

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME VE RADYAL KANATÇIK
KULLANIMININ BATARYA TERMAL PERFORMANSINA
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

BEYZANUR YAVUZ

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME VE RADYAL KANATÇIK
KULLANIMININ BATARYA TERMAL PERFORMANSINA
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

BEYZANUR YAVUZ

Prof. Dr. Müslüm ARICI
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Fikret POLAT
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.07.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafındanno'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Beyzanur YAVUZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Beyzanur YAVUZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, bilgisiyle bana önderlik eden, çalışmalarına her konuda yön veren, bana güvenen ve beni yüreklendiren çok değerli ve saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müslüm ARICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi bilgi ve deneyimi sayesinde, bundan sonraki akademik kariyerimin şekillenmesine katkı sağlayıp beni her anlamda cesaretlendirmiştir. Yüksek lisans öğrenimim boyunca değerli görüşleri ve kıymetli bilgileriyle çalışmalarına katkıda bulunan, desteğini ve zamanını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Çağatay YILDIZ ve Sayın Arş. Gör. Ekrem TUNÇBİLEK'e de ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca desteğini hissettiğim, sıkıntılara ve mutluluğuma ortak olan fedakâr anneme, kıymetli babama ve kardeşlerime sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Temmuz-2024

Beyzanur YAVUZ



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri	2
1.2. Çalışmanın Özgün Değeri ve Önemi	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	13
3.1. Lityum İyon Bataryalar.....	13
3.2. FDM.....	18
3.2.1. Organik FDM’ler	19
3.2.2. İnorganik FDM’ler	19
3.2.3. Ötektik FDM’ler.....	19
3.3. Problem Tanımı	20
3.4. Yönetici Denklemler.....	23
3.5. Ağ Boyutu ve Zaman Adımından Bağımsızlık Testi.....	26
3.6. Doğrulama Çalışması.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Radyal Kanatçığın Termal Performansa Etkisi	32
4.1.1. Referans Durum	32
4.1.2. Tasarım-I	39
4.1.3. Tasarım-II.....	41
4.1.4. Tasarım-III	44
4.2. Farklı Hazne Çapının Termal Performansa Etkisi	48
4.3. FDM Gizli Isısının Termal Performansa Etkisi	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Batarya termal yönetim sistemlerinin enerji tüketimine göre sınıflandırılması	4
Şekil 1.2.	2000-2022 yılları arasında elektrikli araçların batarya termal yönetim sistemlerinde kullanılan soğutma stratejilerinin istatistiksel oranı	6
Şekil 3.1.	Lityum iyon bataryanın çalışma prensibi	13
Şekil 3.2.	Lityum iyon batarya tiplerinin şematik gösterimi; a) silindirik batarya hücresi, b) prizmatik batarya hücresi, c) kese tipi batarya hücresi	14
Şekil 3.3.	FDM'nin katı ve sıvı fazlar arasında dönüşüm prensibi	18
Şekil 3.4.	BTYS'nin şematik gösterimi. a) Kanatçıksız durumda sadece FDM olması halinde (Referans durum), b) 1 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-I), c) 3 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-II), d) 5 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-III)	21
Şekil 3.5.	5C deşarj koşullarında ağ boyutundan bağımsızlık testi. (a) Sıcaklığın zamanla değişimi, (b) Erime oranının zamanla değişimi	27
Şekil 3.6.	5C deşarj koşullarında zaman adımından bağımsızlık testi. (a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi (b) Erime oranının zamanla değişimi	28
Şekil 3.7.	Mevcut çalışma modelinin 16W için deneysel ve sayısal sonuçlarla doğrulanması. (a) Sıcaklığın zamanla değişimi, (b) Erime oranının zamanla değişimi	30
Şekil 4.1.	1C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	33
Şekil 4.2.	1C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi	34
Şekil 4.3.	3C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	35
Şekil 4.4.	3C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi	35
Şekil 4.5.	5C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	37
Şekil 4.6.	5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi	37
Şekil 4.7.	5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca referans durumdan (RT42) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)	38

Şekil 4.8.	5C deşarj koşullarında 1 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	40
Şekil 4.9.	5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-I)	40
Şekil 4.10.	5C deşarj koşullarında 3 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	41
Şekil 4.11.	5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-II)	42
Şekil 4.12.	5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca Tasarım-II'den (RT42) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)	43
Şekil 4.13.	5C deşarj koşullarında 5 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	45
Şekil 4.14.	5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-III)	45
Şekil 4.15.	5C deşarj koşulları ve 720 saniye sonunda RT31'in erime grafiği. a) Referans durum, b) Tasarım-I, c) Tasarım-II, d) Tasarım-III	46
Şekil 4.16.	5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca Tasarım-III'ten (RT31) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)	47
Şekil 4.17.	5C deşarj koşullarında farklı çapta hazne için maksimum sıcaklık grafiği	48
Şekil 4.18.	5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT31) a) T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	50
Şekil 4.19.	5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT38) a) T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	51
Şekil 4.20.	5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT42) a) T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi	52
Şekil 4.21.	5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Referans durum)	54
Şekil 4.22.	5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-I)	55
Şekil 4.23.	5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-II)	56
Şekil 4.24.	5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-III)	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	EA’larda kullanılan batarya türlerinin termofiziksel özellikleri	16
Tablo 3.2.	EA’lar için literatürde sıklıkla kullanılan FDM’lerin termofiziksel özellikleri.....	20
Tablo 3.3.	Mevcut çalışmada kullanılan hazne, batarya, kanatçık ve FDM’nin termofiziksel özellikleri.....	23
Tablo 4.1.	Farklı senaryolar için değişken tutulan parametreler	31
Tablo 4.2.	Farklı hazne çapındaki sistemin kütlesi ve 720 saniye sonundaki erime oranı.....	53



