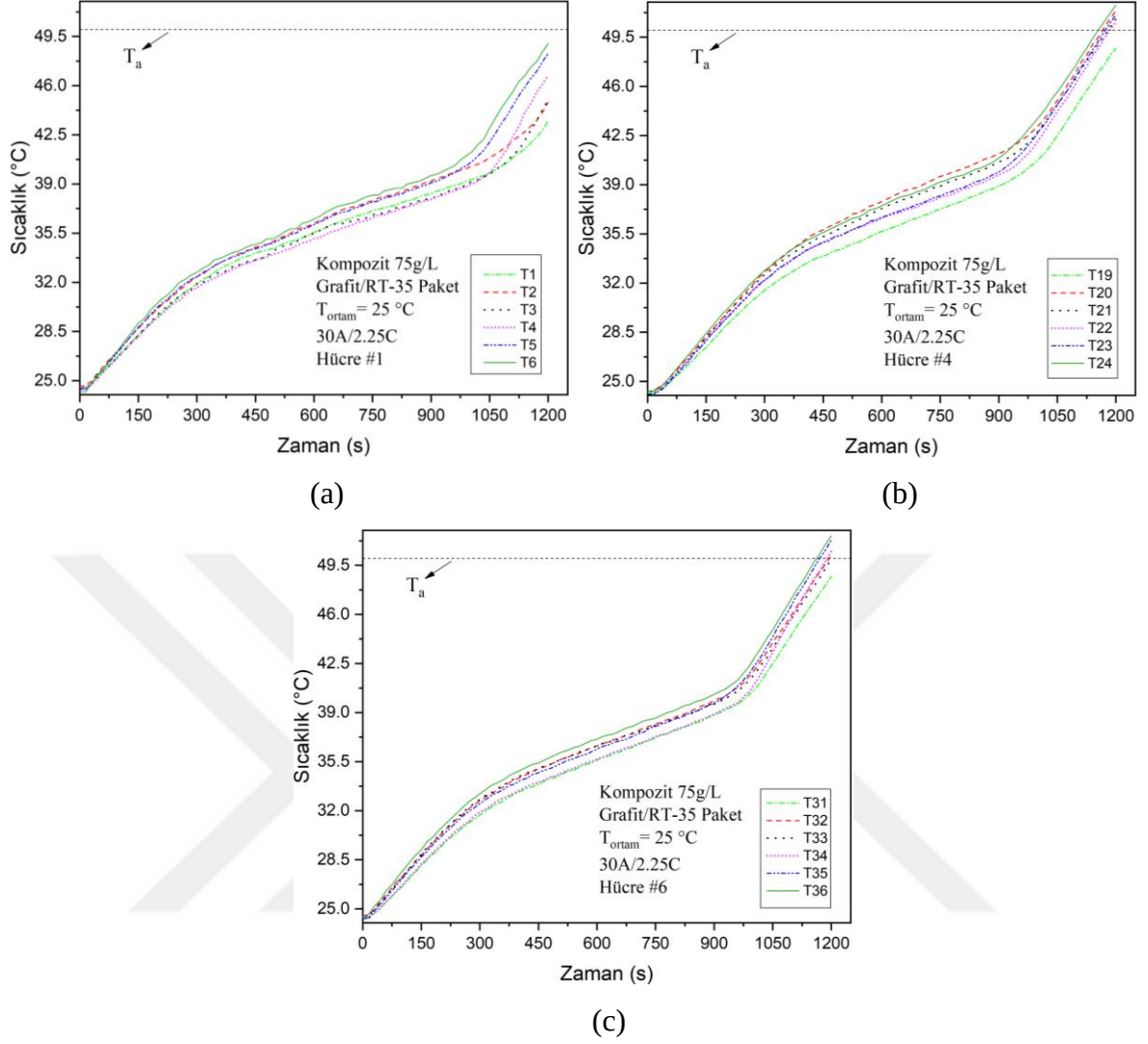
Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 48(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için, sırasıyla, 10,02 Ah ve 192,17 Wh değerlerine ulaşmaktadır. Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi aynı şartlar altında yalın batarya paketi için 6,59 Ah ve 138,1 Wh, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için ise sırasıyla, 9,92 Ah ve 192,42 Wh değerindeydiler. Bu durum da, grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin grafit/FDM(RT-42) batarya paketi ile benzerlik göstermekte olduğu söylenebilir. Ek olarak, grafit/FDM(RT-35) yalın batarya paketine göre

deşarj kapasitesi açısından %52 ve enerji kapasitesi açısından ise %39,2'lik bir iyileşme göstermiştir.



Şekil 48. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1 numaralı hücreye ait sıcaklık değişimi Şekil 49(a)'da sunulmuştur. Sıcaklık eğrisine ait karakteristiğin ise ilk kısım ($t < 275$ s) için sıcaklıkta lineer artış, ikinci kısım için artış hızlarının azalması/azalarak ile artan ($275 \text{ s} < t < 1005$ s) bir sıcaklık değişimi, üçüncü kısımda ise artış hızlarının tekrar artması ile artan ($1005 \text{ s} < t < 1200$ s) bir sıcaklık artışı görülmektedir. Bu karakteristik incelendiğinde ilk kısmın 25-32 °C arasında olduğu ve sıcaklık artış hızının daha fazla olduğu, ikinci kısımda ise RT-35 için faz değişim (32-38 °C) aralığına girildiğinden azalarak artan bir sıcaklık artışı bulunmuştur. Üçüncü kısımda RT-35'in faz değişimin sona ermesi ve buna bağlı olarak FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinden yararlanamamaktan dolayı bütün yerel sıcaklık noktaları için 39 °C ve 40 °C'lerden sonra tekrar artarak yükselen bir sıcaklık değişimi saptanmıştır. Referans hücreler arasında iç ve dış ölçüm noktalarının sıcaklık farkları 1 numaralı hücrede diğer hücrelere kıyasla daha belirgindir. Bunun nedeni, 1 numaralı hücrenin dış yüzeyinin dış ortama oldukça yakın olmasıdır. Test boyunca 1 numaralı hücrenin ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı maksimum 5,8 °C olup 1200. s' de bu değere ulaşmıştır. Bu saniyede T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri, sırasıyla 42,8, 44,1, 44,3, 46,1, 47,7, 48,6 °C'dir.



Şekil 49. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (25 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Şekil 49(b) ve 49(c)'deki 4 ve 6 numaralı hücelere ait yerel nokta sıcaklık karakteristik eğrileri 1 numaralı hücre ile benzerlik göstermesine rağmen yerel sıcaklık değerleri test boyunca daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Bunun nedeni, bu hücrelerin paketin daha iç kısımlarında kalması ve test süresince yüzeylerinden atılan ısının 1 numaralı hücreye kıyasla daha düşük seviyelerde kalmasıdır. 4 ve 6 numaralı hücrelerin sıcaklık eğrileri incelendiğinde, ilk kısımda ($t < 300$ s) sıcaklıkta lineer artış, ikinci kısımda artış hızlarının azalması/azalarak ile artan ($300 \text{ s} < t < 960$ s) sıcaklık değişimi, üçüncü kısımda ise artış hızlarının tekrar artması ile yükselen ($960 < t < 1200$ s) bir sıcaklık artışı görülmektedir. 960. s'den test sonuna kadar gerçekleşen yükselen sıcaklık artışı, bu aralıkta RT-35'in faz değişim aralığının aşılmasıdır. T₁₉, T₂₀, T₂₁, T₂₂, T₂₃ ve T₂₄ yerel noktaları arası

sıcaklık farkları test boyunca maksimum 3 °C ile 1200. s'de saptanmıştır. Konumu itibari ile paketin orta kısmına yakın olan 6 numaralı hücre en tekdüze davranışı sergilemektedir ve test boyunca yerel noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 2,9° C'dir. Grafit/FDM (RT-35) batarya paketinin 25 °C ortam sıcaklığı ve 30 A akım altındaki deşarjının sonunda yani 1200. s'de T_{19} , T_{20} , T_{21} , T_{22} , T_{23} ve T_{24} sıcaklıkları sırasıyla, 48,2, 50,8, 50,2, 50, 50,5, 51,2 °C'dir. T_{31} , T_{32} , T_{33} , T_{34} , T_{35} ve T_{36} sıcaklıkları ise sırasıyla 48,1, 49,6, 49,3, 49,8, 50,6, 51 °C'dir.

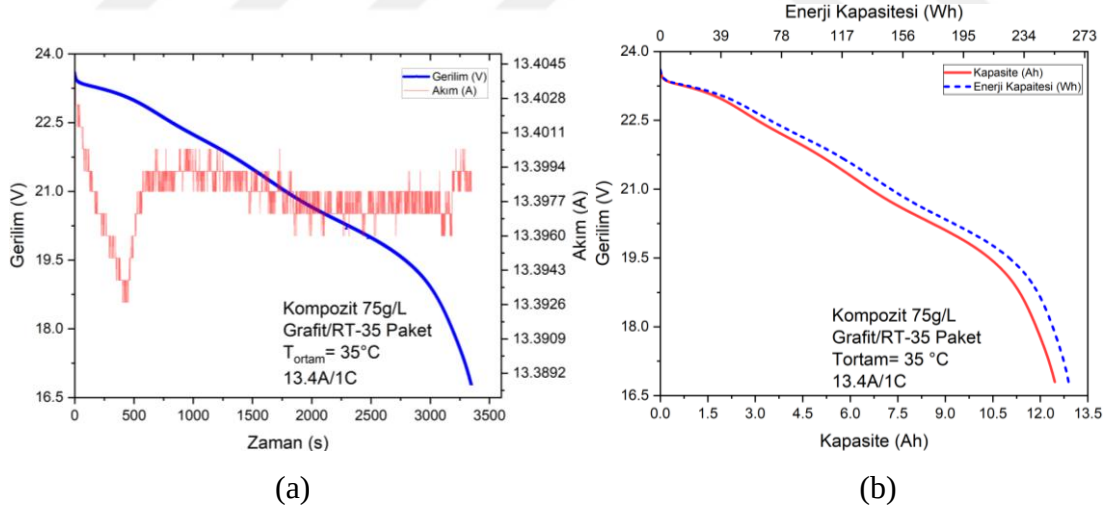
Daha önce gerçekleştirilen deşarj testinde ise, yalın batarya paketi için maksimum yerel sıcaklık noktası 791 s' de yani test sonunda 59 °C'ye ulaşmıştı ve maksimum sıcaklık farkı 10,57 °C olarak ölçülmüştü. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketinde ise test sonunda tüm yerel ölçüm noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 4,1 °C ve maksimum sıcaklık değeri 46,3 °C olarak ölçülmüştü. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için maksimum sıcaklık 51,2 °C iken maksimum sıcaklık farkı ise 8,4 °C'dir. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi yalın batarya paketi ile karşılaştırıldığında, sıcaklık düzgünlüğünde %61,2'lik bir iyileştirme ve maksimum sıcaklıkta %21,6'lık bir azalma görüldü. Benzer şekilde, grafit/FDM(RT-35) batarya paketi yalın batarya paketi ile karşılaştırıldığında sıcaklık düzgünlüğünde %20,5'lik bir iyileştirme ve maksimum sıcaklıkta %13,2'lik bir azalma gösterdi. Ek olarak, grafit/FDM(RT-35) batarya paketi grafit/FDM(RT-42) batarya paketi ile karşılaştırıldığında, grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin %51,2 daha yüksek maksimum sıcaklık farkına ve %10,6 daha yüksek maksimum sıcaklığa sahipti. Bu sonuç, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin hem sıcaklık düzgünlüğü hem de maksimum sıcaklık kontrolü açısından daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

3.5.3. Performans Testi, $T_{ortam} = +35\text{ °C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için gerilim (V) ve akım (A) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 50(a)'da verilmiştir. 23,60 V olan başlangıç voltaj değerinin zamanla azalarak 3347 s sonra (16,80 V) değerine ulaştığı görülmektedir. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin başlangıç gerilimi 23,79 V olup, test 3378 s sonunda 16,8 V alt kesme gerilim değerine ulaşmıştı. Yalın batarya paketi testinde ise aynı ortam şartları ve akım (A) altında yapılan testlerde başlangıç gerilimi 23,3705 V olarak ölçülmüştü. Deşarj işlemi 3315 s sonra batarya paketi 16,80 V değerine ulaşmıştı.

Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 50(b)'de verilmiştir. Deşarj sürecinin tamamlanması ile deşarj kapasitesinin ve enerji kapasitesinin Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için, sırasıyla, 12,456 Ah ve 262,6 Wh değerlerine ulaştığı görülmektedir. Aynı ortam şartları ve akım (A) altında yapılan testlerde deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 12,586 Ah ve 262,795 Wh olarak, yalın batarya paketi için ise sırasıyla 12,346 Ah ve 256,921 Wh olarak bulunmuştu.

Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi en iyi performansı gösterirken, bu değerler grafit/FDM(RT-35) batarya paketine göre sırasıyla yaklaşık %0,93, %1,0 ve %0,05 daha yüksektir. Yalın batarya paketi ise 3315 s çalışma süresi, 12,346 Ah deşarj kapasitesi ve 256,921 Wh enerji kapasitesi ile en düşük performansa sahiptir. Grafit/FDM(RT-42), yalın batarya paketine kıyasla çalışma süresinde %1,89, deşarj kapasitesinde %1,89 ve enerji kapasitesinde %2,26 daha iyi sonuçlar sunarken; grafit/FDM(RT-35) de yalın batarya paketine göre sırasıyla %0,96, %0,89 ve %2,21 daha yüksek performans göstermiştir. Bu karşılaştırma, performans açısından grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin yalın batarya paketine göre daha üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

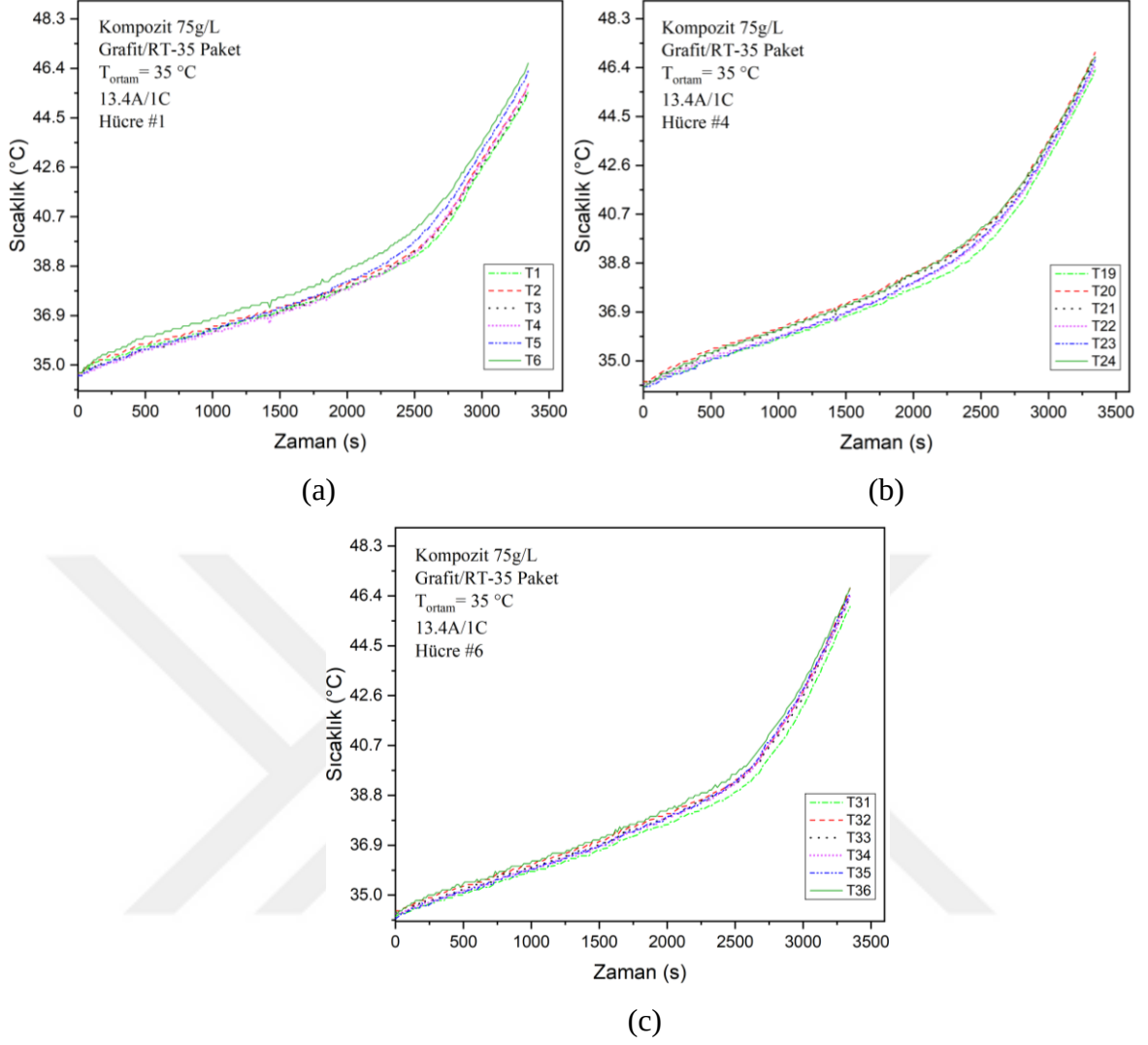


Şekil 50. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1, 4 ve 6 numaralı hücrelere ait sıcaklık değişimi Şekil 51(a), 51(b) ve 51(c)'de sunulmuştur. Her üç şekil için de sıcaklık eğrilerine ait karakteristik iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım ($t < 2280$ s) için lineer artış, ikinci kısım içinse yükselen sıcaklık artış hızları ($2280 \text{ s} < t < 3345 \text{ s}$) gözlenmiştir. Aynı şartlar altında grafit/FDM(RT-42) için

yapılan testlerde ilk kısımda ki artış hızları yüksek iken, ikinci kısımda bu hızların azaldığı görülmüştü. Grafit/FDM(RT-35) testinde bu karakteristiğin elde edilme nedeni RT-35'in faz değişiminin 32-38 °C arasında gerçekleşmesi ve ortam sıcaklığı olan 35 °C' ninde hâlihazırda bu aralıkta bulunmasıdır. Dolayısıyla, faz değişim aralığı aşılanaya kadar FDM' nin yüksek ısı depolama kapasitesi nedeniyle sıcaklıklar lineer seyretmiş, bu aralık aşıldıktan sonra ise sıcaklık artış hızlarında keskin yükselişler meydana gelmiştir. 1 numaralı hücrenin sıcaklık noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 1.3 °C'dir. 4 numaralı hücrenin sıcaklık eğrisi incelendiğinde ise sıcaklık farkı 0,7 °C'dir. 6 numaralı hücre yerel sıcaklık noktaları bakımından test boyunca en tekdüze sıcaklık dağılımına sahip olmasına rağmen yerel sıcaklık noktaları arası maksimum sıcaklık farkı 4 numaralı hücreye benzer olarak 0.7 °C'dir. Bu sıcaklık farkları maksimum sıcaklığın olduğu test sonunda görülmüştür. Örnek olarak, t=3345 s'de T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ ve T₆ sırasıyla, 45,3, 45,6, 45,4, 45,6, 46,1, 46,4°C iken T₁₉, T₂₀, T₂₁, T₂₂, T₂₃ ve T₂₄ sırasıyla, 46, 46,8, 46,6, 46,3, 46,5, 46,7 °C'dir. T₃₁, T₃₂, T₃₃, T₃₄, T₃₅ ve T₃₆ ise sırasıyla, 45,8, 46,5, 46,2, 46,2, 46,3, 46,5 °C'dir.

Başka bir değerlendirme kıstası olarak, 1,4 ve 6 numaralı hücreler için, grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için test sonu maksimum sıcaklık T₂₀= 46,8 °C olarak ölçülmüştür. Önceki testlerde, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için test sonu maksimum sıcaklık T₂₄= 41,9 °C ve yalın batarya paketi için test sonu maksimum sıcaklık T₂₃= 53,12°C bulunmuştu. Sonuç olarak, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi, grafit/FDM(RT-35)'e kıyasla 4,9 °C daha düşük bir maksimum sıcaklık göstermiştir. Dolayısıyla, maksimum sıcaklık değeri de yaklaşık %10,47 daha düşüktür. Ayrıca, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, yalın batarya paketine kıyasla 11,22 °C daha düşük bir maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Bu da, maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık olarak %21,12 azalışa tekabül etmektedir. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi ve yalın batarya paketi kıyaslandığında ise grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin 6,32 °C daha düşük maksimum sıcaklığa ulaştığı ve maksimum sıcaklık değerini %13,5 daha da düşürdüğü açıktır. Bu karşılaştırma, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin grafit/FDM(RT-35) ve yalın batarya paketine göre daha düşük maksimum sıcaklık sunduğunu ortaya koymaktadır.



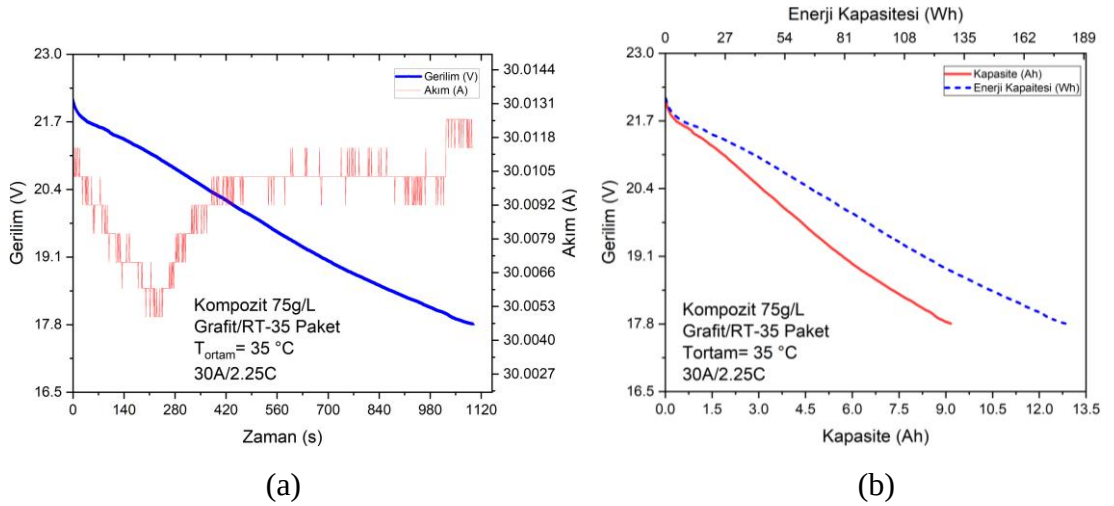
Şekil 51. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.5.4. Performans Testi, $T_{ortam} = +35\text{ °C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Batarya paketinin $+35\text{ °C}$ ortam sıcaklığı ve yüksek deşarj akım değeri (30A) yükü altındaki performans testine ait sonuçlar Şekil 52(a)'da verilmiştir. Gerilimin zamana bağlı değişimi incelendiğinde başlangıç gerilim değerinin 22,13 V olduğu görülmektedir. Ayrıca, 1099 s sonunda gerilim değeri 17,81V iken limit sıcaklık değerine ($\approx 60\text{ °C}$) alt kesme geriliminden (16,8 V) daha önce ulaşması nedeniyle test manuel olarak durdurulmuştur. Aynı ortam sıcaklığı ve deşarj akımı altında gerçekleştirilen yalın batarya paketi testlerinde de limit sıcaklık değerine ($\approx 60\text{ °C}$) erken ulaşılmış gerilim değeri 20,272 V iken 685 s sonunda test sonlandırılmıştı. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi ise limit sıcaklık değerine ulaşmadan 1309 s sonunda alt kesme (16,8 V) gerilimine ulaşmıştı. Buradan yola çıkarak,

grafit/FDM(RT-42) batarya paketi grafit/FDM(RT-35) batarya paketine kıyasla %19,1, yalın batarya paketine kıyasla ise %91,1 oranında daha fazla çalışma süresi sağlamıştır. Grafit/FDM(RT-35) ile yalın batarya paketi kıyaslandığında bu oran %60,44'tür.

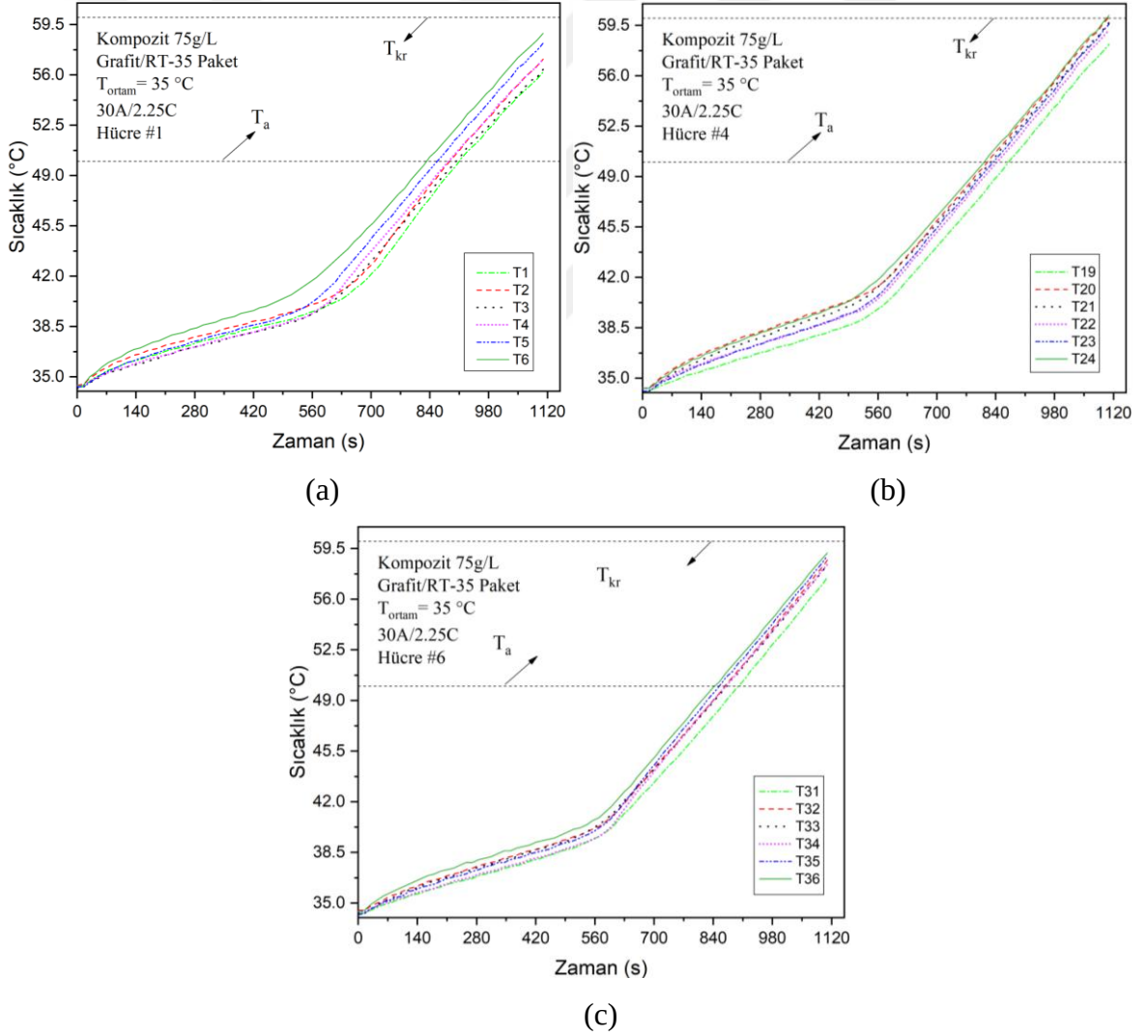
Grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerlerinin potansiyel farka göre değişimi Şekil 52(b)'de verilmiştir. Deşarj ve enerji kapasitesi değerleri sırasıyla 9,16 Ah ve 180,71 Wh olarak bulunmuştur. Bu değerler, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için, sırasıyla, 10,93 Ah ve 212,113 Wh' dir. Deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi aynı şartlar altında yalın batarya paketi için 5,71Ah ve 122,12Wh olarak bulunmuştu. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi, grafit/FDM(RT-35) batarya paketine kıyasla deşarj kapasitesi için yaklaşık %19,32 ve enerji kapasitesi için ise yaklaşık %17,37'lik daha iyi bir performans sergilemiştir. Yalın batarya paketine kıyasla bu oranlar sırasıyla yaklaşık %91,42 ve %73,68 daha yüksek bir performans göstermiştir. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketi ile yalın batarya paketi karşılaştırıldığında ise grafit/FDM(RT-35) batarya paketi deşarj kapasitesinde yaklaşık %60,42 ve enerji kapasitesinde yaklaşık %47,96 daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, grafit/FDM(RT-42) batarya paketinin grafit/FDM(RT-35) ve yalın batarya paketine kıyasla deşarj ve enerji kapasitesi açısından daha üstün bir performansa sahip olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 52. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

1, 4 ve 6 numaralı hücrelere ait sıcaklık değişimi Şekil 53(a), 53(b) ve 53(c)'de sunulmuştur. Her üç şekil için de sıcaklık eğrilerine ait karakteristik iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım için lineer artış, ikinci kısım içinse yükselen sıcaklık artış hızları

gözlenmiştir. Aynı şartlar altında grafit/FDM(RT-42) batarya paketi için yapılan testlerin 2. ve 3. kısımları bu test ile oldukça benzerlik göstermiştir. Şekil 53' te her üç hücre için de yerel sıcaklık noktalarındaki başlangıç sıcaklıklarının (ortam sıcaklığı 35 °C) Rt-35'in faz değişim aralığı olan 32-38 °C aralığında olmasından kaynaklı sıcaklık artış hızı birinci kısımda daha azdır. Eğrilerin ikinci kısmındada RT-35'in faz değişim aralığı aşıldığından ($T > 38$ °C) grafit/FDM matrisin ısı depolama kapasitesi azalmış dolayısıyla sıcaklık artış hızları yükselmiştir. Test boyunca, en tekdüze sıcaklık dağılımı 6 numaralı hücre için tespit edilmiş olup, test boyunca yerel noktalar arasındaki sıcaklık farklarının oldukça az olduğu şekil 53 (c)'den anlaşılabilmektedir. 1 ve 4 numaralı hücreler kıyaslandığında ise 4 numaralı hücrenin sıcaklık dağılımı daha düzgündür.

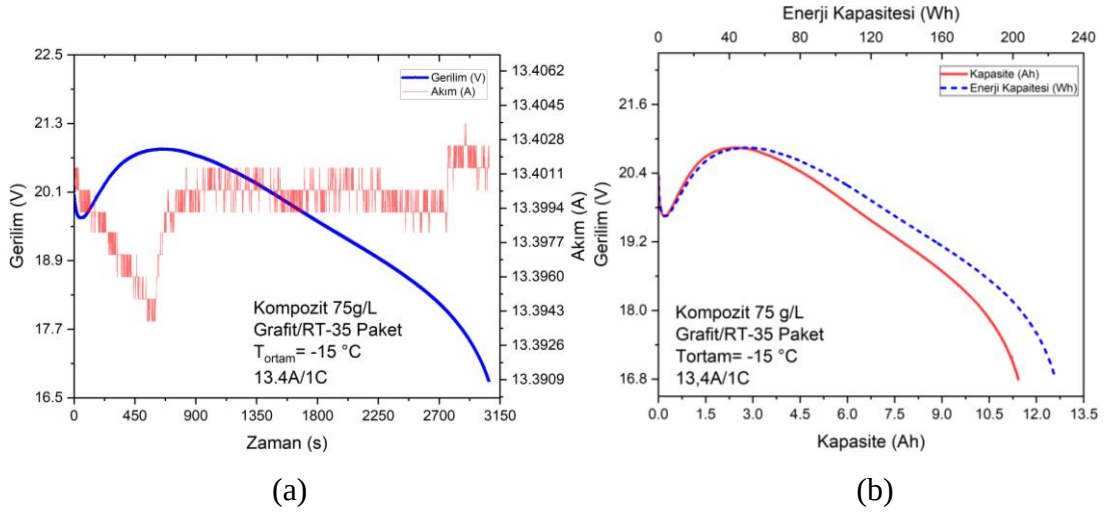


Şekil 53. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (35 °C, 30 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

Test sonuna yaklaşırken $t=1095$. s'de T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 ve T_6 için sıcaklık değerleri sırasıyla 55,7, 56,6, 55,8, 56,6, 57,7, 58,4 °C'dir. $T_{20}, T_{21}, T_{22}, T_{23}$ ve T_{24} için sıcaklık değerleri ise sırasıyla 57,7, 59,6, 59,2, 58,7, 59,1, 59,7 °C'dir. Son olarak, $T_{31}, T_{32}, T_{33}, T_{34}, T_{35}$ ve T_{36} değerleri ise 56,9, 58,1, 57,8, 57,9, 58,4, 58,7 °C'dir. Daha önce gerçekleştirilen yalın batarya paketi performans testlerinde, test sonunda 1,4 ve 6 numaralı hücrelerin sıcaklık noktaları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 9,47 °C iken, süre bakımından yalın batarya paketi testinden %60,44 oranında daha uzun olan bu performans testinde maksimum sıcaklık farkı 4 °C'dir. Ayrıca, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değer 8,2 °C olarak bulunmuştu.

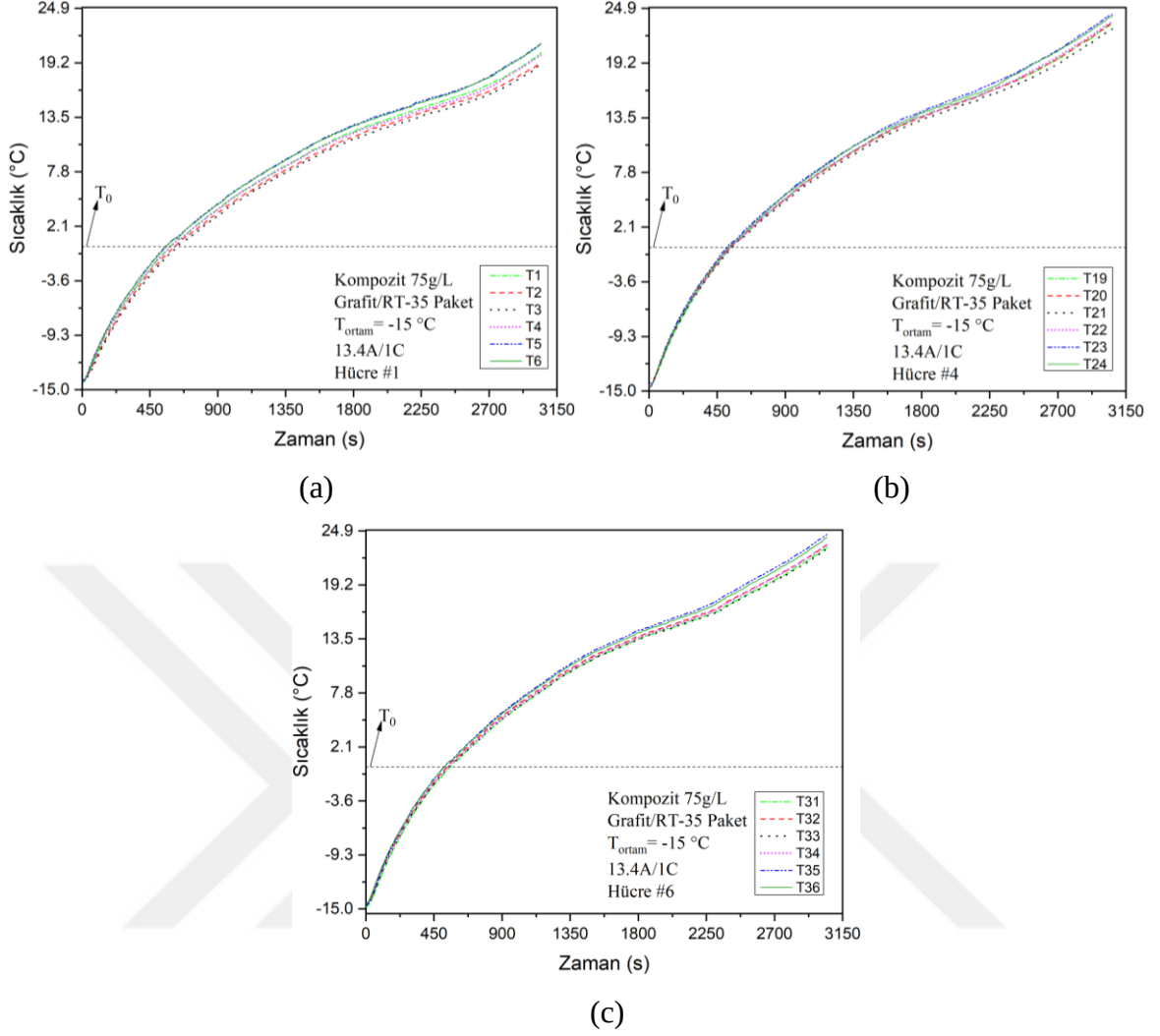
3.5.5. Performans Testi, $T_{ortam} = -15$ °C ve $I = 13,4$ A (1 C)

Batarya paketinin -15 °C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj akım değeri (13,4A) yükü altında sergilediği elektriksel performansa ait veriler Şekil 54'te verilmiştir. Gerilimin zaman bağlı değişimi incelendiğinde, ilk periyotta, yüksek iç direnç sebebiyle gerilim değerinin hızla düştüğü görülmektedir. İlerleyen periyotta, batarya paketinden güç çekilmesiyle hücrelerin ısınmasına bağlı olarak gerilim değerinin arttığı olduğu görülmektedir. Sonraki periyotta ise, $T > 0$ °C durumlarına benzer olarak gerilim değerinin sürekli olarak azalarak alt kesme gerilim değerine ulaşmaktadır ($t = 3070$ s). DC yük ünitesi ile akım değerinin ise 13,4 A olarak uygulandığı görülmektedir. Deşarj ve enerji kapasitesi değerlerinin değişimi Şekil 54(b)'de sunulmuştur. Deşarj sürecinin tamamlanması (-15 °C ve 13,4 A/1C için) ile ulaşılan deşarj ve enerji kapasitesi değerleri grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için, sırasıyla, 11,43 Ah ve 224,1 Wh şeklindedir. Aynı performans testi altında 2793 s sonunda yalın paket için, bu değerler 10,389 Ah ve 206,52 Wh şeklindeydi (alt kesme gerilimi =17, 531 V). Grafit/FDM(RT-35) batarya paketinin 17,535 V değerindeki kapasite ve enerji kapasitesi değerlerine bakılacak olursa, 10,876 Ah ve 214,613 Wh olduğu tespit edilir. Dolayısıyla, aynı gerilim değerinde batarya paketleri için kapasite ve enerji kapasitesi açısından sırasıyla, %4,7 ve %3,9'luk farklar mevcuttur. Ayrıca, $T < 0$ °C çalışma sıcaklığı koşullarının batarya performansını ciddi bir şekilde sınırladığı görülmektedir.



Şekil 54. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (-15°C , $13,4\text{ A}$) elektriksel performans (a) Gerilim zaman ve akım (b) Gerilim kapasite ve enerji kapasitesi eğrileri

-15°C ortam sıcaklığı ve $13,4\text{A}$ deşarj akımı altında elde edilen sıcaklık değişim profilleri Şekil 55'te verilmiştir. Güvenilir çalışma süreleri içerisinde -15°C ve $13,4\text{ A}/1\text{ C}$ test koşulları için ulaşılan maksimum hücre yüzey sıcaklığı 24°C 'dir. (Şekil 55(b) ve 55(c)). Bu değer, yalın batarya paketi testinde 19°C bulunmuştu. Bu test özelindeki sıcaklık artışının nedeni grafit/FDM matrisin dış ortamla hücre yüzeyleri arasında bir yalıtım oluşturması olarak açıklanabilir. Ayrıca, yalın batarya paketinde 1,4 ve 6 numaralı hücrelerin sıcaklık noktaları arasında test sonunda $12,3^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkı saptanırken, bu fark grafit/FDM(RT-35) batarya paketi için $5,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Buna dayanarak, yalın batarya paketine kıyasla grafit/FDM paketinin düzgün sıcaklık dağılımı açısından %44,7'lik bir iyileşme sağladığı söylenebilir.