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	:Şarj/deşarj oranı
C_p	:Özgül ısı kapasitesi, (J/kg·K)
$C_{p,b}$	:Bataryanın özgül ısı kapasitesi, (J/kg·K)
$C_{p,h}$	:Hazne malzemesinin özgül ısı kapasitesi, (J/kg·K)
$C_{p,k}$	:Kanatçık malzemesinin özgül ısı kapasitesi, (J/kg·K)
D_b	:Batarya çapı, (mm)
D_{hi}	:Hazne iç çapı, (mm)
D_{hd}	:Hazne dış çapı, (mm)
g	:Yer çekimi ivmesi, (m/s ²)
h	:Entalpi, (J/kg)
ρ	:Yoğunluk, (kg/m ³)
ρ_b	:Bataryanın yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_f	:Faz değiştiren malzemenin yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_h	:Hazne malzemesinin yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_k	:Kanatçık malzemesinin yoğunluğu, (kg/m ³)
Δx	:Ağ boyutu, (mm)
Δt	:Zaman adımı, (s)
k	:Isı iletim katsayısı, (W/m·K)
k_b	:Bataryanın ısı iletim katsayısı, (W/m·K)
k_f	:Faz değiştiren malzemenin ısı iletim katsayısı, (W/m·K)
k_h	:Hazne malzemesinin ısı iletim katsayısı, (W/m·K)
L	:Gizli ısı, (J/kg)
L_b	:Bataryanın uzunluğu, (mm)
L_k	:Kanatçık uzunluğu, (mm)
m	:Kütle, (gr)
P	:Basınç (Pa)
t	:Zaman, (s)
T	:Sıcaklık, (°C, K)
T_0	:Ortam sıcaklığı, (°C)
T_e	:Faz değişim sıcaklığı, (°C)
T_h	:Hazne sıcaklığı, (°C)
T_k	:Kanatçık sıcaklığı, (°C)
T_1, T_2, T_3	:Batarya yüzey sıcaklığı, (°C)
$\vec{u}$	:Sıvı haldeki faz değiştiren malzemenin hız vektörü, (m/s)
μ	:Dinamik viskozite, (kg/ms)

Kısaltmalar

BTYS	:Batarya Termal Yönetim Sistemi
EA	:Elektrikli Araç
FDM	:Faz Değiştiren Malzeme
FSM	:Faz Stabil Malzeme
LİB	:Lityum İyon Batarya

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME VE RADYAL KANATÇIK KULLANIMININ BATARYA TERMAL PERFORMANSINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve sıfır emisyon hedefinin daha kritik bir konu haline gelmesiyle birlikte elektrikli araçlar önem kazanmıştır. Elektrikli araç bataryalarının, güvenli koşullarda yüksek performans sağlaması ancak etkili batarya termal yönetim sistemlerinin uygulanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında, faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımının bataryanın termal performansına etkisi sayısal olarak incelendi. Analizler, farklı FDM (RT31, RT38 ve RT42), farklı radyal kanatçık sayıları (1, 3 ve 5 kanatçık) ve farklı hazne boyutları (26, 30 ve 34 mm) için farklı deşarj koşulları (1C, 3C ve 5C) altında gerçekleştirildi. Sadece FDM kullanılarak oluşturulan referans duruma ek olarak, 3 farklı tasarım senaryosu kurgulandı: i) FDM+1 kanatçık (Tasarım-I), ii) FDM+3 kanatçık (Tasarım-II) ve iii) FDM+5 kanatçık (Tasarım-III). Referans duruma kıyasla RT31, R38 ve RT42 için Tasarım-I'de 3,36 °C, 2,82 °C ve 2,55 °C, Tasarım-II'de 5,56 °C, 4,76 °C ve 4,8 °C ve Tasarım-III'te 10,81 °C, 6,17 °C ve 5,66 °C'lik bir sıcaklık düşüşü görüldü. Elde edilen bulgular, kanatçık entegresinin, FDM içerisinde ısı transferini iyileştirerek referans duruma kıyasla batarya sıcaklığında önemli düşüşlere sebep olduğunu göstermektedir. Hazne boyutunun 34 mm'den 26 mm'ye düşürülmesiyle, maksimum sıcaklık değerlerinde kayda değer bir değişim gözlenmezken erime oranında RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla %36'dan %89'a, %28'den %76'ya ve %19'dan %65'e artış gözlemlendi. Ayrıca, gizli ısının, soğutma performansına katkısını belirlemek amacıyla faz stabil malzeme (FSM) yaklaşımı uygulandı. FSM entegre edildiği duruma kıyasla, FDM içeren batarya modelinde RT31, RT38 ve RT42 için Tasarım-I'de 13,28 °C, 10,5 °C ve 8,15 °C, Tasarım-II'de 13,96 °C, 10,92 °C ve 8,88 °C ve Tasarım-III'te 18,11 °C, 11,23 °C ve 8,64 °C'lik bir sıcaklık düşüşü gözlemlendi. Bu sonuç, FDM'nin gizli ısısının, batarya sıcaklığını kontrol altına almada çok kritik bir rolü olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya Termal Yönetim Sistemleri, Elektrikli Araçlar, Faz Değiştiren Malzeme, Faz Stabil Malzeme, Gizli Isı.

NUMERICAL INVESTIGATION ON EFFECT OF UTILIZATION OF PHASE CHANGE MATERIAL AND RADIAL FIN ON BATTERY THERMAL PERFORMANCE

ABSTRACT

Electric vehicles have gained importance as the transition to renewable energy sources and the zero emission target has become a more critical issue. Providing high performance of electric vehicle batteries under safe conditions is only possible by applying effective battery thermal management systems. In this thesis study, the effect of phase change material (PCM) usage on the thermal performance of the battery was investigated numerically. The analyses were carried out under different discharge conditions (1C, 3C and 5C) for different PCMs (RT31, RT38 and RT42), different radial fin numbers (1, 3 and 5 fins) and different chamber sizes (26, 30 and 34 mm). In addition to the reference case using only PCM, 3 different design scenarios were designed: i) PCM+1 fin (Design-I), ii) PCM+3 fins (Design-II) and iii) PCM+5 fins (Design-III). Compared to the reference case, RT31, R38 and RT42 showed temperature reductions of 3.36 °C, 2.82 °C and 2.55 °C in Design-I, 5.56 °C, 4.76 °C and 4.8 °C in Design-II and 10.81 °C, 6.17 °C and 5.66 °C in Design-III. The findings show that the fin integration improves heat transfer within the PCM and causes significant decreases in battery temperature compared to the reference case. By reducing the chamber size from 34 mm to 26 mm, no significant change was observed in the maximum temperature values, while the melting rates increased from 36% to 89%, 28% to 76% and 19% to 65% for RT31, RT38 and RT42, respectively. In addition, phase stable material (PSM) approach is applied to reveal the contribution of latent heat to the cooling performance. Compared to the case with PSM integration, the battery model with PCM shows a temperature decrease of 13.28 °C, 10.5 °C and 8.15 °C in Design-I, 13.96 °C, 10.92 °C and 8.88 °C in Design-II and 18.11 °C, 11.23 °C and 8.64 °C in Design-III for RT31, RT38 and RT42. This result shows that the latent heat of the PCM has a critical role in controlling the battery temperature.