Şekil 55. Grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi (-15 °C, 13,4 A) yerel sıcaklık değişimleri (a) 1 numaralı hücre, (b) 4 numaralı hücre, (c) 6 numaralı hücre

3.6. Farklı Yığın Yoğunluklarındaki Kompozit Grafit/FDM Batarya Paketlerinin Performans Testleri

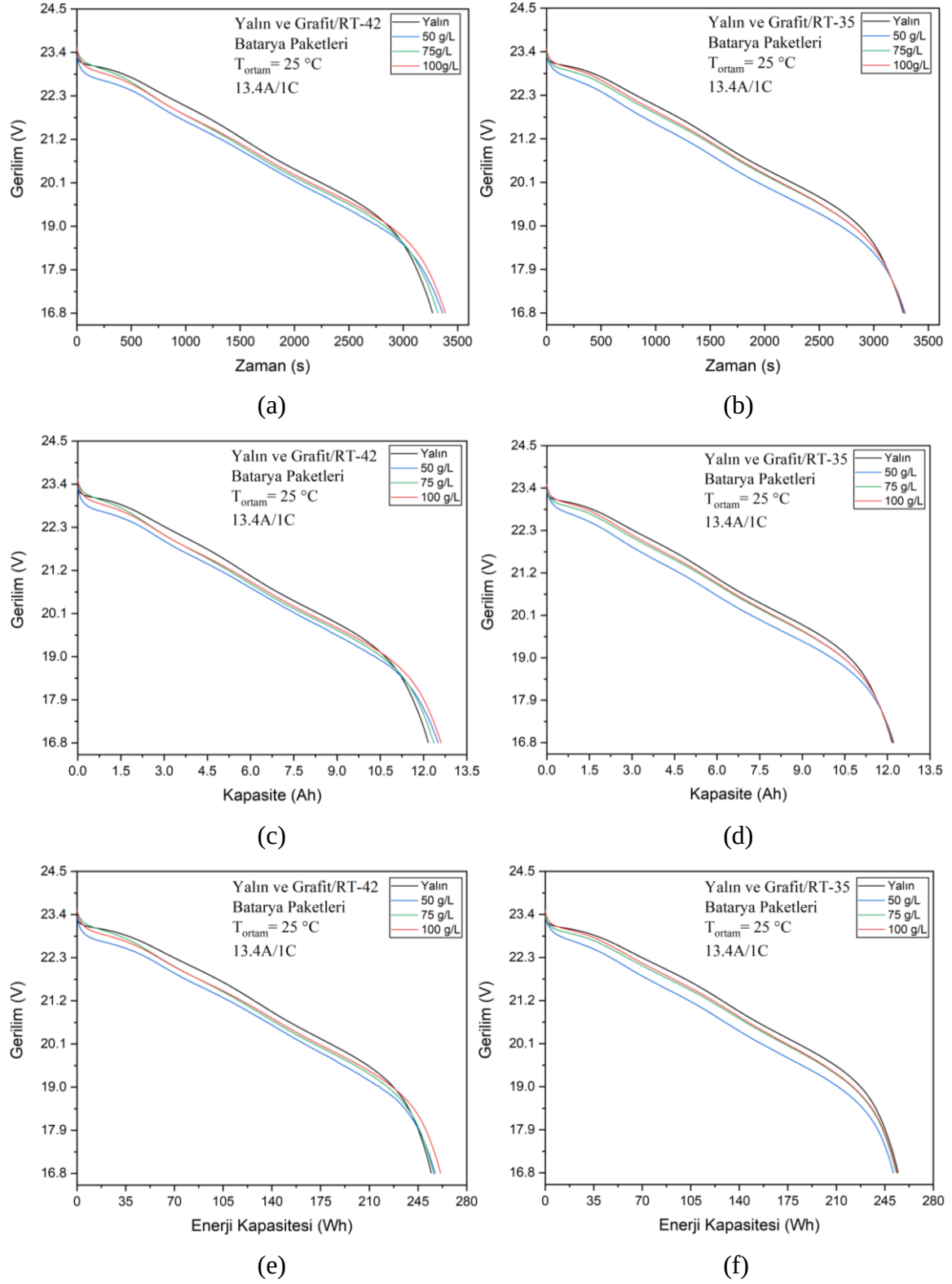
Bu kısımda yalın batarya paketi performans testleri ile farklı yığın yoğunluklarına sahip (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L) grafit matris köpüklere FDM emdirilmesi ile oluşturulan kompozit grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin performans testleri karşılaştırılmıştır. Performans testleri -15 °C, 25 °C ve 35 °C ortam sıcaklıkları için ve 13,4 A ve 30 A deşarj akımları altında gerçekleştirilmiştir. Batarya paketlerinin ısı performansları sıcaklık ölçümü alınan 18 adet yerel sıcaklık noktasına göre paket içerisindeki ortalama sıcaklıklar, maksimum sıcaklıklar ve sıcaklık dağılımları göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, gerilim-zaman, gerilim kapasite ve gerilim enerji

kapasitesi profilleri vasıtasıyla batarya paketlerinin elektriksel performansları ve izin verilen çalışma sıcaklık aralığı dahilinde ulaştıkları çalışma süreleri de karşılaştırılmıştır.

3.6.1. Performans Testi, $T_{ortam} = +25^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

25°C ortam sıcaklığı ve $13,4\text{ A}$ deşarj akımı altında gerçekleştirilen testlere ait yalın batarya paketi ve farklı yığın yoğunluklarına sahip (50 g/L , 75 g/L ve 100 g/L) grafit köpüklerden oluşan kompozit grafit/FDM batarya paketlerinin elektriksel performanslarının karşılaştırılmaları Şekil 56' da verilmiştir. Şekil 56(a) ve 56(b)'de gerilim-zaman değişimleri gösterilmektedir. Şekil 56(a) ve 56(b)'den batarya paketlerinin tümünün başlangıç gerilimlerinin $23,3\text{ V}$ - $23,5\text{ V}$ arasında olduğu deşarj işleminin başlamasıyla bu gerilimlerin zamanla azalarak alt kesme gerilim değeri olan $16,8\text{ V}$ 'ye ulaştığı görülmektedir. Yalın batarya paketi için çalışma süresi 3269 s iken, grafit(50g/L)/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi için bu süre 3361 s 'dir. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketlerinin çalışma süreleri ise sırasıyla 3318 s ve 3387 s olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 50 g/L , 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için çalışma süreleri sırasıyla 3285 s , 3275 s ve 3277 s olarak bulunmuştur.

Şekil 56(c) ve 56(d)'de deşarj süreleri boyunca batarya paketlerinin deşarj kapasitelerinin paket gerilimine bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 56(e) ve 56(f)'de ise deşarj süreleri boyunca batarya paketlerinin sunduğu enerji kapasitesi değerlerinin paket gerilimine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yalın batarya paketi için deşarj işlemi süresince ulaşılan kapasite ve enerji kapasitesi değerleri $12,166\text{ Ah}$ ve $254,54\text{ Wh}$ ' dir. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için $12,51\text{ Ah}$ ve $257,33\text{ Wh}$ olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değerler sırasıyla $12,36\text{ Ah}$, $256,35\text{ Wh}$ ve $12,611\text{ Ah}$ ve $261,242\text{ Wh}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için $12,229\text{ Ah}$ ve $251,12\text{ Wh}$, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) için $12,215$ ve $253,58\text{ Wh}$ ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) için ise $12,203$ ve $253,88\text{ Wh}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 56. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (25 °C, 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi

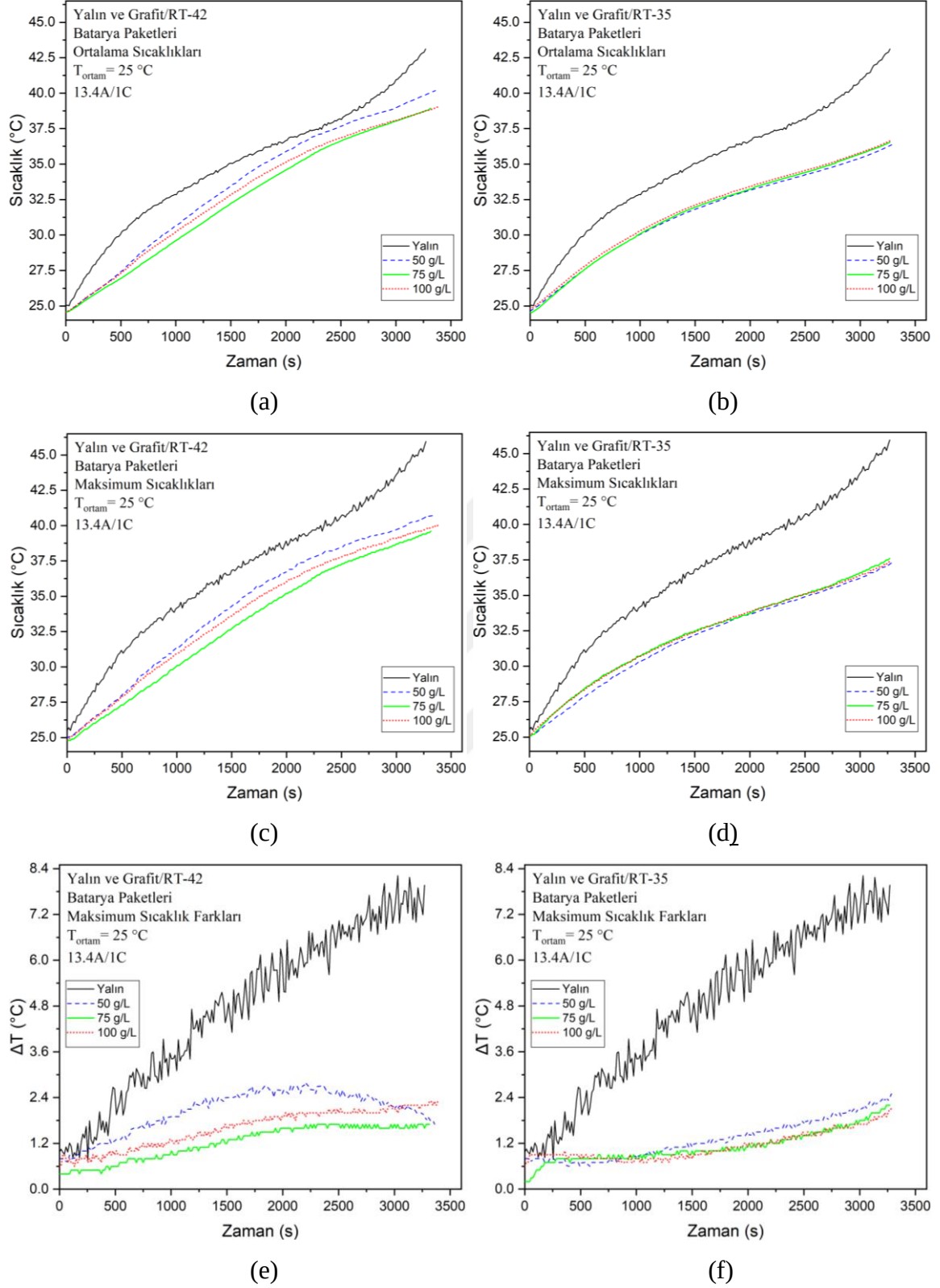
Gerilim-zaman, gerilim kapasite ve gerilim-enerji kapasitesi değişimleri değerlendirildiğinde batarya paketleri arasında çalışma sürelerinde, kapasite ve enerji kapasitesi değerlerinde farklar olmasına rağmen bu farklar batarya paketlerinin maruz kaldığı farklı şarj/deşarj çevrim sayıları ve farklı batarya hücrelerinin farklı elektriksel performansları ile ilişkilendirmiş ve göz ardı edilmiştir. Dolayısıyla, bu ortam sıcaklığı vedeşarj akımı için genel karşılaştırma sadece çalışma süreleri içerisinde sahip oldukları ısı performansına dayalı olarak yapılmıştır.

Şekil 57’ de 25°C ortam sıcaklığı ve 13,4 Adeşarj akımı altında gerçekleştirilen test süresince yalın batarya paketi ve farklı yığın yoğunluklarına sahip kompozit grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerine ait ısı performansları gösterilmektedir. Şekil 57(a) ve (b)’de her bir sıcaklık ölçüm aralığı adımı için (15 s) 18 adet yerel sıcaklık noktasının ortalaması verilmiştir. Şekil 57(c) ve Şekil 57(d)’de test boyunca farklı batarya paketleri içerisinde belirlenen maksimum sıcaklıklar sunulmuştur. Şekil 57(e) ve 57(f)’de ise test boyunca her bir sıcaklık ölçüm adımında batarya paketi içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark (ΔT) verilmiştir. Şekiller incelendiğinde her bir batarya paketinin ortalama ve maksimum sıcaklık karakteristiklerinin benzer olduğu görülmektedir. Ayrıca, yalın batarya paketi için ortalama ve maksimum sıcaklık değerlerinin test süresince diğer batarya paketlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yalın batarya paketi sıcaklık eğrileri ilk kısımda sıcaklık artış hızının yüksek olduğu sıcaklık artışı, ikinci kısımda azalan sıcaklık artış hızı ile artan sıcaklıklar ve son bölümde ise tekrardan artan sıcaklık artış hızı ile yükselen sıcaklıklar olarak üç kısımda incelenebilir. Yalın batarya paketi herhangi bir ek ısı yönetim sistemine sahip olmadığı için sıcaklık artış hızlarını değerlendirirken daha önce LIB’lerde ısı üretimi bölümünde bahsedilen Denklem 6’ yı ele almak gerekir. Hem bu denklem hem de Şekil 56’ daki voltaj-zaman profilleri ve Şekil 57’ deki ortalama ve maksimum sıcaklık profilleri birlikte incelendiğinde gerilim değerindeki değişim hızlarının hücrelerin ısı üretimini etkilediği anlaşılır. Gerilimdeki değişim hızlarının düşük olduğu bölgelerde hücrelerin ısı üretimi daha düşük ve sıcaklık artış hızı daha azken ($750 \text{ s} < t < 2700 \text{ s}$), bu bölgenin dışında batarya paketi gerilimindeki değişim hızları dolayısıyla sıcaklık artış hızları daha yüksektir.

Grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri içinse ortalama ve maksimum sıcaklık profilleri yalın batarya paketinden daha farklıdır. Bunun nedeni, yalın batarya paketinin doğrudan dış ortam sıcaklığına maruz olması ve hücre yüzeylerinden sadece taşınım ile ısı transferi gerçekleşirken, kompozit batarya paketlerinde hücre

yüzeylerine doğrudan temas eden kompozit matris yapılar sayesinde hücre yüzeylerinden iletimle ısı transferi gerçekleşmesidir. Ayrıca, faz değişim aralığına girildiğinde matris yapıların duyulur ısı depolama kapasitelerine ek olarak gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde hücrelerin yüzeylerinden daha yüksek oranda ısı uzaklaştırmalarıdır. Kompozit grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri için faz değişim aralığı hücre yüzey sıcaklık artışının daha az olduğu $t > 2300$ s olan bölgede açıkça görülmektedir. Ayrıca, bu batarya paketleri için hücre yüzey sıcaklıkları faz değişim sıcaklık üst değeri olan $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmadan deşarj testi alt kesme gerilim değerine ulaşmış ve test sonlandırılmıştır. Kompozit grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için faz değişimi $1500\text{ s} - 2800\text{ s}$ arasında gerçekleşmiştir. Bu aralıkta sıcaklık artış hızı düşük ve lineerdir. Bu aralığın dışında test başından faz değişim başlangıcına kadar ($t < 1500\text{ s}$) sıcaklık artışı daha belirgin, faz değişim aralığının aşıldığı aralıkta ($t > 2800\text{ s}$) ise hafifçe artmış bir sıcaklık değişimi görülmektedir.

Şekil 57(e) ve Şekil 57(f)'den batarya paketlerinin deşarj testi boyunca maksimum ve minimum yerel sıcaklık noktaları arasındaki fark görülmektedir. Bu fark bahsedilen batarya paketlerinin kullanılması ile sıcaklıkta ne kadar düzgün dağılım sağlandığını belirlemek açısından oldukça önemlidir. Bu test parametreleri için grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketinin aynı FDM türüne sahip diğer yığın yoğunluklarındaki batarya paketlerine göre farklı bir davranış sergilemesinin nedeni düşük ısı iletimi nedeniyle bünyesinde bulunan FDM'nin diğer yığın yoğunluklarına sahip kompozit yapılara göre daha geç faz değişimi ile açıklanabilir. Bu nedenle ilk etapta hücreler arası maksimum sıcaklık farkı diğer kompozit yapılara göre daha fazla artış göstermiştir. Faz değişim etkisinin bariz bir şekilde görüldüğü aralıkta ise ($t > 2300\text{ s}$), FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi ile hücreler arasındaki sıcaklık farklarında azalmalar meydana gelmiştir. Grafit(50g/L)/FDM(RT-35) batarya paketinde de sıcaklık farkı aynı FDM türüne sahip diğer yığın yoğunluklarına sahip batarya paketlerinden daha belirgin olmasına rağmen, faz değişim sıcaklık aralığı başlangıcı olan $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin ortam sıcaklığı olan $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yakın olması sebebiyle değişim karakteristiği diğer batarya paketleri ile uyumludur. Bu durum, sıcaklık farkının daha fazla açılmadan faz değişiminin ve gizli ısı depolamanın başlaması ile açıklanabilir.



Şekil 57. Batarya paketlerinin (25°C , 13,4 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları

Yapılan testler sonucunda, yalın batarya paketi için maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı değerleri sırasıyla 46 °C ve 7,97 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 40,8 °C ve 2,6 °C olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse 39,5 ve 1,6 ve 40,1 °C ve 2,3 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için bu değerler 37,3 °C ve 2,5 °C iken, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) içinse sırasıyla 37,6 ve 2,2 ve 37,5 °C ve 2,1 °C'dir. Sonuç olarak, bu çalışma koşulları altında (25 °C ve 13,4A) grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin ısı performanslarının yalın batarya paketine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Daha düşük çalışma sıcaklıkları ve düzgün sıcaklık dağılımı sağlamaları nedeniyle grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin en üstün ısı performans sunduğu gözlemlenmiştir. Maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı değerlerinin birbirine oldukça yakın olması nedeniyle, grafit/FDM(RT-35)'nin farklı yığın yoğunlukları arasında önemli bir ısı performans farkı saptanamamıştır. Farklı yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri yalın batarya paketine göre maksimum çalışma sıcaklığında ortalama %18,54' lük ve maksimum sıcaklık farkında ise %71,55' lik bir iyileşme sağlamıştır.

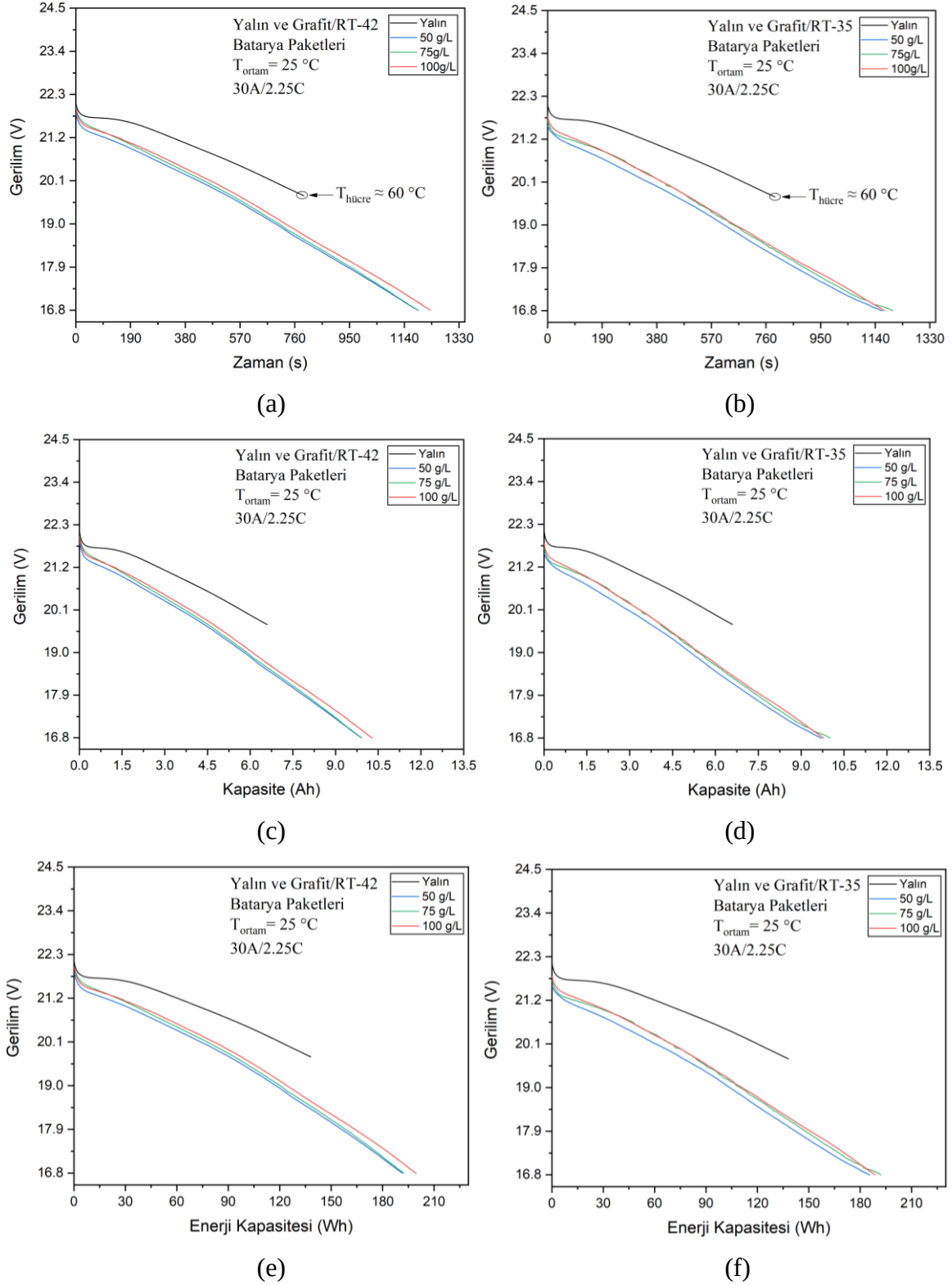
3.6.2. Performans Testi, $T_{ortam} = +25\text{ °C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Şekil 58' de 25°C ortam sıcaklığı ve 13,4 A deşarj akımı altında gerçekleştirilen testler için farklı yığın yoğunluklarına (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L) sahip grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketlerinin elektriksel performansları yalın batarya paketi ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 58(a) ve 58(b)'de gerilim-zaman değişimleri gösterilmektedir. Şekil 58(a) ve 58(b)'den kompozit batarya paketlerinin başlangıç gerilimlerinin zamanla azalarak alt kesme gerilim değeri olan 16,8 V'ye ulaştığı görülmektedir. Fakat yalın batarya paketinin hücre sıcaklıklardan en az birisinin batarya üreticisinin belirlediği maksimum çalışma sıcaklık üst değeri olan 60 °C'ye daha önce ulaşması nedeniyle test alt kesme gerilim değerine ulaşmadan 19,72 V' de sonlandırılmıştır.

Yalın batarya paketi için çalışma süresi 791 s iken, grafit(50g/L)/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi için bu süre 1187 s'dir. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketlerinin çalışma süreleri ise sırasıyla 1189 s ve 1230 s olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için çalışma süreleri sırasıyla 1164 s, 1201 s ve 1173 s

olarak ölçülmüştür. Testler boyunca kompozit batarya paketlerindeki hücre yüzey sıcaklıkları hücreler için belirlenen maksimum çalışma sıcaklık limiti olan 60 °C altında kalmaktadır. Bu nedenle, yalın batarya paketi ile kıyaslandığında kompozit batarya paketleri çalışma süreleri açısından daha üstündür. Kompozit batarya paketleri ortalama 1191 s çalışma süresi ile yalın batarya paketine göre çalışma süresinde ortalama %50, 57 iyileşme sağlamıştır. Şekil 58’ den deşarj testi boyunca yalın batarya paketi gerilim (V) değerlerinin diğer kompozit batarya paketlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülür. Bunun sebebi hücre sıcaklıklarının deşarj süresi boyunca kompozit batarya paketlerinden daha yüksek seyretmesine (Şekil 59) bağlı olarak iyonik iletkenliğin artan sıcaklıkla birlikte yükselmesi olarak açıklanır (Hoffman vd., 2021). Makul oranda sıcaklık artışı ile ortaya çıkan yüksek iyonik iletkenlik yüksek hücre voltajı ve azaltılmış iç dirence neden olur (Awasthi, 2024).

Şekil 58(c) ve 58 (d)’de deşarj süreleri boyunca batarya paketlerinin deşarj kapasitelerinin paket gerilimine bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 58(e) ve 58 (f)’de ise deşarj süreleri boyunca batarya paketlerinin sunduğu enerji kapasitesi değerlerinin paket gerilimine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yalın batarya paketi için deşarj işlemi süresince ulaşılan kapasite ve enerji kapasitesi değerleri 6,59 Ah ve 138,1 Wh’ dir. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 9,9 Ah ve 191,45 Wh olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değerler sırasıyla 9,92 Ah, 192,42 Wh ve 10,29 Ah ve 199,52 Wh olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için 9,71 Ah ve 185,5 Wh, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) için 10 Ah ve 192,17 Wh ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) için ise 9,79 ve 188,59 Wh olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, kapasite ve deşarj kapasitesi açısından kompozit batarya paketlerinin yalın batarya paketine göre önemli ölçüde iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Kompozit batarya paketleri tarafından sağlanan ortalama iyileşmeler kapasite ve enerji kapasitesi değerleri için sırasıyla %50,77 ve %38,75 olarak hesaplanmıştır. Batarya paketleri arasında grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi kapasite ve enerji kapasitesi değerleri için en iyi performansı göstermiştir.

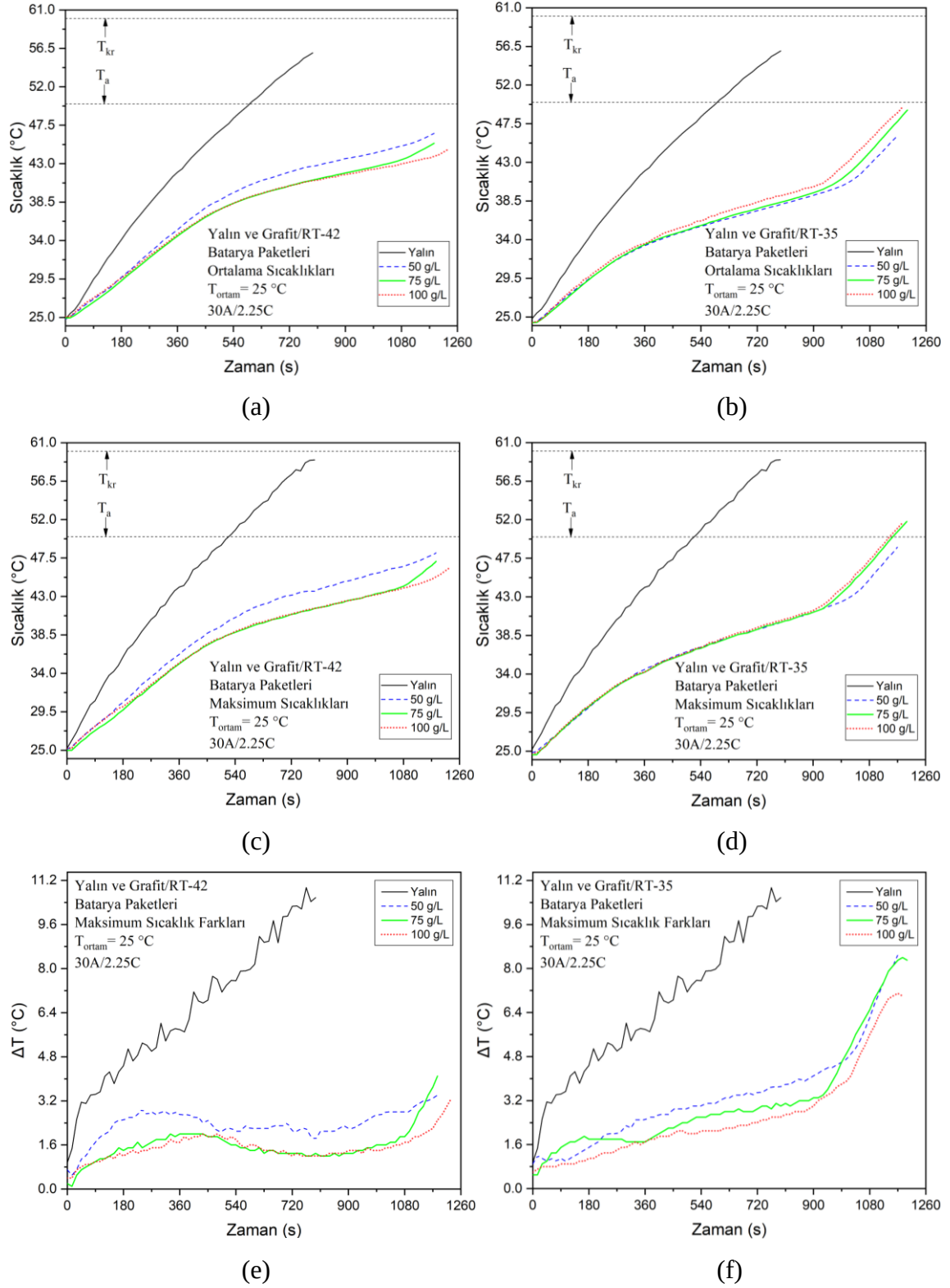


Şekil 58. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (25 °C, 30 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi

Şekil 59' de 25°C ortam sıcaklığı ve 30 A deşarj akımı altında gerçekleştirilen test süresince yalın batarya paketi ve kompozit grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerine ait ısı performanslar gösterilmektedir. Şekil 59(a) ve Şekil 59(b)'de test süresince batarya paketlerinin sıcaklık ortalaması eğrileri verilmiştir. Şekil 59(c) ve Şekil 59(d)'de ise batarya paketlerinin maksimum sıcaklıkları sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 59(e) ve 59(f)'den ise maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri görülür. Şekiller incelendiğinde yalın batarya paketi için ortalama ve maksimum sıcaklık değerlerinin kompozit batarya paketlerine göre daha yüksek olduğu ve alt kesme gerilim değerinden önce 60 °C'ye ulaştığı bulunmuştur. Farklı yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri için hem ortalama hem de maksimum sıcaklık değerleri izin verilen güvenli çalışma bölgesi olan 50 °C altındadır. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri içinse ortalama sıcaklıklar 50 °C altındayken, maksimum sıcaklık değerleri test sonunda 50 °C'yi aşmıştır. Kompozit grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri için faz değişim aralığı hücre yüzey sıcaklık artışının daha az olduğu 540. s'den sonra açıkça görülmektedir. Ayrıca, hem ortalama hem de maksimum hücre yüzey sıcaklıkları yaklaşık olarak 1000. s'den sonra faz değişim sıcaklık üst değeri olan 43 °C'yi aştığından sıcaklık artış hızları yükselmiştir. Kompozit grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için faz değişimi 270 s ve 950 s arasında gerçekleşmiştir. Bu aralığın dışında ise sıcaklık artış hızları daha belirgindir. Grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin farklı yığın yoğunlukları ortalama ve maksimum sıcaklık eğrileri karşılaştırıldığında RT-42 FDM kullanılan paketlerde yığın yoğunluğunu attırmak maksimum sıcaklık kontrolü açısından üstünlük sağlarken, RT-35 FDM kullanılan durumda ise tersi yönde bir eğilim görülmüştür. Düşük yığın yoğunluğu ortalama ve maksimum sıcaklık düşüşü açısından iyileşmeler sağlamıştır. Bu durum 25 °C ortam sıcaklığının RT-35' in faz değişim sıcaklığı başlangıcı olan 32 °C' ye daha yakın olması ve 30 A deşarj akımı altında batarya paketinin ürettiği ısı sonucu faz değişim sıcaklığına hızlıca ulaşılması ve RT-42 kullanılan pakete göre gizli ısı depolamanın daha önce başlaması ile açıklanabilir. Kompozit yapılarda grafitin yığın yoğunluğunu arttırmak iletimle ısı transferini arttırırken, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesini (J/g) azaltmaktadır. Dolayısıyla, bu durumda maksimum sıcaklık kontrolü için yığın yoğunluğunu arttırarak iletimle ısı transferinde sağlanan iyileşme etkisi düşük yığın yoğunluğunun daha yüksek gizli ısı depolama kapasitesi tarafından baskılanmıştır. Şekil 59(e) ve Şekil 59(f)'den batarya paketlerinin deşarj testi boyunca maksimum ve minimum yerel sıcaklık noktaları arasındaki fark görülmektedir. Yalın batarya paketinde hücreler arası maksimum sıcaklık

farkı değeri test boyunca artış eğilimindeyken, grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinde kullanılan kompozit matrislere bağlı olarak farklı değişim eğilimleri tespit edilmiştir. Bu eğilim grafit/(RT-42) batarya paketlerinin faz değişim aralığında maksimum sıcaklık farkında azalmaya neden olmuştur. Bunun nedeni, faz değişim sıcaklık aralığı başlangıcı ile test ortam sıcaklığı arasında 12 °C-13 °C bir fark olması ve faz değişim aralığına girilinceye kadar sıcaklık farkının genel bir yükseliş göstermesidir. Faz değişim aralığında ise maksimum ve minimum yerel sıcaklık ölçüm noktaları arasındaki farkın kapanması ile sıcaklık farkı azalmıştır. Faz değişim aralığı sona erdiğinde ise sıcaklık farkında tekrardan belirgin bir artış meydana gelmiştir. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketinde ise faz değişim aralığına kadar ki artış hızı faz değişim aralığında azalmış, faz değişimi bittikten sonra ise keskin bir artış göstermiştir. Test sonunda, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunlukları için sıcaklık farkında meydana gelen düşüş ise yine maksimum ve minimum yerel sıcaklık ölçüm noktaları arasındaki farkın kapanması ile açıklanır. Grafit(50g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(50g/L)/FDM(RT-35) batarya paketlerinin maksimum sıcaklık farklarının test boyunca aynı FDM türüne sahip diğer yığın yoğunluklarındaki batarya paketlerine göre daha yüksek değerlerde olması düşük ısı iletkenliği ile ilişkilidir. Maksimum sıcaklık kontrolünde FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi tarafından baskılanan artan yığın yoğunluğu ile iletimle ısı transferini arttırmanın etkisi burada daha düzgün sıcaklık dağılımı sağlaması ile net bir biçimde görülmektedir.

Yapılan testler sonucunda, yalın batarya paketi için maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı değerleri sırasıyla 59 °C ve 10,57 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 48,1 °C ve 3,4 °C olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse 47,1 ve 4,1 ve 46,4 °C ve 3,3 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için bu değerler 48,8 °C ve 8,5 °C iken, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) içinse sırasıyla 51,2 ve 8,4 ve 52,3 °C ve 7,1 °C'dir. Sonuç olarak, bu çalışma koşulları altında (25 °C ve 30 A) grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin ısı performanslarının yalın batarya paketine göre daha üstün olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinden daha iyi bir performans göstermiştir. Bu test koşulları altında, yalın batarya paketine göre maksimum sıcaklıkla %21,4 ve maksimum sıcaklık farkında ise %68,8' lik bir düşüş sağlayan grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketinin ısı yönetim açısından en ideal seçenek olduğu bulunmuştur.

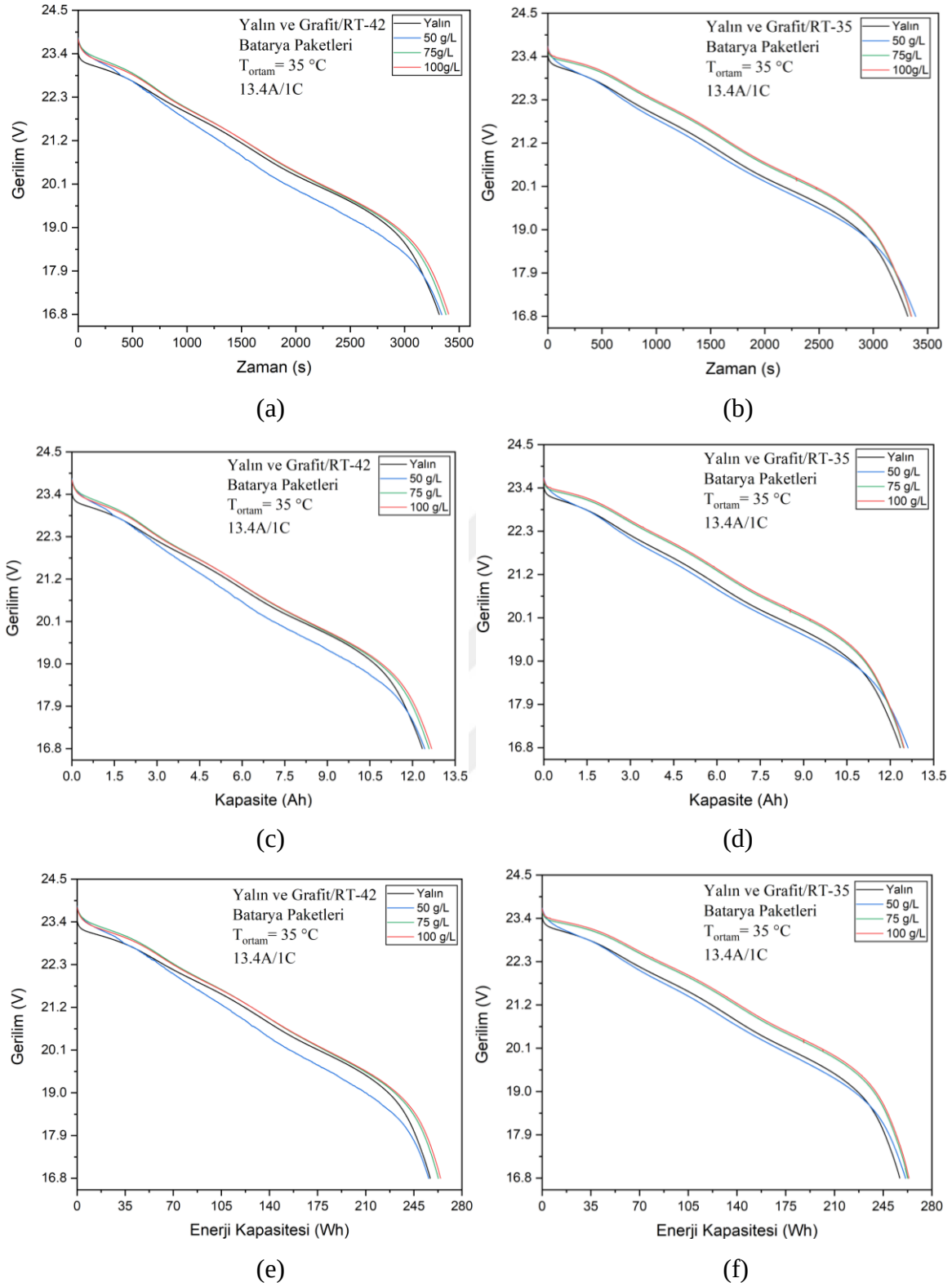


Şekil 59. Batarya paketlerinin (25°C , 30 A) ısıl performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları

3.6.3. Performans Testi, $T_{ortam} = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $I = 13,4\text{ A}$ (1 C)

35 °C ortam sıcaklığı ve 13,4 A deşarj akımı altında gerçekleştirilen testlere ait yalın batarya paketi ve farklı yığın yoğunluklarına sahip (50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L) grafit köpüklerden oluşan kompozit grafit/FDM batarya paketlerinin elektriksel performanslarının karşılaştırılmaları Şekil 60' ta verilmiştir. Şekil 60(a) ve 60(b)'de gerilim-zaman değişimleri gösterilmektedir. Şekil 60(a) ve 60(b)'den batarya paketlerinin gerilimlerinin zamanla azalarak alt kesme gerilim değeri olan 16,8 V'ye ulaştığı görülmektedir. Yalın batarya paketi için çalışma süresi 3315 s iken, grafit(50g/L)/FDM(RT-42) kompozit batarya paketi için bu süre 3340 s'dir. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketlerinin çalışma süreleri ise sırasıyla 3378 s ve 3403 s olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için çalışma süreleri sırasıyla 3391 s, 3347 s ve 3352 s olarak bulunmuştur.