Keywords: Battery Thermal Management Systems, Electric Vehicles, Phase Change Material, Phase Stable Material, Latent Heat.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlu araçlar, yaydıkları CO, CO₂, SO₂, NO_x, HC ve partikül maddelerle, atmosferdeki kirliliğin başlıca kaynağı olmakla birlikte artan enerji krizinde de büyük rol oynamaktadır (Kim ve diğ., 2023). Fosil kaynakların tükenmesi, iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminin artmasıyla, araştırmacılar tarafından yeni teknoloji elektrikli araçlar (EA'lar) geliştirilmiştir. Sıfır emisyon hedefi ve daha yeşil bir gelecek vaat etmesinin yanı sıra, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla kilometre başına daha düşük maliyetle seyahat avantajı sayesinde EA'lar, gün geçtikçe daha da cezbedici hale gelmiştir (Wankhede & Kamble, 2023). EA'lar, enerji ihtiyacını onlar için kritik öneme sahip bataryalarından sağlar ve araç güvenliği, performansı ve menzili doğrudan bataryadan etkilenmektedir.

Bataryanın kimyasal özellikleri ve batarya tipi, bataryanın enerji yoğunluğunu, güç kapasitesini, şarj/deşarj oranını ve ömrünü belirlemede önemli rol oynar. Günümüze kadar EA'larda nikel-kadmiyum, kurşun-asit, katı hal, hibrit-nikel metal ve lityum iyon gibi çok çeşitli batarya tipleri kullanılmış olsa da lityum iyon bataryalar (LİB'ler) ön plana çıkmaktadır. LİB'ler yüksek enerji yoğunluğu, kendi kendinedeşarj oranının düşük olması, diğer batarya türlerine kıyasla sıcaklıktan daha az etkilenmesi, çevreye daha az zararlı olması, yüksek çıkış voltajına sahip olması gibi üstün özellikleri sayesinde elektrikli araçlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Aswin Karthik ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2023). Ancak LİB'ler, operasyon sıcaklıkları düşünüldüğünde oldukça sınırlı aralıkta etkili performans göstermektedir. LİB'ler için optimum çalışma sıcaklığı 25 - 40 °C aralığında olmalı ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkı 5 °C'yi geçmeyecek şekilde kontrol altına alınmalıdır (Son ve diğ., 2023). Sıcaklığın, batarya üzerinde bu denli kritik öneme sahip olmasının nedeni; bataryanın optimum çalışma sıcaklığının dışındaki değerlerde bataryanın hizmet ömrünün, kapasitesinin ve performansının azalması ve bataryanın kimyasında geri döndürülemez bozulmalar meydana gelmesidir (Ebbs-Picken ve diğ., 2023). 80 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda bataryada termal kaçak, elektrolitik patlama ve zehirli gazların salınımı riski vardır (Bhutto ve diğ., 2023).

LİB hücrelerinin voltaj değerleri 2,4 - 4,2 V arasında sınırlı olduğundan tek bir batarya hücresinin kullanımı beklenen voltaj değerini karşılamaz dolayısıyla batarya hücrelerinin belirli performansı karşılaması için seri veya paralel bağlanması gerekmektedir

(Ghaeminezhad ve diğ., 2023). EA’larda, batarya hücreleri birbirleriyle çok yakın konumlandırıldığından temas halindeki komşu hücreler birbirlerini termal olarak etkiler ve patlamayı tetikleyebilir. Ayrıca batarya paketini daha kısa sürede şarj etme çabaları ve bataryadan daha fazla performans elde etmek için güç yoğunluğunu artırmaya yönelik çalışmalar batarya paketinde üretilen ısıyı artırmaktadır. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında araç güvenliğinin sağlanması ve daha üstün performans elde etmek için etkili Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS’ler) gereklidir (Murugan ve diğ., 2022).

1.1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Özellikle son dönemlerde geliştirilen yeni teknoloji EA’lar, daha kısa sürede daha hızlı şarj edilebildiğinden bataryanın termal kontrolünün sağlanmasında yüksek soğutma performansına ihtiyaç vardır. BTYS, bataryayı optimum performans göstereceği sıcaklık değerlerinin içinde tutar ve batarya paketinde hücreler arasındaki sıcaklık farkını kontrol eder (Cai ve diğ., 2023). BTYS, batarya sağlığını korumak ve hizmet ömrünü uzatmak için şarj ve deşarj durumlarında sıcaklık değerlerini düzenler ve gerekli koşullarda ısıtma ve soğutma operasyonu gerçekleştirir.

BTYS, kullanılan tekniğe ve soğutma ekipmanına bağlı olarak hava-bazlı, sıvı-bazlı, faz değiştiren malzeme (FDM) bazlı, ısı borusu bazlı ve bunların tek başına yetersiz olduğu koşullarda kullanılan hibrit BTYS’ler olarak temelde beşe ayrılmaktadır (Youssef ve diğ., 2023). Kullanılan soğutma stratejileri, enerji tüketimine bağlı olarak iki bölümde incelenmektedir: aktif soğutma sistemi ve pasif soğutma sistemi (Haddad ve diğ., 2024). BTYS’lerin sınıflandırılması detaylı olarak Şekil 1.1’de sunulmuştur. Her bir yöntemin avantajları, dezavantajları ve uygulama esasları aşağıda sırasıyla incelenmiştir.

Hava-bazlı BTYS, batarya paketinin çalışma sıcaklığını kontrol etmek için kullanılan temel yaklaşımların başında gelmektedir (Akinlabi & Solyali, 2020). Uygulama alanındaki, hava akışının kontrol yöntemine göre pasif ve aktif sistemler olarak iki bölümde incelenebilir (Ebbs-Picken ve diğ., 2023). Pasif sistemlerde, aracın hareketine ihtiyaç duyulur ve doğal taşınım ile batarya paketine hava akışı sağlanır. Aktif sistemlerdeyse, zorlanmış taşınım ile hava akışını yönlendiren ve kontrol eden fan gibi yardımcı bileşenler kullanılır. Hava-bazlı soğutma, düşük maliyeti, basit yapısı, güvenilirliği ve bakım kolaylığı sayesinde ticari uygulamalarda yaygın olarak

kullanılmaktadır. Ancak, yüksek şarj/deşarj oranlarında batarya paketinin soğutma gereksinimlerini istenen düzeyde karşılamayabilir (Khan, Hussain, ve diğ., 2024). Bu yöntem, tasarım optimizasyonu ve farklı yönlendirilmiş soğutma kanalı düzeniyle daha da geliştirilebilir (Zhao ve diğ., 2021).