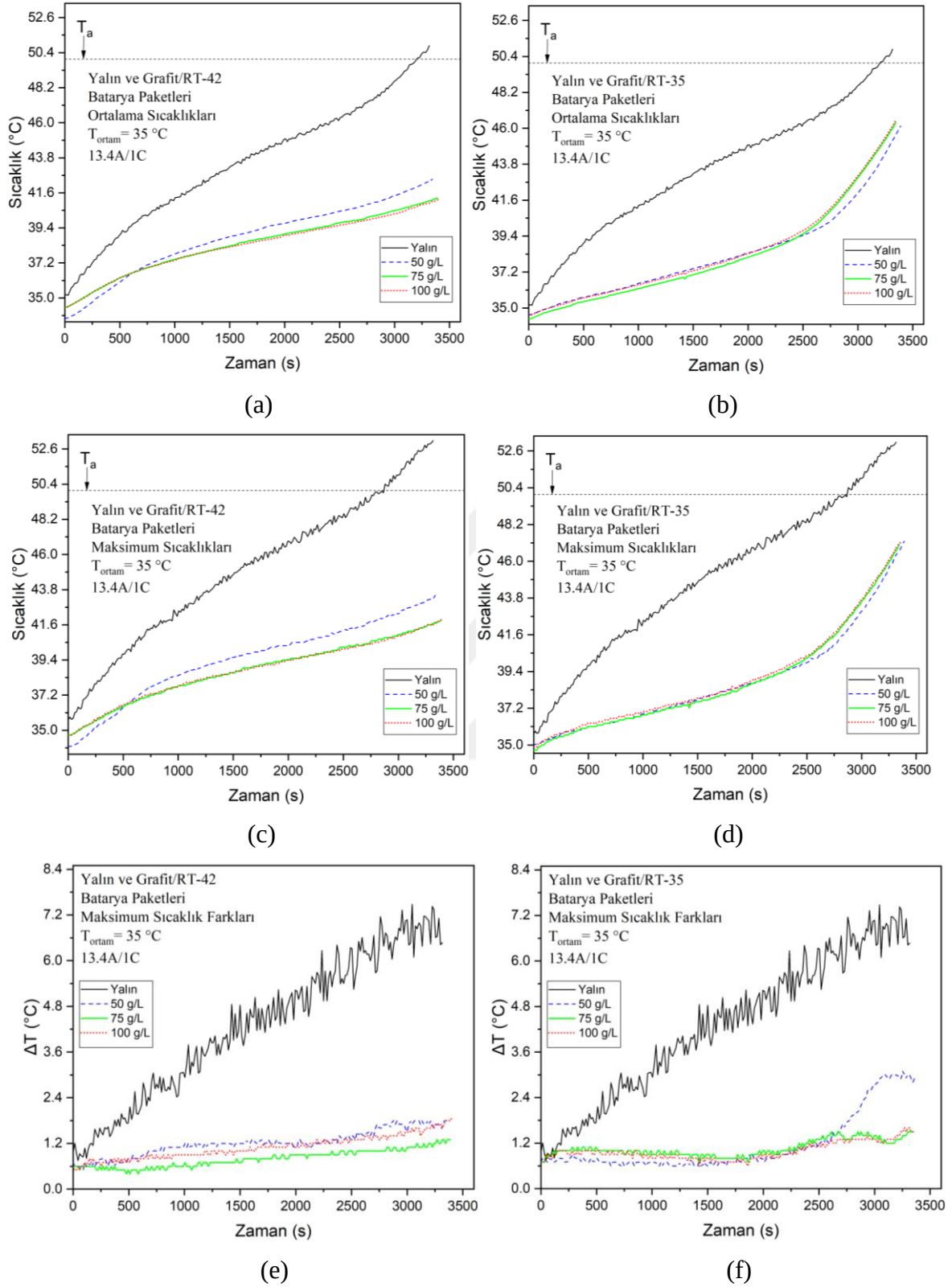
Şekil 60(c) ve 60(d)'de deşarj testi için batarya paketlerinin deşarj kapasitelerinin gerilimlerine bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 60(e) ve 60(f)'de ise deşarj testi için batarya paketlerinin sunduğu enerji kapasitesi değerlerinin paket gerilimine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yalın batarya paketi için deşarj işlemi sonunda ulaşılan kapasite ve enerji kapasitesi değerleri yaklaşık olarak 12,35 Ah ve 256,92 Wh olarak bulunmuştur. Bu değerler, grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 12,43 Ah ve 255,84 Wh olarak ölçülmüştür. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değerler sırasıyla yaklaşık olarak 12,59 Ah, 256,80 Wh ve 12,67 Ah ve 264,44 Wh olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için 12,62 Ah ve 261,1 Wh, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) için 12,46 Ah ve 262,6 Wh ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) için ise 12,48 Ah ve 263,6 Wh olarak ölçülmüştür. Grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri deşarj kapasitesinde yaklaşık %1,73'lük ve enerji kapasitesinde ise yaklaşık %0,82'lik bir iyileşme sağlamıştır. Sağlanan ortalama kapasite ve enerji kapasitesi iyileşmeleri grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri içinse sırasıyla %1,38'lik ve %2,15' dir. Bu deşarj testi parametreleri için de gerilim-zaman, gerilim kapasite ve gerilim-enerji kapasitesi değişimleri arasındaki küçük farklılıklar aynı deşarj akımı altında 25 °C'de gerçekleştirilen testlere benzer şekilde değerlendirilmiştir. Bu farklılıklar paketlerinin maruz kaldığı farklı şarj/deşarj çevrim sayıları ve farklı batarya hücrelerinin farklı elektriksel performansları ile ilişkilendirmiş ve göz ardı edilmiştir.



Şekil 60. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (35°C , 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi

Şekil 61' de 35 °C ortam sıcaklığı ve 13,4 A deşarj akımı altında yalın ve grafit/FDM batarya paketlerine ait ısı performanslar gösterilmektedir. Şekil 61(a) ve 61(b)'de test süresince batarya paketlerinin ortalama sıcaklıkları gösterilirken, Şekil 61(c) ve Şekil 61(d)'de ise maksimum sıcaklıklar sunulmuştur. Kompozit grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri için faz değişim aralığı $t > 625$ s olan bölgede açıkça görülmektedir. 75g/L ve 100 g/L yığın yoğunlukları için hücre yüzey sıcaklıkları faz değişim sıcaklık aralığını aşmadan deşarj test sona ermiştir. Grafit/FDM(RT-35) için faz değişim aralığı 32-38 °C arası olduğundan ortam sıcaklığı olan 35 °C'de faz değişiminin zaten başladığı açıktır. Bu nedenle, batarya paketleri gizli ısı depolama kapasitelerinin bir kısmını kullanamazlar. Faz değişim aralığının aşılması ile ($t > 2450$ s) sıcaklık artış hızı da keskin bir şekilde yükselmiştir.

Maksimum sıcaklık farkları (ΔT) da Şekil 61(e) ve 61(f)'de verilmiştir. Bu çalışma koşulları altında grafit/FDM(RT-42) tüm yığın yoğunluklarında benzer maksimum sıcaklık farkı değişimleri görülmektedir. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinde tüm yığın yoğunlukları için faz değişim aralığı sonuna kadar ($t < 2450$ s) maksimum sıcaklık farkları benzer bir eğilime sahipken, bu aralığın aşılması ile grafit(50g/L)/FDM(RT-35) batarya paketinin eğilimi diğer yığın yoğunluklarından ayrılmıştır. Bu durum, gizli ısı depolamanın sona ermesi sonucu grafit(50g/L)/FDM(RT-35) batarya paketinin diğer yığın yoğunluklarına kıyasla düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle hücreler arası sıcaklık farkının artması ile açıklanır. Yalın batarya paketi için maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı değerleri sırasıyla 53,12 °C ve 7,42 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 43,5 °C ve 1,8 °C olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse 41,9 ve 1,3 ve 42 °C ve 1,9 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için bu değerler 47,2 °C ve 3,1 °C iken, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) içinse sırasıyla 47 ve 1,5 ve 47,1 °C ve 1,6 °C'dir. Sonuç olarak, 35 °C ve 13,4 A çalışma koşulları altında grafit/FDM batarya paketlerinin ısı performanslarının yalın batarya paketine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Grafit/FDM(RT-42) batarya paketi maksimum çalışma sıcaklığında %21,2 ve maksimum sıcaklık farkında ise %82,5'lik bir düşüş sağlayarak en iyi ısı performans sunmuştur.

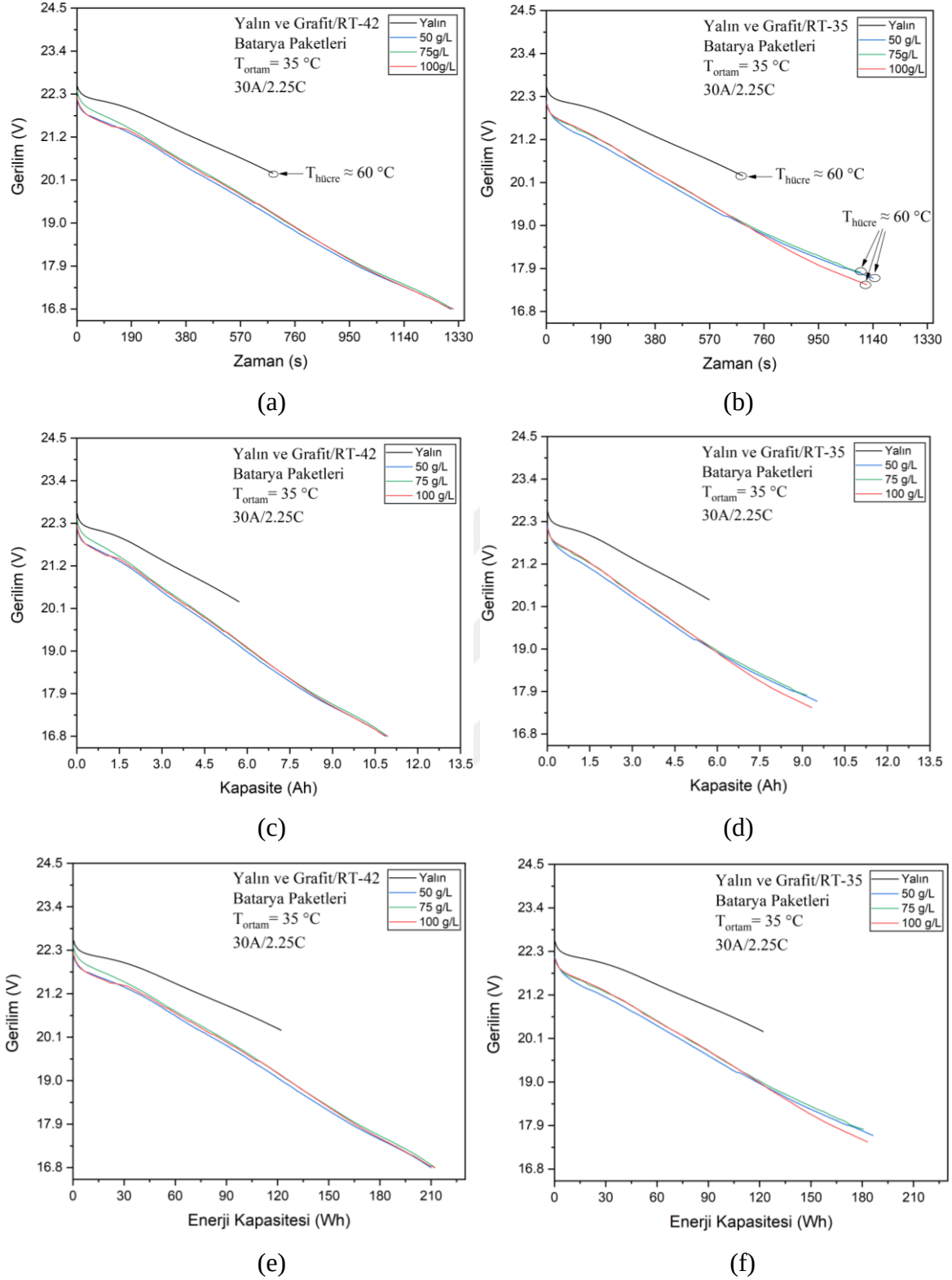


Şekil 61. Batarya paketlerinin (35°C , 13,4 A) ısı performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları

3.6.4. Performans Testi, $T_{ortam} = +35^{\circ}\text{C}$ ve $I = 30\text{ A}$ ($\approx 2,25\text{ C}$)

Şekil 62' de 35°C ortam sıcaklığı ve 30 A deşarj akımı altında yalın ve grafit/FDM batarya paketlerinin elektriksel performansları karşılaştırılmaktadır. Şekil 62(a) ve 62(b)'de gerilim-zaman değişimleri gösterilmektedir. Şekil 62(a) ve 62(b)'den 50 g/L , 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerinin başlangıç gerilimlerinin zamanla azalarak sırasıyla 1303 s , 1309 s ve 1312 s çalışma süresi sonunda alt kesme gerilim değeri olan $16,8\text{ V}$ 'ye ulaştığı görülmektedir. Fakat yalın batarya paketinin ve farklı yığın yoğunluğundaki grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin hücre sıcaklıklardan en az birisinin 60°C 'ye daha önce ulaşması nedeniyle testler alt kesme gerilim değerine ulaşmadan sonlandırılmıştır. Test yalın batarya paketi için 685 s sonunda $20,275\text{ V}$ 'de sonlandırılmışken, grafit(50 g/L)/FDM(RT-35) kompozit batarya paketi için 1141 s sonunda $17,65\text{ V}$ 'ye ulaştığında sonlandırılmıştır. Grafit(75 g/L)/FDM(RT-35) ve grafit(100 g/L)/FDM(RT-35) batarya paketleri için çalışma süreleri ve ulaştıkları gerilim değerleri sırasıyla 1098 s sonunda $17,81\text{ V}$ ve 1118 s sonunda $17,49\text{ V}$ olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri yalın batarya paketi ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerine kıyasla ortalama çalışma süreleri açısından sırasıyla %91 ve %17 daha uzun faaliyet göstererek önemli derecede üstünlük sağlamıştır.

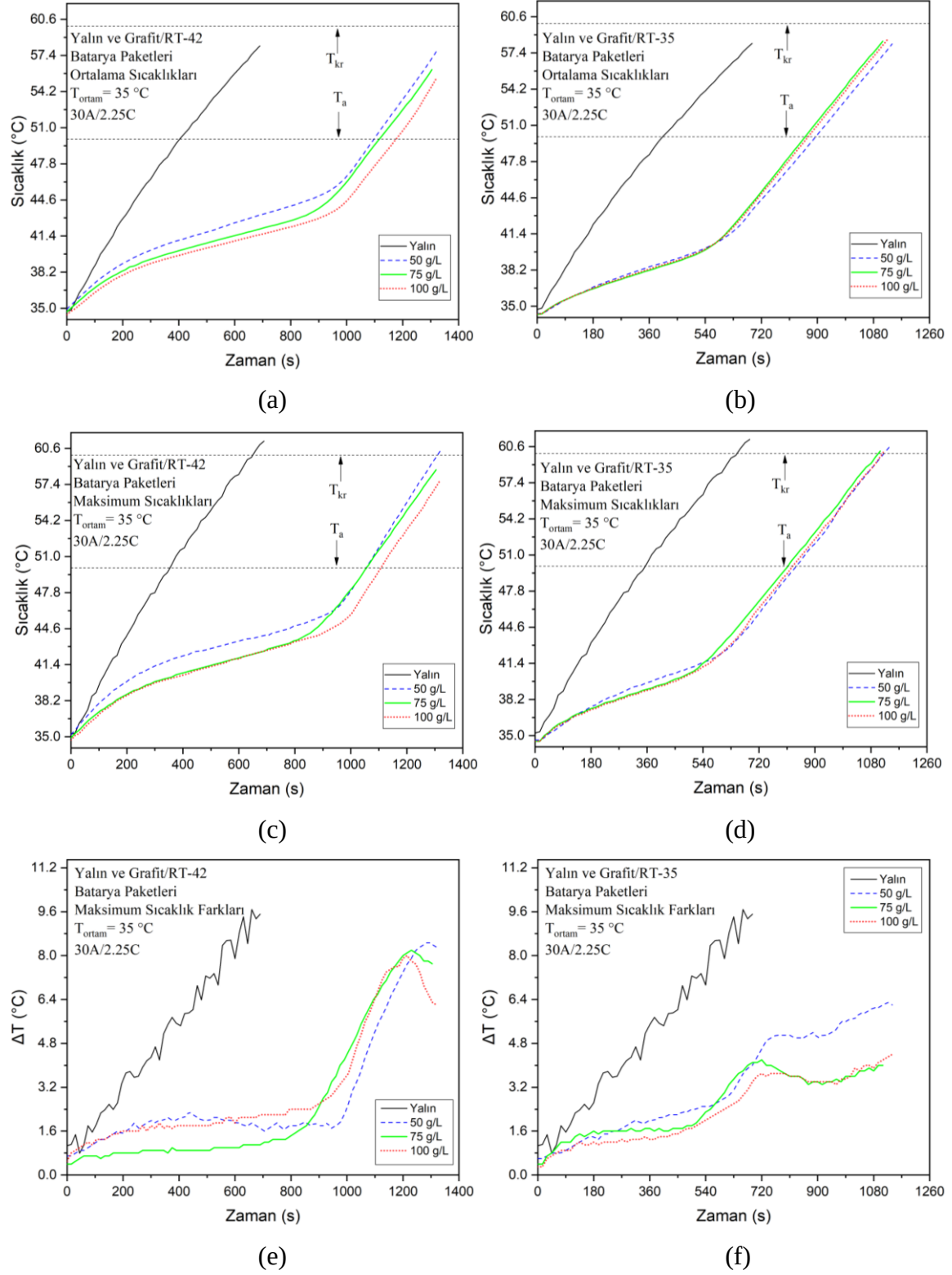
Şekil 62(c) ve 62(d)'de batarya paketlerinin deşarj kapasitelerinin paket gerilimine bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 62(e) ve 62(f)'de batarya paketlerinin sunduğu enerji kapasitesi değerlerinin paket gerilimine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yalın batarya paketi için ulaşılan kapasite ve enerji kapasitesi değerleri $5,71\text{ Ah}$ ve $122,1\text{ Wh}$ ' dir. Bu değerler grafit(50 g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için $10,87\text{ Ah}$ ve $209,96\text{ Wh}$ olarak bulunmuştur. Grafit(75 g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ve grafit(100 g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değerler sırasıyla $10,94\text{ Ah}$ ve $212,25\text{ Wh}$ ve $10,95\text{ Ah}$ ve $211,87\text{ Wh}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50 g/L)/FDM(RT-35) için $9,52\text{ Ah}$ ve $186,3\text{ Wh}$, grafit(75 g/L)/FDM(RT-35) için $9,16\text{ Ah}$ ve $180,71\text{ Wh}$ ve grafit(100 g/L)/FDM(RT-35) için ise $9,33\text{ Ah}$ ve $183,1\text{ Wh}$ olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri yalnızca uzun çalışma süreleri bakımından değil ayrıca test sonunda ulaştıkları kapasite ve enerji kapasitesi bakımından da diğer batarya paketlerinden üstündür. Yalın batarya paketine göre grafit/FDM(RT-42) batarya paketi deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi için sırasıyla %91 ve %71' lik bir iyileşme sağlamışken, bu iyileşme grafit/FDM(RT-35) batarya paketine göre sırasıyla %17 ve %15 olarak bulunmuştur.



Şekil 62. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (35°C , 30A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi

Şekil 63' de 25°C ortam sıcaklığı ve 30 A deşarj akımı altında yalın batarya paketi ve kompozit grafit/FDM batarya paketlerine ait ısı performanslar gösterilmektedir. Şekil 63(a) ve Şekil 63(b)'de batarya paketlerinin sıcaklık ortalaması eğrileri verilmiştir. Şekil 63(c) ve Şekil 63(d)'de ise batarya paketlerinin maksimum sıcaklıkları sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde yalın batarya paketi ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için ortalama ve maksimum sıcaklık değerlerinin alt kesme gerilim değerinden önce 60 °C'ye ulaştığı görülür. Farklı yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri ise hücre sıcaklıkları 60 °C ulaşmadan önce alt kesme gerilim değerine ulaşmıştır. Sadece 50 g/L yığın yoğunluğuna sahip batarya paketinin maksimum sıcaklık değeri test sonu son sıcaklık ölçümünde 60,4 °C'ye ulaşmışna rağmen, deşarj testi batarya paketi alt kesme gerilim değerine ulaşınca sonlandırılmıştır. Kompozit grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri için faz değişimi 200. s'den sonra açıkça görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık olarak 950 s – 950 s sonra faz değişim sıcaklık üst değeri olan 43 °C aşıldığından sıcaklık artış hızları yükselmiştir. Kompozit grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için faz değişimi 0 s - 580 s arasında gerçekleşmiştir. Bu aralık aşıldığında ise sıcaklık artış hızı oldukça yükselmiştir.

Şekil 63(e) ve Şekil 63(f)'den batarya paketlerinin hücreleri arası maksimum sıcaklık farkı görülmektedir. Yalın batarya paketinde bu değer test boyunca artış eğilimindeyken, grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinde farklı eğilimler tespit edilmiştir. Grafit/(RT-42) batarya paketlerinde kompozit yapının gizli ısı depolamaya başlamasıyla faz değişim aralığında maksimum sıcaklık farkı artış hızı düşmüştür. Faz değişimi sona erdiğinde ise sıcaklık farkında tekrardan belirgin bir artış meydana gelmiştir. Test sonunda, sıcaklık farkında meydana gelen düşüş ise ısı üretimi etkisiyle maksimum ve minimum yerel sıcaklık ölçüm noktaları arasındaki farkın kapanması ile açıklanır. Grafit/FDM(RT-35) batarya paketinde ise maksimum sıcaklık farkının faz değişim aralığına kadar ki artış hızı faz değişim aralığında azalmış, faz değişimi sona erince artış göstermiştir. Daha sonra ise tekrar bir azalış ve ardından tekrar yükseliş göstermiştir. Bu çalışmayı doğrulayacak şekilde, literatürde faz değiştiren malzemelerin silindirik LIB'ler için kullanıldığı çalışmalarda da faz değişim aralığı içerisinde batarya hücreleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı (ΔT) veya maksimum sıcaklık farkı artış hızı azalmıştır. Ayrıca bu tez kapsamında yapılan çalışmalara benzer şekilde, faz değişim aralığı aşıldığı durumlarda maksimum sıcaklık farkı (ΔT)'nin artış ve azalış gösterdiği belirlenmiştir (Li vd., 2017; Li vd., 2024a).



Şekil 63. Batarya paketlerinin (35 °C, 30 A) ısıl performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları

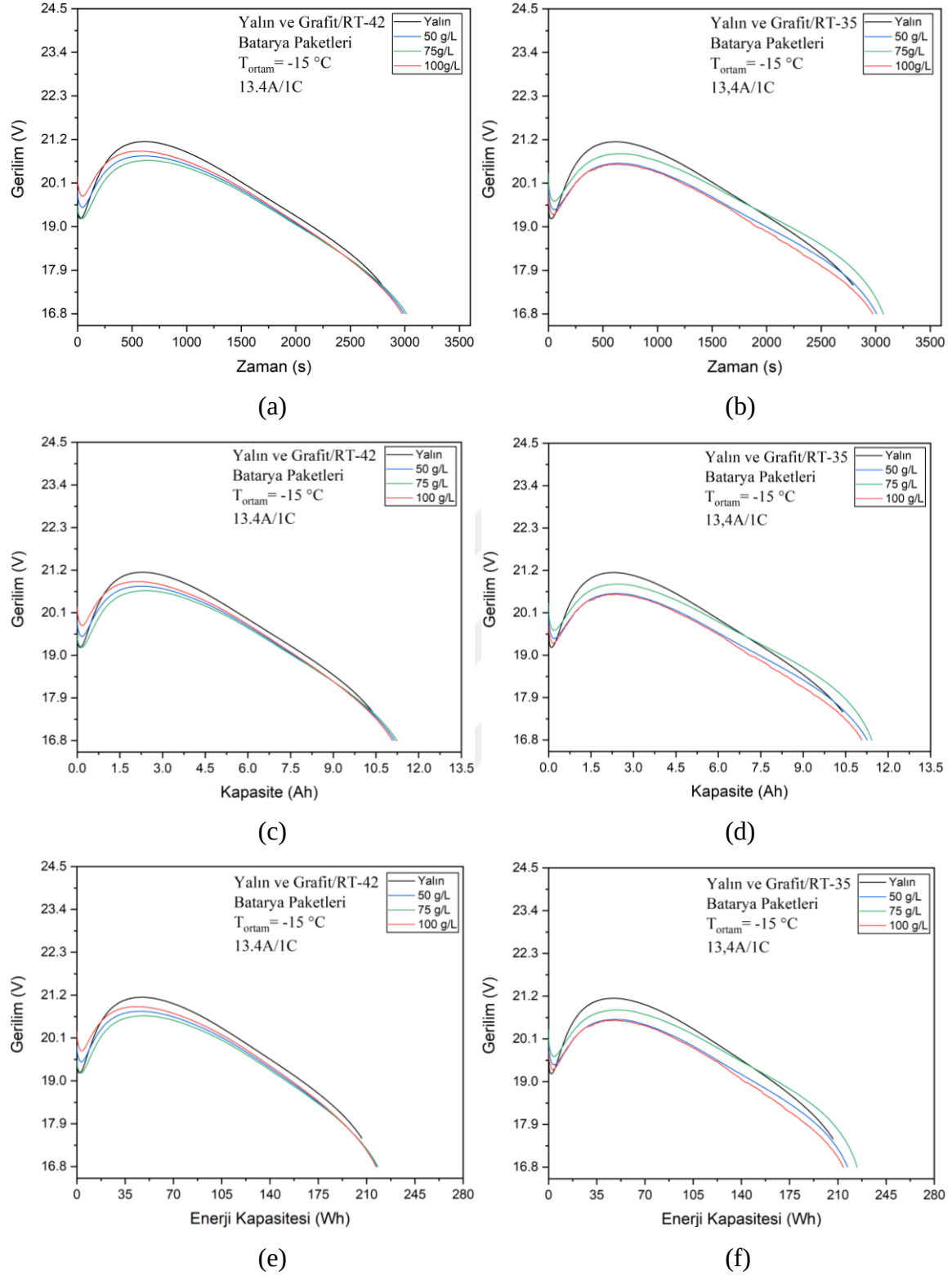
Yapılan testler sonucunda, yalın batarya paketi için maksimum çalışma sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı değerleri sırasıyla 61,2 °C ve yaklaşık olarak 9,5 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 60,4 °C ve 8,5 °C olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse 58,7 °C ve 8,2 °C ve 57,8 °C ve 8 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için bu değerler 60,6 °C ve 6,3 °C iken, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) batarya paketi için 60,2 °C ve 4 °C ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) içinse 60,3 °C ve 4,3 °C'dir. Sonuç olarak, grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri yalın batarya paketine kıyasla ortalama %91 daha uzun süre faaliyet göstererek maksimum sıcaklık açısından ortalama %3,64'lük bir sıcaklık düşüşü sağlamıştır. Ayrıca, grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerine göre ortalama %17 daha uzun süre deşarja maruz kalmasına rağmen, ortalama maksimum sıcaklık değerini % 2.32 oranında düşürmeyi başarmıştır. Ortalama %91 daha uzun çalışma süreleri ile grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerlerinde de yalın batarya paketine kıyasla %10,53 bir iyileşme sağlamıştır. Grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri arasında maksimum sıcaklık farkı (ΔT) için yapılan kıyaslamada grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin daha düşük sıcaklık farkları sağladığı görülmüştür. Fakat bu durum tamamen grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerine kıyasla %17 daha az faaliyet süreleriyle ilişkili olduğundan değerlendirmeye alınmamıştır.

3.6.5. Performans Testi, Tortam = -15 °C ve I = 13,4 A (1 C)

Şekil 64' de -15°C ortam sıcaklığı ve 13,4 A deşarj akımı altında yalın ve grafit/FDM batarya paketlerinin elektriksel performansları karşılaştırılmaktadır. Şekil 64(a) ve 64(b)'de gerilim-zaman değişimleri gösterilmektedir. Şekillerden 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin başlangıç gerilimlerinin daha öncede bahsedildiği üzere düşük hücre sıcaklıklarından kaynaklanan yüksek iç dirençler sebebiyle ilk periyotta hızla düştüğü görülmektedir. İlerleyen periyotta ise batarya paketinden güç çekilmesiyle hücrelerin ısınmasına bağlı olarak gerilim değerlerinin arttığı olduğu görülmektedir. Sonrasında tekrardan $T > 0$ °C durumlarına benzer olarak gerilim değerleri sürekli olarak azalarak alt kesme gerilim değerine ulaşmaktadır. Tüm kompozit batarya paketlerinde alt kesme gerilim değeri 16,8 V, yalın batarya paketi deşarj testinde alt kesme gerilim değeri 17,5 V'dir. Alt kesme gerilimine

ulaşmak için harcanan çalışma süresi yalın batarya paketi için 2791 s'dir. 50 g/L, 75 g/L, 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse bu süreler sırasıyla 2994 s, 3017 s ve 2975 s olarak bulunmuştur. Ayrıca, 50 g/L, 75 g/L, 100 g/L yığın yoğunluklarına sahip grafit/FDM(RT- 35) batarya paketleri için çalışma süreleri sırasıyla 3009 s, 3070 s, 2974 s olarak ölçülmüştür.

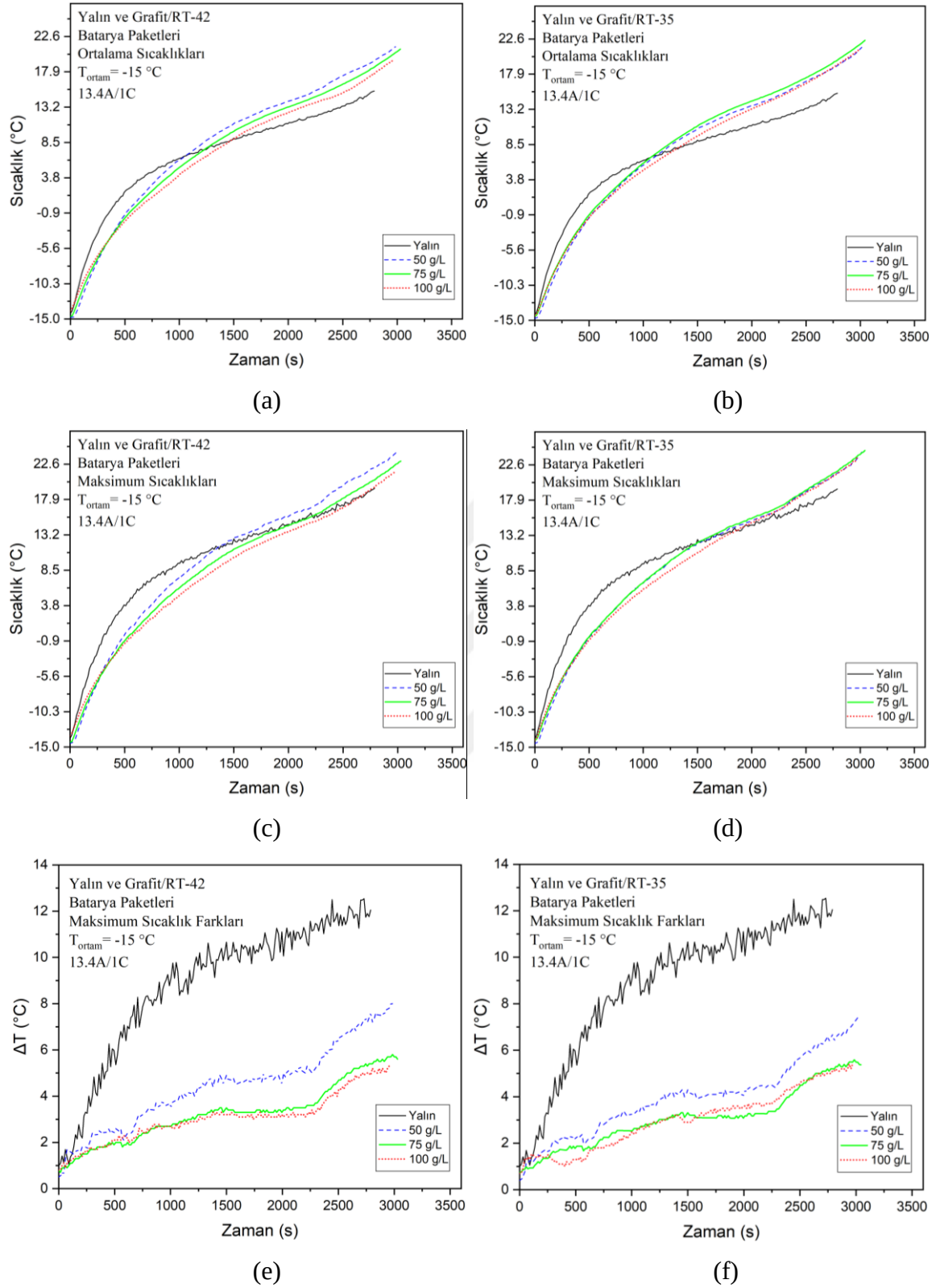
Şekil 64(c) ve 64(d)'de batarya paketlerinin deşarj kapasitelerinin paket gerilimine bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 64(e) ve 64(f)'de batarya paketlerinin sunduğu enerji kapasitesi değerlerinin paket gerilimine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yalın batarya paketi için ulaşılan kapasite ve enerji kapasitesi değerleri 10,39 Ah ve 206,5 Wh' dir. Bu değerler grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 11,15 Ah ve 217,3 Wh olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi içinse bu değerler sırasıyla 11,24 Ah ve 218,17 Wh ve 11,08 Ah ve 216,9 Wh olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için 11,26 Ah ve 217,1 Wh, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) için 11,43 Ah ve 224,1 Wh ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) için ise 11,08 Ah ve 214 Wh olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin elektriksel performansları birbirine oldukça yakındır. Şekil 64'den gerilime bağlı olarak zaman, kapasite ve enerji kapasitesi değerleri incelendiğinde aynı çalışma süreleri için yalın batarya paketinin elektriksel performansının da kompozit batarya paketlerine yakın olduğu anlaşılr. Ayrıca $T < 0$ (-15 °C, 13,4 A) çalışma koşullarının 16.8 V başlangıçtan itibaren 16.8 V alt kesme gerilim değerine ulaşmak için harcanan çalışma süresini, kapasiteyi ve enerji kapasitesi değerlerini oldukça sınırladığı görülmüştür. Örnek verecek olursak, 35 °C ortam sıcaklığı 13,4 A deşarj akımı altında çalışma süresi 3300 s'den fazlayken, kapasite ve enerji kapasitesi değerleri ise sırasıyla 12,5 Ah ve 260 Wh değerinden fazladır.



Şekil 64. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (-15 °C, 13,4 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman, (c) ve (d) Gerilim-kapasite , (e) ve (f) Gerilim-enerji kapasitesi

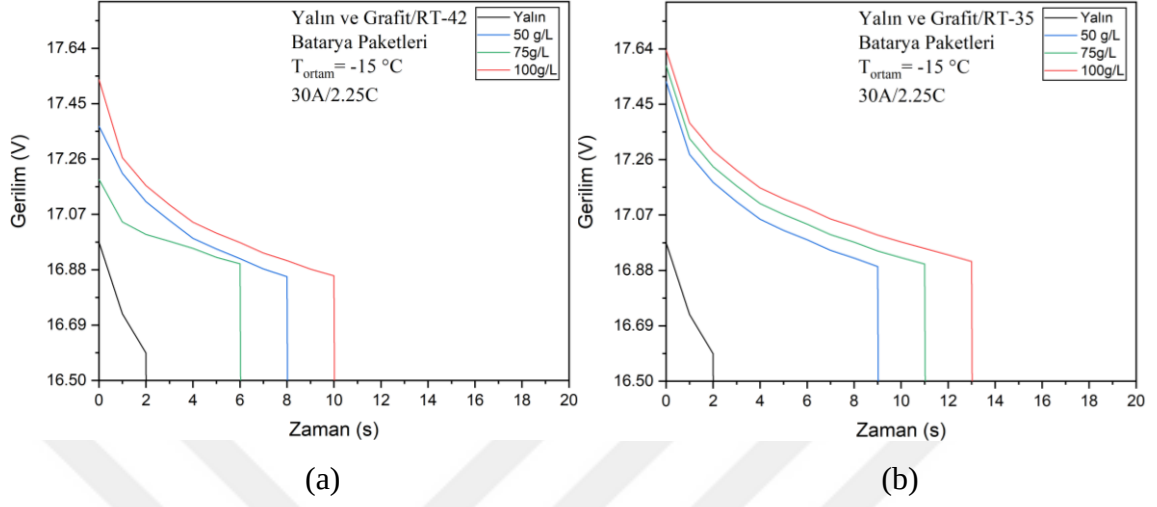
Şekil 65' de -15°C ortam sıcaklığı ve 13,4 A deşarj akımı altında yalın ve grafit/FDM batarya paketlerine ait ısı performanslar gösterilmektedir. Şekil 65(a) ve 65(b)'de test süresince batarya paketlerinin ortalama sıcaklıkları gösterilirken, Şekil 65(c) ve Şekil 65(d)'de ise maksimum sıcaklıkları sunulmuştur. Şekillerden görüldüğü üzere yalın batarya paketinin ortalama ve maksimum hücre yüzey sıcaklıkları başlangıçtan itibaren kompozit batarya paketlerine göre daha hızlı artmış ve 0°C üzerine çıkmıştır. Bu durum düşük sıcaklığın olumsuz etkilerinden kurtulmak için yalın batarya paketinin kompozit batarya paketlere göre daha hızlı tepki verdiğini ve daha üstün olduğunu gösterir. Kompozit batarya paketlerinin sıcaklığının daha geç artması ise batarya paketlerinde hücre yüzeylerine temas eden yapıların hücre yüzeylerinden iletimle ısı transfer etmeleri ve bünyelerinde ısı depolamaları ile alakalıdır. Fakat çalışma süresinin ilerlemesi ile yalın batarya paketinin ortalama sıcaklıkları yaklaşık 1000 s sonra maksimum sıcaklıkları ise 1500 s sonra hem grafit/FDM(RT-42) hem de grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerine benzer değerlere yaklaşmış bu aralıklardan sonra ise kompozit yapılardan daha düşük değerler almıştır. Bu durum ise kompozit yapıların belirli bir noktadan sonra düşük sıcaklık ortam ile hücre yüzeyleri arasında yalıtım görevi yapması ile açıklanır. Dolayısı ile test geneli ele alındığında ortalama ve maksimum sıcaklık değerleri açısından optimum çalışma sıcaklık aralığı olan $15^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ 'ye daha yakın hücre yüzey sıcaklıkları sağlayan kompozit batarya paketleri daha üstündür.

Şekil 65(e) ve 65(f)'de batarya paketlerinde hücreler arası maksimum sıcaklık farkı değerleri gösterilmektedir. Grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketleri için 75 g/L ve 100 g/L batarya paketlerine göre 50 g/L yığın yoğunluklarının maksimum sıcaklık farkları daha yüksek olduğundan performansları daha düşüktür. Yalın batarya paketi için maksimum sıcaklık farkı değerleri sırasıyla $12,3^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer grafit(50g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi için 8°C olarak bulunmuştur. Grafit(75g/L)/FDM(RT-42) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketleri içinse $5,7^{\circ}\text{C}$ ve $5,3^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, grafit(50g/L)/FDM(RT-35) için bu değerler $47,2^{\circ}\text{C}$ ve $3,1^{\circ}\text{C}$ iken, grafit(75g/L)/FDM(RT-35) ve grafit(100g/L)/FDM(RT-35) içinse sırasıyla $47^{\circ}\text{C}/1,5^{\circ}\text{C}$ ve $47,1^{\circ}\text{C}/1,6^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sonuç olarak, 35°C ve 13,4 A çalışma koşulları altında, grafit/FDM(RT-42) batarya paketi kullanımı ile yalın batarya paketine kıyasla maksimum çalışma sıcaklığında %21,2 ve maksimum sıcaklık farkında ise %82,5'lik bir düşüş sağlanmıştır.