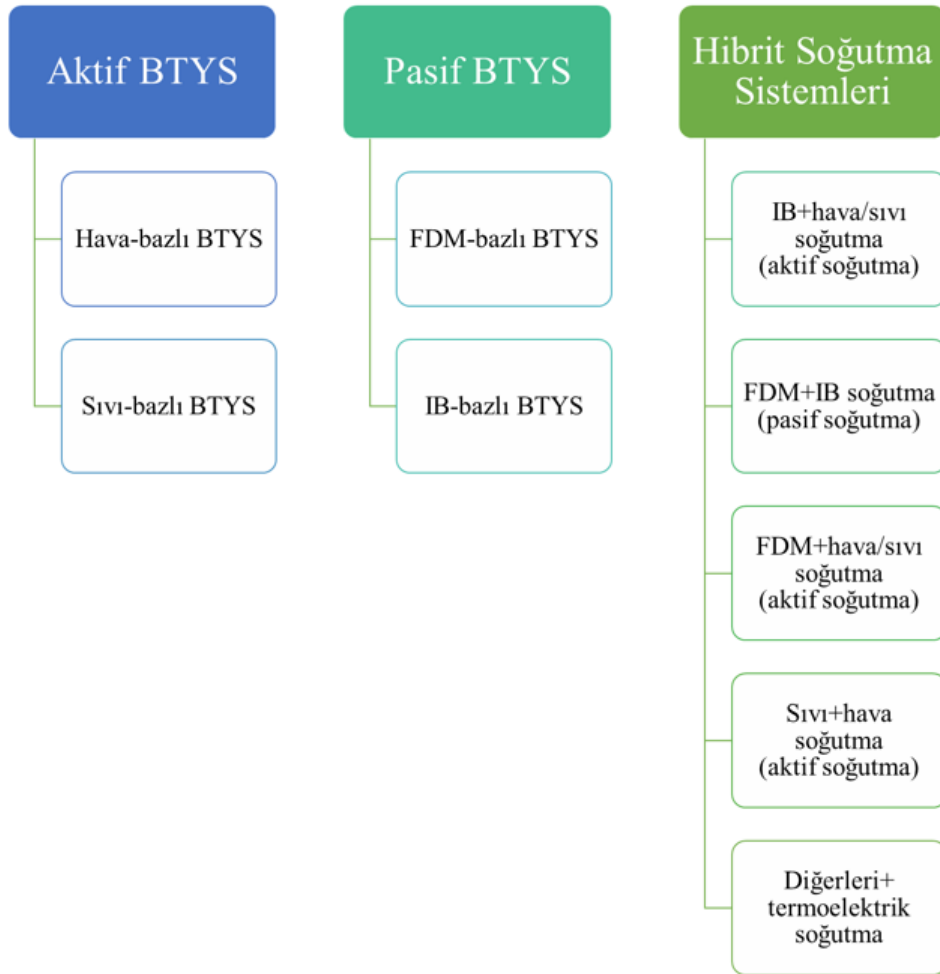
Sıvı-bazlı BTYS, üstün soğutma performansı sayesinde bataryada üretilen ısıyı hızla uzaklaştırarak batarya kapasitesinin ve hizmet ömrünün iyileşmesine katkı sağlar (Paneerselvam ve diğ., 2024). Bu yöntem, piyasadaki hâlihazırdaki EA'ların büyük çoğunluğunda soğutma kapasitesini geliştirmek için kullanılmaktadır. Uygun koşullarda batarya paketine entegre edildiğinde, hava-bazlı BTYS'ye kıyasla daha iyi soğutma performansı sunar. Sıvı-bazlı BTYS, soğutucu akışkanın batarya paketinde uygulama stratejisine göre doğrudan ve dolaylı sıvı soğutma sistemleri olarak iki bölümde incelenebilir (Ebbs-Picken ve diğ., 2023). Doğrudan soğutma sisteminde, batarya direkt olarak çok düşük seviyelerde elektrik iletkenliğine sahip (kısa devrenin önüne geçmek için) dielektrik sıvının içerisinde konumlandırılmıştır. Bu yöntem, yüksek soğutma performansı sağlamasına rağmen, kullanılan fazlaca sıvı ağırlığı araçta ekstra yük artışına neden olur. Bundan dolayı günümüzde EA'larda ticari uygulaması yaygın kullanılmamaktadır. Bunun yerine bataryayla direkt temas halinde olmayan ve soğutma plakaları gibi yardımcı ekipmanlar sayesinde ısı dağılımını sağlayan dolaylı soğutma sistemleri tercih edilmektedir (Zhao ve diğ., 2023).

Isı borusu bazlı BTYS, batarya paketindeki aşırı ısınma sorunlarının önüne geçmek için geliştirilen bir diğer soğutma yöntemidir. Bu yöntem, en küçük sıcaklık değişimlerinde bile oldukça hassas davranıp ısıyı bulunduğu ortamdan uzaklaştırabilme yeteneğine sahiptir (Weragoda ve diğ., 2023). Isı borusu, dışarıdan ek enerjiye ihtiyaç duymadan içerisindeki sıvının buharlaşması- yoğuşması prensibiyle çalışır. Çift yönlü ısı transferi sağlayan, kompakt ve esnek yapısı sayesinde enerji depolama sistemlerinin termal yönetiminde geniş yer bulmuştur (Khan, Hussain, ve diğ., 2024; Zheng ve diğ., 2023).

FDM'ler, dışarıdan herhangi bir enerji tüketimine ihtiyaç duymadan sahip oldukları gizli ısıları sayesinde faz değişimi esnasında ısıyı absorbe etme ve yayma yeteneğine sahip son dönemlerde araştırmacılar tarafından oldukça ilgi odağı haline gelmiş malzemelerdir (Cai ve diğ., 2023; Ebbs-Picken ve diğ., 2023). FDM'ler, batarya hücrelerinin etrafını sararak, hava-bazlı ve sıvı-bazlı BTYS'ye kıyasla batarya yüzeyinde daha homojen sıcaklık

dağılımının oluşmasına katkı sağlar (Zhao ve diğ., 2021). Ayrıca, diğer soğutma yöntemlerine kolaylıkla entegre edilerek üstün soğutma performansı sağlar. Ancak, FDM'lerin batarya hücreleriyle optimum operasyonunu sürdürmek başlı başına bir araştırma konusudur. Bu nedenle, FDM'lerin erime sıcaklığı, yoğunluğu, termal iletkenliği, özgül ısı kapasitesi ve gizli ısı gibi termofiziksel özellikleri önem arz etmektedir. FDM'lere bu bölümde kısa bir giriş yapılmış olup tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde detaylıca ele alınmıştır.

Hava-bazlı, sıvı-bazlı, ısı borusu bazlı ve FDM-bazlı BTYS'lerin, batarya sıcaklığını kontrol altına almak ve enerji depolama sisteminin güvenliğini sağlamak için tek başına yetersiz kaldığı durumlarda, bu yöntemlerin üstün özelliklerinin uygun koşullarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit BTYS'ler kullanılır.



Şekil 1.1. Batarya termal yönetim sistemlerinin enerji tüketimine göre sınıflandırılması (Luo ve diğ., 2022)

1.2. Çalışmanın Özgün Değeri ve Önemi

EA'ların gelişim süreçlerinin desteklenmesi ancak batarya teknolojilerini iyileştirmekle mümkün olmaktadır. Hızlı şarj/deşarj altında termal problemlerin önüne geçmek amacıyla bataryada üretilen ısıнын hızla uzaklaştırılması gerekmektedir. Gelişmiş soğutma stratejileri, bu aşamada mevcut ısıyı etkili bir şekilde ortamdan uzaklaştırıp batarya sıcaklığını kontrol altına almalıdır. Ek olarak, EA bataryaları zorlu çevresel şartlara karşı dirençli olmak zorundadırlar. Statik ve dinamik yükler altında titreşimli ortama maruz kalırken aynı zamanda şok, yangın, kaza gibi durumlara karşı kontrol mekanizmalarına sahip olmalıdır.

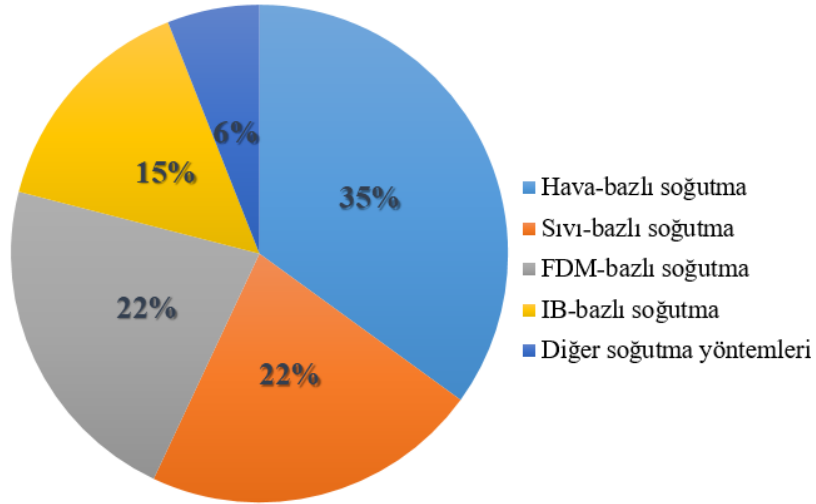
Mevcut BTYS'ler değerlendirildiğinde sıvı ve hava-bazlı aktif soğutma sistemlerine kıyasla FDM'ler, herhangi bir dış enerji ihtiyacına gerek kalmadan gizli ısıları sayesinde pasif soğutma yaparak BTYS'ler üzerinde kritik rol oynar. Bu sayede bataryada etkili sıcaklık düşüşü sağlar (Luo ve diğ., 2022). FDM bazlı BTYS, sıvı soğutmada (daldırma yöntemi kullanılan sıvı soğutma hariç) kullanılan soğutma elemanı ile batarya yüzeyi temas alanını artırma kaygısı olmadan direkt batarya yüzeyiyle temas halinde olabilen mükemmel ıslanabilirlik özelliğine sahiptir (Nasajpour-Esfahani ve diğ., 2023). Ayrıca, düşük düzeyde bozulma gösteren uzun hizmet ömrüne sahip dayanıklı ve kararlı malzemelerdir (Zhu ve diğ., 2024).

FDM'ler, yüksek performanslı EA'larda kullanımının yanı sıra uzay ve havacılık gibi özel sistemlerde de uygulanmaktadır. Sadece 2000-2022 yılları arasında FDM odaklı BTYS'ler incelendiğinde, FDM'lerin yadsınamayacak bir orana sahip olduğu görülmektedir (Şekil 1.2). Araştırmacılar tarafından bu yöntemin ilgi odağı haline gelmesinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ısı borusu, hava ve sıvı soğutmayla kolaylıkla uyum altında çalışmasıdır. Bir diğeri ise bu malzemelerin uygulama alanına göre seçilebilecek uygun termofiziksel özelliklere sahip olması ve termal yönetim koşullarında geliştirilmeye açık aynı zamanda yeni teknolojiye entegre edilebilir olmasıdır. Ancak tek başına ideal bir FDM pek mümkün olmadığından iyileştirilme ihtiyacı vardır. Bu nedenle kanatçık ve nanopartikül takviyesine ihtiyaç duyulabilir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, kanatçık tasarımının batarya sıcaklığını oldukça önemli oranda düşürdüğü görülmüştür. Bu alanda birçok çalışma olmasına rağmen tasarımsal boyuta inildiğinde, radyal kanatçık uygulamalarında eksiklik

olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu tez çalışmasında FDM ve radyal kanatçık tasarımının çalışılmasına karar verilmiştir.

FDM ve kanatçık kullanarak tasarlanan mevcut çalışmada, gelişmiş batarya teknolojisi FDM'nin gizli ısı ve kanatçık malzemesinin yüksek termal iletkenliğine dayanmaktadır. Aynı zamanda modellenen sistemin kompakt tasarıma ve seri üretim koşullarında düşük maliyete sahip olması gerekir. Bu nedenle, minimum hacimde maksimum verimlilik alabilmek adına FDM'nin farklı hazne çapları için kütle hesaplamaları da yapılmıştır.

Literatür incelendiğinde, FDM gizli ısının, termal performansa katkısını incelemek amacıyla yapılan çalışmalarda büyük boşluk olduğu görülmüştür. Bu nedenle, FDM gizli ısının batarya termal performansı üzerindeki etkileri tez çalışmasının odak noktasını oluşturmaktadır.



Şekil 1.2. 2000-2022 yılları arasında elektrikli araçların batarya termal yönetim sistemlerinde kullanılan soğutma stratejilerinin istatistiksel oranı (Youssef ve diğ., 2023)