Şekil 65. Batarya paketlerinin (-15°C , 30 A) ısıl performansları (a) ve (b) Ortalama sıcaklıklar, (c) ve (d) Maksimum sıcaklıklar, (e) ve (f) Maksimum sıcaklık farkları

3.6.6. Performans Testi, $T_{\text{ortam}} = -15^{\circ}\text{C}$ ve $I = 30\text{A}$ (2,25 C)



Şekil 66. Batarya paketlerinin elektriksel performansları (-15°C , 30 A) (a) ve (b) Gerilim-zaman

Şekil 66(a) ve Şekil 66(b)'de -15°C ortam sıcaklığı ve 30 A deşarj akımı altında yalın ve grafit/FDM batarya paketlerinin gerilim-zaman eğrileri karşılaştırılmaktadır. Şekillerden 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM(RT-42) ve grafit/FDM(RT-35) batarya paketlerinin başlangıç gerilimlerinin düşük hücre sıcaklıklarından kaynaklanan yüksek iç dirençler ve yüksek deşarj akımı nedeniyle hızla düştüğü görülmektedir. Bu düşüş tüm durumlar için ilk 15 s içerisinde alt kesme değeri olan 16,8 V değerine ulaşmış ve testler sonlandırılmıştır. Bu nedenle, 15°C ortam sıcaklığı ve 30 A deşarj akımı test koşulları için batarya paketlerinin elektriksel ve ısıl yönetim performansları arasında karşılaştırma yapılamamıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 50 g/L, 75 g/L ve 100 g/L GG matris yoğunlukları ve iki farklı FDM türü (RT-35 ve RT-42) kullanılarak oluşturulan grafit/FDM kompozit batarya paketlerinin ısı yönetim performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, -15 °C, 25 °C ve 35 °C ortam sıcaklıkları ve iki farklı deşarj oranı altında (13,4 A ve 30 A) gerçekleştirilmiştir. Kompozit batarya paketleri 6S4P yapılandırmasına sahip olup, 24 adet silindirik hücrenin 9 adet KFDM yapı içerisine yerleştirilmesiyle hazırlanmıştır. Ayrıca, aynı sayıda hücreden meydana gelen ve aynı yapılandırma ile hazırlanan yalın batarya paketi de kompozit batarya paketlerin ısı performans üzerindeki etkilerini daha belirgin bir şekilde görülebilmek için test edilmiş ve kompozit batarya paketleri ile karşılaştırılmıştır. Performans testlerinin sonuçları gerilim-zaman, gerilim kapasite-kapasite, gerilim-enerji kapasitesi ve hücrelerin sıcaklık-zaman eğrileri üzerinden sunulmuştur. Çalışmaya ait ana bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kompozit grafit/FDM matris yapılar için grafit yığın yoğunluğu değeri arttıkça, FDM sızıntı miktarının ve gözeneklilik ve etkin gözeneklilik değerlerinin azaldığı görülmüştür.
2. Farklı ortam sıcaklıkları ve deşarj akımları altında grafit/FDM kompozit batarya paketlerinin tümü yalın batarya paketine göre daha üstün ısı ve elektriksel performanslar sunmuştur.
3. Grafit/FDM(RT-42) kompozit batarya paketleri için artan yığın yoğunluğunun ısı ve elektriksel performansın iyileşmesi üzerinde etkili olduğu görülürken, grafit/FDM(RT-35) kompozit batarya paketinde ise artan yığın yoğunluğu herhangi bir iyileşme sağlamamıştır.
4. Yalın batarya paketine göre en yüksek performans, 13,4 A deşarj akımı ve 25 °C ortam koşulunda maksimum çalışma sıcaklığında %18,5 ve hücreler arası maksimum sıcaklık farkında %73,6 düşüş sağlanarak grafit(100g/L)/FDM(RT-35) batarya paketi ile elde edilmiştir. 13,4 A deşarj akımı ve 35 °C ortam koşulunda ise maksimum çalışma sıcaklığında %21,1 ve hücreler arası maksimum sıcaklık farkında %82,5 düşüş sağlanarak grafit(75g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi ile elde edilmiştir.
5. Yalın batarya paketi yerine grafit(100g/L)/FDM(RT-42) batarya paketi kullanıldığında 30 A deşarj akımı ve 25 °C ortam koşullarında çalışma sıcaklığı

%21,4 ve maksimum sıcaklık farkı %68,8 oranında düşürülmüştür. 30 A deşarj akımı ve 35 °C ortam sıcaklığı koşullarında ise çalışma süresinin %91 oranında artmasına rağmen, yalın batarya paketine göre maksimum sıcaklıkta %3,64 ve maksimum sıcaklık farkında %10,53 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, bu batarya paketi kullanılarak 13,4 A deşarj akımı ve -15°C ortam sıcaklığı koşullarında diğer tüm batarya paketlerine göre en düşük maksimum sıcaklık farkı elde edilmiştir ve yine bu batarya paketi ile farklı testler için sürekli yüksek kapasite ve enerji kapasitesi değerlerine ulaşılmıştır. Böylece, grafit(100g/L)/FDM(RT-42) kompozit batarya paketinin batarya ısı yönetim sistemi için en ideal seçenek olduğu görülmüştür.

6. 30 A deşarj akımı ve 25 °C ortam sıcaklığı test koşulları için ve 30 A deşarj akımı ve 35 °C ortam sıcaklığı test koşulları için yalın batarya paketi ile ulaşılan yüksek sıcaklık değerlerine bağlı olarak, yalın batarya paketinin gerilim değerlerinin aynı zaman aralığında kompozit bataryalarinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.
7. 0 °C'nin altındaki ortam sıcaklıkları, 0 °C'nin üzerindeki ortam sıcaklıklarına kıyasla daha düşük güvenilir çalışma süresi, deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesine neden olarak batarya paketi performansını önemli ölçüde kısıtlamıştır.
8. -15 °C ve 30 A deşarj testi için hem yalın batarya paketinin hem de kompozit grafit/FDM batarya paketlerinin gerilim değerleri ilk 15 s içerisinde alt kesme gerilim değeri olan 16,8 V'ye ulaşmıştır. Bu nedenle, batarya paketleri arasında karşılaştırma yapılamamıştır.
9. Farklı yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerinin hücreleri arası maksimum sıcaklık farklarının 13,4 A deşarj akımı altında 35 °C ortam testi için 25 °C ortam testine göre daha düşük olduğu bulunmuşken, 30 A deşarj akımı altında sıcaklığın 35 °C'ye yükselmesi ile sıcaklık farklarının da arttığı görülmüştür.
10. Kompozit batarya paketlerinin kapasite, enerji kapasitesi ve çalışma süreleri yüksek çalışma sıcaklıkları (35°C) ile artış göstermiştir. Ancak, farklı yığın yoğunluklarındaki grafit/FDM (RT-35) paketleri 30 A deşarj akımı altında 35 °C ortam testi için alt kesme gerilim değerinden önce 60°C' ye ulaştığı için bu artışlar gözlemlenmeden testlerin sona erdiği görülmüştür.

11. Yüksek deşarj akımları altında hücreleri maksimum kritik çalışma sıcaklığı olan 60 °C altında tutan grafit/FDM(RT-42) batarya paketlerinin ısıl sürüklenme riskini ve güvenlik endişelerini azalttığı görülmüştür.



5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, kompozit grafit/FDM batarya paketlerinin ısı ve elektriksel davranışları farklı grafit yığın yoğunlukları, FDM türleri, ortam sıcaklıkları ve deşarj akımı değerleri için deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen konu ile ilgili aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur:

1. Belirli aralıklarla grafit matrisler içerisinde sıcaklık ölçümleri kaydedilip farklı yığın yoğunlukları ve FDM'lerden oluşan kompozit yapıların içerisinde bulunan FDM'nin sızılama oranı ve hızı incelenebilir.
2. Farklı gizli ısı depolama kapasitelerine sahip FDM'lerin kompozit batarya paketlerinin ısı ve elektriksel davranışı üzerindeki etkileri incelenebilir.
3. Kompozit batarya paketleri için FDM içerisine nano-parçacık ilave edilerek batarya ısı performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
4. Farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM'lerin kompozit batarya paketlerinin ısı ve elektriksel performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
5. Isı depolayıcı malzemeler olarak parafin dışı ve inorganik FDM'ler kullanılarak bu ısı depolayıcıların kompozit batarya ısı performansı üzerindeki etkisi incelenebilir.
6. Farklı hacimlere sahip kompozit batarya paketleri için çalışma gerçekleştirilerek hacmin batarya ısı performans yönetimi üzerindeki etkisi incelenebilir.
7. Mevcut deneysel çalışma konusu ile ilgili bir sayısal çalışma gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılabilir. Elektriksel açıdan sayısal olarak modellenilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Akturk, A. (2015). *The effect of buckling on the interface conductance in flexible lithium-ion batteries*. University of Houston, Yüksek Lisans Tezi, Houston, Texas.
- Aktürk, A., & Türk, S. (2020). Comparison of an interval type-2 fuzzy sets and ahp methods for material selection problem on lithium-ion batteries. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 3(1), 30–46.
- Al-Hallaj, S., & Selman, J. R. (2000). A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(9), 3231.
- Al-Hallaj, S., & Selman, J. R. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/Hybrid Electric Vehicle Applications. *Journal of Power Sources*, 110(2), 341–348.
- Alqaed, S., Almeahadi, F. A., Mustafa, J., Husain, S., & Cheraghian, G. (2022). Effect of nano phase change materials on the cooling process of a triangular lithium battery pack. *Journal of Energy Storage*, 49, 104326.
- Alipanah, M., & Li, X. (2016). Numerical Studies of Lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 1159–1168.
- Alrashdan, A., Mayyas, A. T., & Al-Hallaj, S. (2010). Thermo-mechanical behaviors of the expanded graphite-phase change material matrix used for thermal management of Li-Ion Battery Packs. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1), 174–179.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2017). Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 363, 291–303.
- Asenbauer, J., Eisenmann, T., Kuenzel, M., Kazzazi, A., Chen, Z., & Bresser, D. (2020). The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(11), 5387–5416.
- Awasthi, S. (2024). A review on the optimization of electrolytes to enhance lithium-ion batteries' safety and performance under abuse conditions. *Journal of Energy Storage*, 100, 113439.
- Babu Sanker, S., & Baby, R. (2022). Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers. *Journal of Energy Storage*, 50, 104606.
- Bahiraei, F., Fartaj, A., & Nazri, G. A. (2017). Experimental and numerical investigation on the performance of carbon-based nanoenhanced phase change materials for thermal management applications. *Energy Conversion and Management*, 153, 115–128.

- Bais, A., Subhedar, D., & Panchal, S. (2024). Experimental investigations of a novel phase change material and nano enhanced phase change material based passive battery thermal management system for Li-ion battery discharged at a high C rate. *Journal of Energy Storage*, 103, 114395.
- Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(3), R1-R25.
- Barsotti, D. L., & Boetcher, S. (2014). Novel battery cold plate design for increased passive cooling. SAE Technical Paper Series.
- Bayraktar, F. S., & Köse, R. (2022). Phase change materials: Types, properties and applications in buildings. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 8(1), 190–210.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 3(4), 279–289.
- Cao, W., Zhao, C., Wang, Y., Dong, T., & Jiang, F. (2019). Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138, 1178-1187.
- Chakraborty, A., Noh, J., Mach, R., Shamberger, P., & Yu, C. (2022). Thermal energy storage composites with preformed expanded graphite matrix and paraffin wax for long-term cycling stability and tailored thermal properties. *Journal of Energy Storage*, 52, 104856.
- Chen, K., Chen, Y., Li, Z., Yuan, F., & Wang, S. (2018a). Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 393-401.
- Chen, K., Song, M., Wei, W., & Wang, S. (2018b). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement. *Energy*, 145, 603-613.
- Chen, M., Zhang, S., Wang, G., Weng, J., Ouyang, D., Wu, X., Zhao, L., & Wang, J. (2020). Experimental analysis on the thermal management of lithium-ion batteries based on phase change materials. *Applied Sciences*, 10(20), 7354.
- Chen, X., Zhou, F., Yang, W., Gui, Y., & Zhang, Y. (2022b). A hybrid thermal management system with liquid cooling and composite phase change materials containing various expanded graphite contents for cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117702.

- Chen, Y., Chen, K., Dong, Y., & Wu, X. (2022a). Bidirectional symmetrical parallel minichannel cold plate for energy efficient cooling of large battery packs. *Energy*, 242, 122553.
- Chen, Y., Luo, W., Wang, J., & Huang, J. (2017). Enhanced thermal conductivity and durability of a paraffin wax nanocomposite based on carbon-coated aluminum nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(23), 12603–12609.
- Cheng, C. C., Chang, P. C., Li, H. C., & Hsu, F. I. (2020). Design of a single-phase immersion cooling system through experimental and numerical analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120203.
- Cheng, F., Wen, R., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y., Wu, X., & Min, X. (2017). Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (eg)/paraffin composites for solar energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 120, 107–114.
- Chiu, K.-C., Lin, C.-H., Yeh, S.-F., Lin, Y.-H., Huang, C.-S., & Chen, K.-C. (2014). Cycle Life Analysis of series connected lithium-ion batteries with temperature difference. *Journal of Power Sources*, 263, 75–84.
- Dahlin, G. R., & Strøm, K. E. (2010). *Lithium batteries: Research, technology, and applications*. Nova Science Publishers.
- Da Silva Lima, L., Wu, J., Cadena, E., Groombridge, A. S., & Dewulf, J. (2023). Towards environmentally sustainable battery anode materials: Life cycle assessment of Mixed Niobium Oxide (XNOTM) and lithium-titanium-oxide (LTO). *Sustainable Materials and Technologies*, 37, e00654.
- Deng, D. (2015). Li-Ion batteries: Basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385–418.
- Dinker, A., Agarwal, M., & Agarwal, G. D. (2017). Heat storage materials, geometry and applications: A Review. *Journal of the Energy Institute*, 90(1), 1–11.
- Dolla, D. A., & Fetene, M. G. (2024). Investigations of phase change materials in battery thermal management systems for electric vehicles: A Review. *Materials Research Express*, 11(1), 012002.
- Doyle, M., Fuller, T. F., & Newman, J. (1993). Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(6), 1526–1533.
- Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X., & Yang, S. (2019). Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 155, 96–109.
- Fathabadi, H. (2014). High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active–passive thermal management system for using in Hybrid/Electric Vehicles. *Energy*, 70, 529–538.

- Gan, Y., He, L., Liang, J., Tan, M., Xiong, T., & Li, Y. (2020). A numerical study on the performance of a thermal management system for a battery pack with cylindrical cells based on heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115740.
- GaneshKumar, P., Sivalingam, V., Divya, S., Oh, T. H., Vigneswaran, V. S., & Velraj, R. (2024). Thermophysical Exploration: State-of-the-art review on phase change materials for effective thermal management in lithium-ion battery systems. *Journal of Energy Storage*, 87, 111412.
- Gao, R., Fan, Z., & Liu, S. (2022). A gradient channel-based novel design of liquid-cooled battery thermal management system for thermal uniformity improvement. *Journal of Energy Storage*, 48, 104014.
- Ghaeminezhad, N., Wang, Z., & Ouyang, Q. (2023). A review on Lithium-Ion Battery Thermal Management System Techniques: A control-oriented analysis. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119497.
- Graf, C. (2018). *Cathode materials for lithium-ion batteries, Lithium-ion batteries: basics and applications*. Springer, 29-40.
- Greco, A., & Jiang, X. (2016). A coupled thermal and electrochemical study of lithium-ion battery cooled by paraffin/porous-graphite-matrix composite. *Journal of Power Sources*, 315, 127–139.
- Greco, A., Jiang, X., & Cao, D. (2015). An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite. *Journal of Power Sources*, 278, 50–68.
- Grosu, Y., Zhao, Y., Giacomello, A., Meloni, S., Dauvergne, J.-L., Nikulin, A., Palomo, E., Ding, Y., & Faik, A. (2020). Hierarchical macro-nanoporous metals for leakage-free high-thermal conductivity shape-stabilized phase change materials. *Applied Energy*, 269, 115088.
- Hamed, M. M., El-Tayeb, A., Moukhtar, I., El Dein, A. Z., & Abdelhameed, E. H. (2022). A review on recent key technologies of lithium-ion battery thermal management: External Cooling Systems. *Results in Engineering*, 16, 100703.
- Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Biswas, N., & Mohammed, H. I. (2023). Thermal performance assessment for an array of cylindrical lithium-ion battery cells using an air-cooling system. *Applied Energy*, 346, 121354.
- Heyhat, M. M., Mousavi, S., & Siavashi, M. (2020). Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. *Journal of Energy Storage*, 28, 101235.
- Hirano, H., Tajima, T., Hasegawa, T., Sekiguchi, T., & Uchino, M. (2014). Boiling liquid battery cooling for electric vehicle. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China.

- Hoffman, Z. J., Shah, D. B., & Balsara, N. P. (2021). Temperature and concentration dependence of the ionic transport properties of poly(ethylene oxide) electrolytes. *Solid State Ionics*, 370, 115751.
- Huang, R., Li, Z., Hong, W., Wu, Q., & Yu, X. (2020). Experimental and numerical study of PCM thermophysical parameters on lithium-ion battery thermal management. *Energy Reports*, 6, 8–19.
- Huang, Y.-H., Cheng, W.-L., & Zhao, R. (2019). Thermal management of Li-ion battery pack with the application of flexible form-stable composite phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 182, 9–20.
- Hunt, I. (2017). *Thermal effects and management of lithium ion batteries for Automotive Applications*. Imperial College London, Doktora Tezi, Londra.
- Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., & Zhao, J. (2015). Investigation of Power Battery Thermal Management by using mini-channel Cold Plate. *Energy Conversion and Management*, 89, 387–395.
- Hussain, A., Abidi, I. H., Tso, C. Y., Chan, K. C., Luo, Z., & Chao, C. Y. H. (2018). Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials. *International Journal of Thermal Sciences*, 124, 23–35.
- Hussain, A., Shahid, H., Ali, I., & Ali, H. M. (2023). Passive Thermal Management System of lithium-ion batteries employing metal foam/ PCM composite for the development of electric vehicles. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 505–522.
- Hussain, A., Tso, C. Y., & Chao, C. Y. H. (2016). Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite. *Energy*, 115, 209–218.
- Itani, K., & De Bernardinis, A. (2023). Review on new-generation batteries technologies: Trends and future directions. *Energies*, 16(22), 7530.
- Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., & Mierlo, J. (2018). Phase-change materials (PCM) for Automotive Applications: A Review. *Applied Thermal Engineering*, 132, 308–320.
- Janek, J., & Zeier, W. G. (2016). A solid future for battery development. *Nature Energy*, 1(9).
- Javani, N., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2014). New latent heat storage system with nanoparticles for thermal management of electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 268, 718–727.
- Jiang, G., Huang, J., Fu, Y., Cao, M., & Liu, M. (2016). Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-Ion Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1119–1125.

- Jiaqiang, E., Han, D., Qiu, A., Zhu, H., Deng, Y., Chen, J., Zhao, X., & Zuo, W. (2018). Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 132, 508-520.
- Jilte, R., Afzal, A., & Panchal, S. (2021). A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials. *Energy*, 219, 119564.
- Jilte, R. D., Kumar, R., & Ahmadi, M. H. (2019). Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118131.
- Jindal, P., Katiyar, R., & Bhattacharya, J. (2022). Evaluation of accuracy for Bernardi equation in estimating heat generation rate for continuous and pulse-discharge protocols in LFP and NMC based Li-Ion Batteries. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117794.
- Jithin, K. V., & Rajesh, P. K. (2022). Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122608.
- Kharabati, S., & Saedodin, S. (2024). A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries. *Journal of Energy Storage*, 75, 109586.
- Khateeb, S. A., Amiruddin, S., Farid, M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2005). Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation. *Journal of Power Sources*, 142(1-2), 345-353.
- Khateeb, S. A., Farid, M. M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2004). Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. *Journal of Power Sources*, 128(2), 292-307.
- Kim, G.-H., & Pesaran, A. (2007). Battery Thermal Management Design modeling. *World Electric Vehicle Journal*, 1(1), 126-133.
- Kirad, K., & Chaudhari, M. (2021). Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system. *Journal of Power Sources*, 481, 229016.
- Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M. M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature. *Journal of Power Sources*, 183(1), 370-375.
- Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194(2), 1105-1112.
- Konstantinidis, C. V. (2010). *Integration of thermal energy storage in buildings*. University of Texas, Yüksek Lisans Tezi, Austin, Texas.

- Lai, Y., Wu, W., Chen, K., Wang, S., & Xin, C. (2019). A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144, 118581.
- Lan, C., Xu, J., Qiao, Y., & Ma, Y. (2016). Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. *Applied Thermal Engineering*, 101, 284-292.
- Lavagna, L., Meligrana, G., Gerbaldi, C., Tagliaferro, A., & Bartoli, M. (2020). Graphene and lithium-based battery electrodes: A review of recent literature. *Energies*, 13(18), 4867.
- Li, B., & Xia, D. (2017). Anionic redox in rechargeable lithium batteries. *Advanced Materials*, 29(48), 1701054.
- Li, B., Mao, Z., Song, B., Wang, X., Tian, W., Sun, Q., Wang, Y.-F., & Jin, Z. (2024a). Experimental investigation on Efficient Thermal Management of autonomous underwater vehicle battery packs using anisotropic expanded graphite/paraffin composite materials. *Applied Thermal Engineering*, 242, 122477.
- Li, C., Li, Y., Srinivas, S., Zhang, J., Qu, S., & Li, W. (2021b). Mini-channel liquid cooling system for improving heat transfer capacity and thermal uniformity in battery packs for electric vehicles. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 18(3), 030905.
- Li, S., Dong, X., Lin, X., Shao, D., Zhang, G., Deng, J., & Yang, X. (2021c). Flexible phase change materials obtained from a simple solvent-evaporation method for battery thermal management. *Journal of Energy Storage*, 44, 103-110.
- Li, W. Q., Qu, Z. G., He, Y. L., & Tao, Y. B. (2014). Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials. *Journal of Power Sources*, 255, 9–15.
- Li, W., Dong, Y., Zhang, X., & Liu, X. (2019b). Preparation and performance analysis of graphite additive/paraffin composite phase change materials. *Processes*, 7(7), 447.
- Li, W., Garg, A., Xiao, M., & Gao, L. (2021a). Optimization for liquid cooling cylindrical battery thermal management system based on Gaussian process model. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 13(2), 021015.
- Li, W., Xiao, M., Peng, X., Garg, A., & Gao, L. (2019a). A surrogate thermal modeling and parametric optimization of battery pack with air cooling for EVs. *Applied Thermal Engineering*, 147, 90-100.
- Li, Y., & Lu, J. (2017). Metal–air batteries: Will they be the future electrochemical energy storage device of choice? *ACS Energy Letters*, 2(6), 1370–1377.
- Li, Y., Du, Y., Xu, T., Wu, H., Zhou, X., Ling, Z., & Zhang, Z. (2017). Optimization of thermal management system for Li-ion batteries using phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 132, 508-520.