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

FDM'lerin, değişken şarj/deşarj oranında, farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı kanatçık geometrilerinde BTYS'lere entegre edilmesi literatürde detaylıca incelenmiştir. Yapılan tez çalışması ile ilgili literatürde mevcut olan çalışmaların özeti, avantaj, dezavantaj ve sınırlamaları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Sun ve diğ. (Sun ve diğ., 2019) yüksekdeşarj oranlarında bataryanın pratik uygulanabilirliğini test etmek ve FDM'nin termal iletkenliğini artırmak için li-iyon 26650 tek bir batarya hücresi ve parafin (OP44E) kullanarak 20, 30, 40 °C ortam sıcaklıklarında ve 8 W, 12 W, 16 W test koşulları altında deneysel olarak ve ANSYS Fluent 18.0 yardımıyla sayısal olarak bataryayı incelemişlerdir. Düz ve yay kanatçık tasarımı önermişler ve termal performansa etkisini çalışmışlardır. Yeni kanatçık tasarımının sadece FDM kullanımına kıyasla oldukça etkili sonuç gösterdiği ve bataryanın operasyon süresini %54-90 oranında uzattığı görülmüştür. Ek olarak farklı döngüler için erime ve katılaşmayı modellemişler ve batarya yüzeyindeki sıcaklık değişimini incelemişlerdir. FDM hazne malzemesinin naylon, titanyum, alüminyum alaşımı ve bakır olduğu durumlarda batarya sıcaklığı üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Zheng ve diğ. (Zheng ve diğ., 2020) aynı batarya ve aynı FDM ile kanatçık kalınlığı, kanatçık uzunluğu ve kanatçık sayısı parametrelerinin BTYS üzerindeki optimum performans koşullarını tespit etmek için deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışması gerçekleştirmişlerdir. Batarya+FDM+kanatçık modeli batarya+FDM modeline kıyasla 10 W, 12,5 W ve 15 W ısı üretimi için %75, %68 ve %61'e varan oranlarda batarya kullanım süresini artırmıştır. 0,5 mm kalınlığında ve 7,5 mm uzunluğunda 8 kanatçığın optimum kütle ve termal performans dengesini sağladığı sonucuna varılmıştır. Bir diğer çalışmalarında, 9 adet lityum iyon batarya hücresi ve aynı FDM'yi kullanarak kanatçık uzunluğu, kanatçık düzeni ve ortam sıcaklığının BTYS üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Fan ve diğ., 2021). 10 W, 12,5 W ve 15 W test koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışmasında sıcaklığı daha iyi gözlemlemek için batarya yüzeyinin 3 noktasından sıcaklık değeri alınmıştır. Ayrıca maliyet ve zaman tasarrufu sağlamak adına tüm modelin 4'te 1'i de analiz edilmiş olup sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde tasarlanan yeni batarya+FDM+kanatçık modelinin batarya+FDM'ye kıyasla bataryanın operasyon süresini %98,4 oranında geliştirdiği görülmüştür. Ek olarak, kanatçık

düzeninin ısı dağıtımında aktif rol oynadığı tespit edilmiş olup sistemin çalışma süresini %15,2 oranında uzattığı sonucuna varılmıştır.

FDM entegre edilmiş BTYS, 1C ve 2C deşarj oranında başarılı soğutma performansı sağlarken deşarj oranı arttıkça FDM'nin tek başına yetersiz kaldığı görülmüştür. Choudhari ve diğ. (Choudhari ve diğ., 2020) FDM'nin düşük ısı iletimini iyileştirmek için alüminyum kanatçık kullanımı önermiştir. Farklı geometride kanatçık, kanatçık sayısı, FDM kalınlığı ve deşarj oranı araştırılan parametrelerdi. Kanatçık ilavesi batarya sıcaklığını düşürmekle kalmayıp aynı zamanda FDM ile batarya arasındaki sıcaklık farkının da kontrol altına alınmasına katkı sağlamıştır. I şekilli kanatçıklar soğutma performansı ve ısı transferi açısından en iyi sonucu sağlarken, üçgen şekilli kanatçıklar tam tersi davranış göstermiştir.

Kong ve diğ. (Kong ve diğ., 2020) silindirik 21700 Li-iyon batarya kullanarak FDM ve sıvı soğutma bazlı yeni bir hibrit BTYS tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu sistemde hücreler arası mesafe, ortam sıcaklığı, soğutucu giriş hızı, soğutucu ve akışkan arası mesafe, kullanılan kanal sayısı test edilen parametrelerdi. Ortam sıcaklığı 10 °C-40 °C, soğutucu giriş hızı 0,1 m/s -1 m/s arasında değişken değerler kullanılarak 3C deşarj ve 0,5C şarj oranı olmak üzere 2 çevrimde batarya test edilmiştir. Bataryalar arasındaki mesafenin 5 mm'ye kadar artmasıyla soğutma performansının geliştirildiği bu değerden sonra verimdeki artışın kayda değer olmadığı ve FDM gizli ısını etkin bir şekilde kullandığında sıvı soğutmanın sınırlı etki gösterdiği ancak FDM'nin gizli ısını kazanmasına yardımcı olduğu ve erime süresini uzattığı sonucuna varılmıştır.

Heyhat ve diğ. (Heyhat ve diğ., 2020) EA'larda kullanılan lityum-iyon bataryanın termal performans koşullarını iyileştirmek için FDM'ye ilaveten radyal kanatçık (1, 3, 5 adet), nanopartikül (%3, %5 ve %7 hacim fraksiyonu) ve gözenekli metal köpüğü (%85, %90 ve %95 gözeneklilik) bataryaya entegre etmiş ve sistem performansına etkilerini araştırmıştır. Gözenekli FDM modeli, nano-FDM ve FDM+kanatçık modeline kıyasla daha efektif soğutma performansı sergilemiştir. 5C ve 10C deşarj oranı altında gerçekleştirilen çalışmada metal köpük bileşeninin sisteme entegre edilmesiyle sırasıyla 4K ve 6K'lık oldukça kritik sıcaklık değişimi meydana gelmiştir. Ancak gözeneklilik oranının, sıcaklık faktörü üzerinde çok etkili olmadığı görülmüştür. Najafi Khaboshan ve diğ. (Najafi Khaboshan ve diğ., 2023) 3C deşarj koşulları altında, FDM, metal köpük ve

kanatçık kullanarak bataryanın yüzey sıcaklığını iyileştirmeye yönelik hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Panasonic NCR18650PF batarya ve dikdörtgen, üçgen, trapezoidal, I şekilli ve dalgalı tipte kanatçıklar kullanılarak yapılan çalışma, farklı kanatçık tiplerinin batarya sıcaklığı üzerinde kayda değer bir fark oluşturmadığını, FDM, metal köpük ve kanatçık kullanılan durumda batarya yüzeyinde 3 K düşüş olduğu ve ısıyı daha homojen yaydığını göstermiştir. Aynı batarya, FDM, kanatçık ve metal köpük malzemesi kullanılarak aynı deşarj koşullarında yapılan bir diğer çalışmada ise batarya performansını ve sürüş güvenliğini artırmak hedeflenmiştir. Ayrıca batarya sıcaklığını ve FDM'nin erime oranını önceden belirlemek amacıyla bir yapay zekâ uygulaması geliştirmişlerdir (Najafi Khaboshan ve diğ., 2024). Kanatçık uzunluğu, kanatçık sayısı ve kanatçık malzemesi kombinasyonları farklı ortam sıcaklıklarında analiz edilmiştir. Geliştirilen yapay zekâ modeli ile FDM erime oranı ve batarya sıcaklığı oldukça yakın şekilde belirlenebilmiştir.

Liu ve diğ. (Liu ve diğ., 2023) FDM'nin ısı iletkenliğini iyileştirmek için farklı geometride ve farklı sayıda alüminyum kanatçığın sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. 9 adet silindirik lityum-iyon 18650 batarya ve 27-28-29 mm hazne çapına sahip bir sistem tasarlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda kanatçık yüzey alanı ve batarya sıcaklığındaki iyileşme arasında doğru orantı olduğu açığa çıkmıştır. Yapılan analizler sonucunda, özellikle 5C deşarj koşulları altında sadece FDM kullanılan ve FDM+kanatçık kullanılan durum arasında 6,16 K'lık ve kanatçık sayısı 3'ten 8'e çıkarıldığında 2,94 K'lık bir düşüş olduğu görülmüştür. Ayrıca batarya ve kanatçık arasındaki temas direncinin yarıya düşürülmesi ve mevcut hazne çapının 1 mm artırılmasının batarya sıcaklığını 0,27 K düşürdüğü çıkarılmıştır. Kanatçık sayısı, termal performans, temas direnci, kütle optimizasyonu ve tüm bu parametrelerin uygulanabilirliğinin geliştirilmesi gerektiğinin kritik konular olduğu vurgulanmıştır.

Zheng ve diğ. (Zheng ve diğ., 2024) yüksek deşarj oranında bataryada oluşabilecek termal kaçakların önüne geçmek için FDM ve dalgalı tipte alüminyum soğutma plakasını birleştirerek bu yeni hibrit BTYS'yi sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için tek bir batarya hücresi 3C deşarj oranında, FDM entegre edilerek 2,5C deşarj oranında ve sıvı soğutmanın varlığında 1,5C deşarj oranında deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle

tutarlı olduğu görülmüştür. 4Ah kapasiteli 21,700 lityum-iyon batarya 4 paralel, 6 seri olacak şekilde bağlanıp 24 hücreli batarya paketi oluşturuldu. Yeni hibrit sistemin temas yüzey alanı geniş tutulup ısı transferinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Soğutucu akış hızı, soğutucu giriş sıcaklığı, soğutucu akış yönü, FDM kalınlığı incelenmiştir. Sisteme 1 mm kalınlığında FDM'nin eklenmesi bataryadaki sıcaklık farkını 3,56 °C düşürmüştür. FDM'deki erime oranının 1, 2, 3, 4 mm kalınlık için sırasıyla %99,98, %88,20, %72,24 ve %57,92 olduğu ve en düşük maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının 4 mm kalınlıklı FDM'de olduğu görülmüştür. Soğutucu akışkanın giriş sıcaklığının da BTYS sıcaklık değerleri üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Giriş sıcaklığı düştükçe maksimum sıcaklığın da düştüğü ancak maksimum sıcaklık farkının 200 saniyeye kadar açıldığı süre sonunda ise değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Cheng ve diğ. (Cheng ve diğ., 2024) bataryanın yüksek ve düşük ortam sıcaklıklarına adaptasyonunu sağlamak ve değişken ortam koşullarında sıcaklık kontrol mekanizmasını geliştirmek için çift katmanlı FDM-bazlı BTYS önermişlerdir. Ortam sıcaklığı, deşarj hızı ve katmanların hacim oranını çalışmada tartışmışlardır. Tasarlanan çift katmanlı yapı sayesinde düşük ortam sıcaklıklarında, ısı kaybı sürecinin uzadığı ve bu sayede batarya sıcaklığının daha uygun çalışma sıcaklığı aralığında tutulabildiği görülmüştür.

Abd ve diğ. (Abd ve diğ., 2024) FDM'nin soğutma performansını geliştirmek için ısı borularının üstün termal iletkenliklerinden yararlanarak FDM ve ısı borusu yardımıyla BTYS tasarlamış ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sadece hava soğutma, FDM ile soğutma, ısı borusu ile soğutma ve yeni tasarlanan BTYS modeli 1C, 2C ve 3C farklı deşarj oranlarında ve farklı hava akış hızlarında karşılaştırılıp detaylıca incelenmiştir. Yeni tasarlanan hibrit modelin özellikle yüksek deşarj oranında sadece hava soğutma, saf FDM ve sadece ısı borusu yardımıyla soğutmaya kıyasla maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı değerlerinde oldukça etkili sonuç verdiği görülmüştür. Hibrit modelin 3C deşarj oranında maksimum sıcaklık değeri 48,1 °C iken sadece hava ve saf FDM kullanılan modelde bu değerin 60 °C'nin ve sadece ısı borusu kullanılan durumda ise 50 °C'nin üzerinde seyrettiği incelenmiştir. Ayrıca sıcaklık farkı karşılaştırıldığında yeni hibrit modelin maksimum sıcaklık farkının 1,8 °C olduğu ve batarya sağlığı için daha üstün soğutma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Chen ve diğ. (Chen ve diğ., 2024) soğutma plakası, FDM ve alev geciktirici bir malzeme olan aerjeli (FDM'nin yaklaşık 6'da biri hafifliğinde) kullanarak soğutma performansı, sistem ağırlığı ve erime oranına olan etkilerini incelemişlerdir. 90x65x18 mm ölçülerinde 8x2 prizmatik batarya kullanmışlardır. Yalnızca FDM, yalnızca soğutma plakası ve her ikisinin birleştirilmesiyle oluşturulan soğutma sistemi incelenmiştir. FDM ve soğutma plakası kullanılan BTYS'nin diğer ikisinden daha üstün soğutma performansına sahip olduğu görülmüştür. Batarya paketinde erimemiş katı halde bulunan FDM'lerin aerjelle değiştirilmesiyle %45'e varan kütle azaltılması sağlanmış olup sistemin soğutma performansı üzerinde çok kritik bir etkisi olmadığı görülmüştür. Xu ve diğ. (Xu ve diğ., 2023) FDM ve aerjel kombinasyonunu farklı bir amaç için kullanmışlardır. Batarya performansının düşük ortam sıcaklığından etkilenmesini önlemek amacıyla aerjelin üstün ısı yalıtımından yararlandıkları bir analiz modeli oluşturmuşlardır. FDM kalınlığı, termal iletkenliği ve aerjel kalınlığı parametreleri optimizasyonu ve bunların bataryanın termal performansına etkileri araştırılmıştır. Chen ve diğ. (Chen ve diğ., 2023) bataryanın güvenli performansını sürdürebilmesi için alev geciktirici FDM ve aerjelin mükemmel alev geciktirici özelliğini kullanarak bitişik hücrelere sahip bir batarya paketi içerisinde termal kaçığa sahip batarya hücresi olduğu durumda hücreden diğer hücrelere ısı transferini araştırmışlardır. Kompozit FDM, alev geciktirici FDM ve aerjel kombinasyonlarının termal kaçak önleme performansları detaylıca karşılaştırılmıştır. Batarya teknolojisini geliştirmek için yapılan bu çalışma sonucunda yapılan kombinasyonların termal kaçak yayılımını geciktirdiği ve EA'lar için umut verici bir yaklaşım olduğu açığa çıkmıştır.