- Li, Y., Zhou, Z. F., Hu, L. M., Bai, M. L., Gao, L. S., & Li, Y. L. (2022). Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 102034.
- Li, Z., Zhang, Y., Zhang, S., & Tang, B. (2024b). Phase change materials for lithium-ion battery thermal management systems: A Review. *Journal of Energy Storage*, 80, 110259.
- Liang, Y., Zhao, C., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M., Chueh, Y., Yu, H., & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6–32.
- Lin, C., Xu, S., Chang, G., & Liu, J. (2015). Experiment and simulation of a LiFePO₄ battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets. *Journal of Power Sources*, 275, 742–749.
- Ling, Z., Chen, J., Fang, X., Zhang, Z., Xu, T., Gao, X., & Wang, S. (2014). Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system. *Applied Energy*, 121, 104–113.
- Ling, Z., Wen, X., Zhang, Z., Fang, X., & Gao, X. (2018). Thermal management performance of phase change materials with different thermal conductivities for Li-ion battery packs operated at low temperatures. *Energy*, 144, 977–983.
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in Battery Thermal Management Systems: A Review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304–330.
- Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for Electric Vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058–4084.
- Lu, Z., Yu, X., Wei, L., Qiu, Y., Zhang, L., Meng, X., et al. (2018). Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement. *Applied Thermal Engineering*, 136, 28–40.
- Luo, X., Guo, Q., Li, X., Tao, Z., Lei, S., Liu, J., Kang, L., Zheng, D., & Liu, Z. (2020). Experimental investigation on a novel phase change material composites coupled with graphite film used for thermal management of lithium-ion batteries. *Renewable Energy*, 145, 2046–2055.
- Lv, Y., Situ, W., Yang, X., & Zhang, G. (2018). A novel nanosilica-enhanced phase change material with anti-leakage and anti-volume-changes properties for battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 163, 250–259.
- Lv, Y., Yang, X., Li, X., & Zhang, G. (2016). Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins. *Applied Energy*, 178, 376–382.

- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2021). Experimental investigation of thermoelectric cooling for a new battery pack design in a copper holder. *Results in Engineering*, 10, 100214.
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A Review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653–666.
- Ma, Y., Zhang, S., Hu, S., Liu, X., & He, S. (2022). A copper nanoparticle enhanced phase change material with high thermal conductivity and latent heat for battery thermal management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 78, 104–110.
- Maiorino, A., Cilenti, C., Petruzzello, F., & Aprea, C. (2024). A review on thermal management of battery packs for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 238, 122035.
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A., Mathew, M., & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472–481.
- Mallow, A., Abdelaziz, O., & Graham, S. (2016). Thermal charging study of compressed expanded natural graphite/phase change material composites. *Carbon*, 109, 495–504.
- Mei, J., Shi, G., Liu, H., Wang, Z., & Chen, M. (2022). Investigation on the optimization strategy of Phase Change Material Thermal Management System for lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, 55, 105365.
- Mills, A., & Al-Hallaj, S. (2005). Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 141(2), 307–315.
- Mills, A., Farid, M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2006). Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix. *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1652–1661.
- Mohammed, A. H., Esmaeeli, R., Aliniagerdroudbari, H., Alhadri, M., Hashemi, S. R., Nadkarni, G., & Farhad, S. (2019). Dual-purpose cooling plate for thermal management of prismatic lithium-ion batteries during normal operation and thermal runaway. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114106.
- Mortazavi, B., Yang, H., Mohebbi, F., Cuniberti, G., & Rabczuk, T. (2017). Graphene or h-BN paraffin composite structures for the thermal management of Li-ion batteries: A multiscale investigation. *Applied Energy*, 202, 323–334.
- Motloch, C. G., Christophersen, J. P., Belt, J. R., Wright, R. B., Hunt, G. L., Sutula, R. A., Duong, T., Tartamella, T. J., Haskins, H. J., & Miller, T. J. (2002). High-power battery testing procedures and analytical methodologies for HEV's. *SAE Technical Paper Series*.
- Murashko, K. (2016). *Thermal modelling of commercial lithium-ion batteries*. Lappeenranta University of Technology, Doktora Tezi, Lappeenranta.

- Nelson, P., Dees, D., Amine, K., & Henriksen, G. (2002). Modeling thermal management of lithium-ion PNGV batteries. *Journal of Power Sources*, 110(2), 349-356.
- Nguyen, T. T. D. (2021). *Understanding and modelling the thermal runaway of Li-ion batteries*. Université de Picardie Jules Verne, Doktora Tezi, Amiens.
- Olabi, A. G., Maghrabie, H. M., Adhari, O. H. K., Sayed, E. T., Yousef, B. A. A., Salameh, T., Kamil, M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Battery thermal management systems: Recent progress and challenges. *International Journal of Thermofluids*, 14, 100171.
- Osmani, K., Alkhedher, M., Ramadan, M., Choi, D. S., Li, L. K. B., Doranehgard, M. H., & Olabi, A.-G. (2023). Recent progress in the thermal management of lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136024.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. F. (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.
- Padhi, A. K., Nanjundaswamy, K. S., & Goodenough, J. B. (1997). Phospho-Olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 144(4), 1188–1194.
- Pan, M., & Lai, W. (2017). Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation capability of Li-Ion Battery. *Renewable Energy*, 114, 408–422.
- Panasonic. (t.y.). *Specifications for NCR18650GA*.: <https://www.orbtronic.com/content/Datasheet-specs-Sanyo-Panasonic-NCR18650GA-3500mah.pdf> adresinden alınmıştır.
- Patil, M. S., Seo, J.-H., Panchal, S., & Lee, M.-Y. (2020). Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 155, 119728.
- Peng, X., Ma, C., Garg, A., Bao, N., & Liao, X. (2019). Thermal performance investigation of an air-cooled lithium-ion battery pack considering the inconsistency of battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 153, 596-603.
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377–382.
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.
- Planté, M. G. (1860). New secondary pile of great power. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 19(129), 468–469.

- Ramadass, P., Haran, B., White, R., & Popov, B. N. (2002). Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures. *Journal of Power Sources*, 112(2), 606–613.
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of Power Battery Thermal Energy Management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554–4571.
- Rao, Z., Qian, Z., & Kuang, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514–1522.
- Rubitherm. (2024, Nisan 18). *Rubitherm RT-35 Data Sheet*. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35_EN_18042024.PDF adresinden alınmıştır.
- Rubitherm. (2020, Ekim 9). *Rubitherm RT-42 Data Sheet*. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT42_EN_09102020.PDF adresinden alınmıştır.
- Sarma, D. D., & Shukla, A. K. (2018). Building Better Batteries: A travel back in Time. *ACS Energy Letters*, 3(11), 2841–2845.
- Scrosati, B. (2011). History of lithium batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 15(7-8), 1623–1630.
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: *Status, prospects and future*. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- Shi, J.-N., Ger, M.-D., Liu, Y.-M., Fan, Y.-C., Wen, N.-T., Lin, C.-K., & Pu, N.-W. (2013). Improving the thermal conductivity and shape-stabilization of phase change materials using nanographite additives. *Carbon*, 51, 365–372.
- Smith, J., Hinterberger, M., Schneider, C., & Koehler, J. (2016). Energy savings and increased electric vehicle range through improved battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 101, 647–656.
- Spotnitz, R., & Franklin, J. (2003). Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 113(1), 81–100.
- Subramanian, M., Sathanandam, S., Solomon, J. M., Sathyamurthy, R., Dhanraj, J. A., Kalisadan, B., Thakur, A. K., & Said, Z. (2022). Numerical and experimental investigation on enhancing thermal conductivity of paraffin wax with expanded graphene in Battery Thermal Management System. *International Journal of Environmental Research*, 16, 13.
- Sun, Z., Fan, R., & Zheng, N. (2023). Experimental study of battery passive thermal management system using copper foam-based phase change materials. *International Journal of Thermofluids*, 17, 100255.

- Sundin, D. W., & Sponholtz, S. (2020). Thermal management of Li-ion batteries with single-phase liquid immersion cooling. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 1, 82-92.
- Suresh, C., Awasthi, A., Kumar, B., Im, S., & Jeon, Y. (2025). Advances in battery thermal management for electric vehicles: A comprehensive review of hybrid PCM-metal foam and Immersion Cooling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115021.
- Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R. (2024). A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles. *Next Sustainability*, 3, 100036.
- Talele, V., & Zhao, P. (2023). Effect of nano-enhanced phase change material on the thermal management of a 18650 NMC battery pack. *Journal of Energy Storage*, 64, 107068.
- Talluri, T., Kim, T. H., & Shin, K. J. (2020). Analysis of a battery pack with a phase change material for the extreme temperature conditions of an electrical vehicle. *Energies*, 13(3), 507.
- Tang, Z., Li, J., Liu, Z., & Cheng, J. (2021). Thermal performance of a thermal management system with a thin plate and a slender tube for prismatic batteries. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 5347-5358.
- Tang, Z., Wang, S., Liu, Z., & Cheng, J. (2020). Numerical analysis of temperature uniformity of a liquid cooling battery module composed of heat-conducting blocks with gradient contact surface angles. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115509.
- Temel, U. N. (2019). Passive thermal management of a simulated battery pack at different climate conditions. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113796.
- Thackeray, M. M., David, W. I. F., Bruce, P. G., & Goodenough, J. B. (1983). Lithium insertion into manganese spinels. *Materials Research Bulletin*, 18(4), 461-472.
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J.-Y., & Saidur, R. (2020). A state of Art Review and future viewpoint on advance cooling techniques for lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771.
- Väyrynen, A., & Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80-85.
- Villa-Salazar, A. F., Gomez-Miranda, I. N., Romero-Maya, A. F., Velásquez-Gómez, J. D., & Lemmel-Vélez, K. (2024). Optimizing electric racing car performance through telemetry-integrated battery charging: A response surface analysis approach. *World Electric Vehicle Journal*, 15(7), 317.
- Volta, A., & Banks, J. (1800). I. on the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *The Philosophical Magazine*, 7(28), 289-311.

- Wang, C., Zhang, G., Li, X., Huang, J., Wang, Z., Lv, Y., Meng, L., Situ, W., & Rao, M. (2017b). Liquid cooling based on thermal silica plate for battery thermal management system. *International Journal of Energy Research*, 41(15), 2468-2479.
- Wang, J., Xie, H., & Xin, Z. (2009). Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Thermochimica Acta*, 488(1-2), 39-42.
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016a). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of Pure Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128.
- Wang, S., Zhang, D., Li, C., Wang, J., Zhang, J., Cheng, Y., Mei, W., Cheng, S., Qin, P., Duan, Q., Sun, J., & Wang, Q. (2023). Numerical optimization for a phase change material based lithium-ion battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 222, 119839.
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., & Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229-238.
- Wang, Y., Shang, Y., Mao, L., Wang, S., Li, X., & Zhang, C. (2024). A compound self-heater for lithium-ion batteries at low temperature based on electromagnetic induction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Wang, W., Zhang, X., Xin, C., & Rao, Z. (2018). An experimental study on thermal management of lithium ion battery packs using an improved passive method. *Applied Thermal Engineering*, 134, 163-170.
- Wang, Z., Ma, J., & Zhang, L. (2017a). Finite element thermal model and simulation for a cylindrical li-ion battery. *IEEE Access*, 5, 15372-15379.
- Wang, Z., Zhang, Z., Jia, L., & Yang, L. (2015). Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-Ion Battery. *Applied Thermal Engineering*, 78, 428-436.
- Warner, J. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, components, types and terminology*. Elsevier.
- Warrior, D. (2022, February 28). *Alternatives to lithium-ion batteries: CEF explains*. CEEW. <https://www.ceew.in/cef/quick-reads/explains/alternatives-to-lithium-ion-batteries> adresinden alınmıştır.
- Weragoda, D. M., Tian, G., Burkitbayev, A., Lo, K.-H., & Zhang, T. (2023). A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120070.
- Whittingham, M. S. (1976). Electrical Energy Storage and intercalation chemistry. *Science*, 192(4244), 1126-1127.

- Wu, C., Sun, Y., Tang, H., Zhang, S., Yuan, W., Zhu, L., & Tang, Y. (2024). A review on the liquid cooling thermal management system of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 375, 124173.
- Wu, N., Ye, X., Yao, J., Zhang, X., Zhou, X., & Yu, B. (2022). Efficient thermal management of the large-format pouch lithium-ion cell via the boiling-cooling system operated with intermittent flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170, 121018.
- Wu, W., Wu, W., & Wang, S. (2017a). Thermal optimization of composite PCM based large-format lithium-ion battery modules under extreme operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 153, 22–33.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K., & Wang, S. (2017b). Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based Battery Thermal Management System. *Energy Conversion and Management*, 138, 486–492.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for Power Battery Pack. *Energy*, 113, 909–916.
- Wu, X., Mo, C., Xie, J., Xu, Y., Yang, X., & Zhang, G. (2021). Experimental study of a novel strategy to construct the Battery Thermal Management module by using tubular phase change material units. *Journal of Energy Storage*, 39, 102585.
- Xiao, M., Feng, B., & Gong, K. (2002). Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity. *Energy Conversion and Management*, 43(1), 103–108.
- Xin, Q., Xiao, J., Yang, T., Zhang, H., & Long, X. (2022). Thermal management of lithium-ion batteries under high ambient temperature and rapid discharging using composite PCM and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118230.
- Xu, J., Guo, Z., Xu, Z., Zhou, X., & Mei, X. (2023). A systematic review and comparison of liquid-based cooling system for lithium-ion batteries. *eTransportation*, 17, 100242.
- Xu, Y., Li, X., Liu, X., Wang, Y., Wu, X., & Zhou, D. (2021). Experiment investigation on a novel composite silica gel plate coupled with liquid-cooling system for square battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116217.
- Yan, J., Li, K., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2016). Experimental study on the application of phase change material in the dynamic cycling of battery pack system. *Energy Conversion and Management*, 128, 12–19.
- Yang, H., Zhang, G., Yan, X., Dou, B., Zhang, D., Cui, G., & Yang, Q. (2023). Composite phase change materials with carbon foam and fibre combination for efficient battery thermal management: Dual modulation roles of Interfacial Heat Transfer. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 551–563.

- Yang, N., Zhang, X., Shang, B., & Li, G. (2016). Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with Parallel Combination. *Journal of Power Sources*, 306, 733–741.
- Yang, Y., Li, W., Xu, X., & Tong, G. (2020). Heat dissipation analysis of different flow path for parallel liquid cooling battery thermal management system. *International Journal of Energy Research*, 44(7), 5165-5176.
- Yazıcı, M. Y. (2019). *Faz değiştiren madde-ilaveli ısı alıcılarla elektronik cihazların soğutulması*. K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yazici, M. Y. (2022). The effect of a new design preheating unit integrated to graphite matrix composite with phase change battery thermal management in low-temperature environment: An experimental study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29, 101244.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385.
- Yu, Y., Zhang, J., Zhu, M., Zhao, L., Chen, Y., & Chen, M. (2023). Experimental investigation on the thermal management for lithium-ion batteries based on the novel flame retardant composite phase change materials. *Batteries*, 9(7), 378.
- Zare, P., Perera, N., Lahr, J., & Hasan, R. (2022). Solid-liquid phase change materials for the battery thermal management systems in electric vehicles and hybrid electric vehicles – a systematic review. *Journal of Energy Storage*, 52, 105026.
- Zhang, G., Sun, Y., Wu, C., Yan, X., Zhao, W., & Peng, C. (2023). Low-cost and highly thermally conductive lauric acid–paraffin–expanded graphite multifunctional composite phase change materials for quenching thermal runaway of lithium-ion battery. *Energy Reports*, 9, 2538–2547.
- Zhang, J., Li, X., Zhang, G., Wang, Y., Guo, J., Wang, Y., Huang, Q., Xiao, C., & Zhong, Z. (2020). Characterization and experimental investigation of aluminum nitride-based composite phase change materials for Battery Thermal Management. *Energy Conversion and Management*, 204, 112319.
- Zhang, L., Zhang, J., Zhang, G., Hu, R., Jiang, L., Dai, Z., Wen, Y., & Shao, D. (2024b). Experimental study of novel nickel foam-based composite phase change materials for a large-capacity lithium-ion power battery module. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121858.
- Zhang, S., Nie, F., Cheng, J., Yang, H., & Gao, Q. (2024a). Optimizing the air flow pattern to improve the performance of the air-cooling lithium-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 236, 1214.
- Zhang, X., Liu, C., & Rao, Z. (2018). Experimental investigation on thermal management performance of Electric Vehicle Power Battery using composite phase change material. *Journal of Cleaner Production*, 201, 916–924.

- Zhang, Z., Cheng, J., & He, X. (2017). Numerical simulation of flow and heat transfer in composite PCM on the basis of two different models of open-cell metal foam skeletons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 959–97.
- Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Li, C. (2023b). An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119626.
- Zhao, J., Lv, P., & Rao, Z. (2017). Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 182–188.
- Zhao, S., Guo, Z., Yan, K., Wan, S., He, F., Sun, B., & Wang, G. (2021). Towards high-energy-density lithium-ion batteries: Strategies for developing high-capacity lithium-rich cathode materials. *Energy Storage Materials*, 34, 716–734.
- Zhao, Y. (2020). *Battery thermal management using composite phase change materials*. University of Birmingham, Doktora Tezi, Birmingham.
- Zhao, Y., Lin, X., Hu, M., Xu, L., Ding, J., & Ding, Y. (2023a). Development and investigation of form-stable and cyclable decanoic acid-based composite phase change materials for efficient battery thermal management. *Journal of Power Sources*, 558, 232615.
- Zhao, Y., Zou, B., Zhang, T., Jiang, Z., Ding, J., & Ding, Y. (2022). A comprehensive review of composite phase change material based thermal management system for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112667.
- Zhi, M., Fan, R., Yang, X., Zheng, L., Yue, S., Liu, Q., & He, Y. (2022). Recent research progress on phase change materials for thermal management of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 45, 103694.
- Zhi, M., Fan, R., Zheng, L., Yue, S., Pan, Z., Sun, Q., & Liu, Q. (2024). Experimental investigation on hydrated salt phase change material for lithium-ion battery thermal management and thermal runaway mitigation. *Energy*, 307, 132685.
- Zhong, Y., Li, S., Wei, X., Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., & Liu, L. (2010). Heat transfer enhancement of paraffin wax using compressed expanded natural graphite for thermal energy storage. *Carbon*, 48(1), 300–304.
- Zhou, H., Zhou, F., Xu, L., Kong, J., & Yang, Q. (2019). Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 984–998.
- Zhu, L., Boehm, R. F., Wang, Y., Halford, C., & Sun, Y. (2011). Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 538–545.
- Zhu, W., Lei, F., Zhong, H., & Jiang, X. (2022). Thermal performance revival of composite PCM for hybrid btms by architecture and Formula Integrated Optimization. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118320.

- Zou, D., Liu, X., He, R., Zhu, S., Bao, J., Guo, J., Hu, Z., & Wang, B. (2019). Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module. *Energy Conversion and Management*, 180, 1196-1202.
- Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., & Hu, Y. (2018). Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 33-41.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet AKTÜRK, İlköğrenimini Gölçayır İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2006 yılında Affan Kitapçıoğlu Lisesi'nde tamamladı. 2007-2008 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2011 yılında bu bölümden mezun oldu. Takiben, Milli Eğitim Bakanlığı YLSY bursu kapsamında 2012 yılında Yıldız teknik Üniversitesinde 6 ay ve sonrasında Rice University'de 9 ay yabancı dil eğitimi gördü. 2013-2014 Eğitim Yılında University of Houston Cullen Colloge of Engineering'e bağlı Makine Mühendisliği Bölümünde tezli yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında "The Effect of Buckling on the Interface Conductance in Flexible Lithium-Ion Batteries (Esnek Lityum-İyon Bataryalarda Burkulmanın Arayüz İletkenliği Üzerindeki Etkisi)" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ve mezun olmasının ardından 2016 yılında Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2016-2017 öğretim yılının bahar döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen Iğdır Üniversitesinde çalışmaktadır ve iyi derece İngilizce bilmektedir.