Khan ve diğ. (Khan ve diğ., 2024) bataryanın hızlı şarj/deşarjından dolayı açığa çıkan fazla miktar ısının, batarya üzerindeki olumsuz etkilerine (özellikle güvenlik ve performans açısından) çözüm bulmak amacıyla metalik FDM ve mini soğutma kanalına sahip hibrit BTYS tasarımı geliştirmişlerdir. Metalik FDM kalınlığı (2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm), kanal sayısı (kanalsız, 1 kanal, 2 kanal, 3 kanal ve 4 kanal), soğutucu akış hızı (0,00039 kg/s, 0,00066 kg/s, 0,00093 kg/s, 0,0012 kg/s) çalışılmıştır. Metalik FDM olarak galyumun kullanılmasıyla birlikte sistem kütlesi ve ısı iletiminde iyileşmeler görülmüştür. Ayrıca farklı soğutucu akış hızları için güç tüketimi optimizasyonu çalışması yapılmıştır.

Luo ve diğ. (Luo ve diğ., 2024) batarya paketinin soğutma verimini artırmak için kar tanesi modelinden ilham alarak kanatçık tasarımı geliştirmişlerdir. FDM (OP44E), kanatçık ve sıvı soğutma plakalı hibrit soğutma sistemini iki farklı deşarj hızı (3C ve 5C) için test etmişlerdir. Farklı ortam sıcaklıkları ve değişken soğutucu akış hızlarında gerçekleştirilen analizler sonucunda yeni kanatçık modelinin 3C deşarj hızında, bataryadaki sıcaklık farkını 3 °C'nin altına düşürebildiği görülmüştür. Son olarak, akış hızı-soğutma verimliliği optimizasyonunda, seçilen 0,1 m/s'lik akış hızının batarya hücrelerindeki sıcaklık homojenliğini iyileştirdiği ve maksimum sıcaklığı düşürmede oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Dey ve diğ. (Dey ve diğ., 2024) FDM entegre edilmiş batarya paketine, altıgen formdaki kanatçıklı yapılar ekleyerek termal performans analizi gerçekleştirmişlerdir. Silindirik lityum iyon batarya kullanılarak yapılan çalışmada, kanatçıkların yeni ısı iletim ağlarının gelişmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir. 4C, 6C ve 8C deşarj oranlarında soğutma performansı incelenmiştir. Tasarlanan yeni kanatçık yapısının, batarya hücrelerindeki sıcaklık farkını %60 ve %42 oranında azalttığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarından farklı olarak 3 farklı FDM'nin (RT31, RT38 ve RT42) olduğu durumda ve farklı sayıda radyal kanatçık (1, 3 ve 5 kanatçık) varlığında yer çekimi etkisinde ve ihmal edildiği durumda bataryanın termal performansı araştırıldı ve diğer durumlar (hazne çapı, deşarj oranı) detaylıca kıyaslandı ve tartışıldı. Ek olarak FDM gizli ısısının bataryadaki sıcaklık değişimine ve soğutma performansına katkısı incelendi.

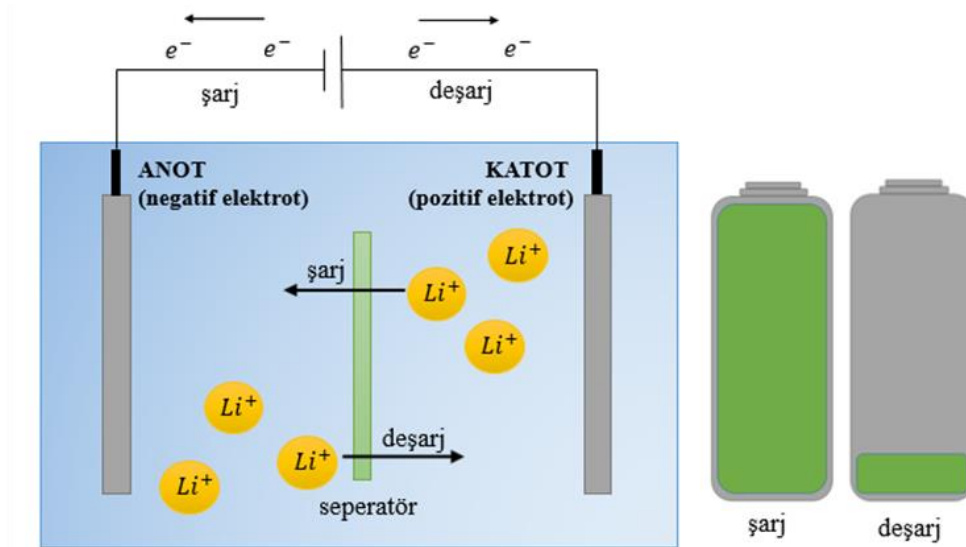
3. MALZEME VE YÖNTEM

Mevcut çalışma modeli içten dışa doğru sırasıyla batarya, kanatçık, FDM ve hazneden oluşmaktadır. Kullanılan bileşenlerin malzeme özellikleri, sınıflandırılması ve çalışma prensipleri bu bölümde detaylıca verilmiştir.

3.1. Lityum İyon Bataryalar

Bataryalar, uygun koşullarda bir elektrik devresiyle tamamlandığında depoladığı kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür (Goodenough, 2015). Birçok batarya türü olmasına rağmen diğerlerine kıyasla EA’larda kullanım için LİB’lerin uygun özelliklere sahip olmasının etkisi şüphesizdir ve bu nedenle son zamanlarda bilim insanları tarafından oldukça ilgi odağı haline gelmiştir.

Bir lityum iyon batarya hücresi temelde pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), seperatör ve bunları birleştiren lityum iyonlarının hareketine izin veren elektrolit ortamdan oluşur. Seperatör serbest lityum iyonlarının geçişini sağlayan fakat elektron geçişine izin vermeyen mikro gözenekli yapıya sahiptir. Deşarj esnasında anottan hareket eden ve elektronlarından ayrılan lityum iyonları katotta elektronlarıyla bağlanır (Şen ve diğ., 2024). Devre üzerinde elektriksel nötrlüğü dengelemek amacıyla elektron ve lityum iyonların hareketi tam tersi yönünde seyreder (Khan, Hussain ve diğ., 2024). Anlatılan çalışma prensibi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Lityum iyon bataryanın çalışma prensibi

LiCoO₂/grafit hücresinde şarj/deşarj esnasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar Denklem 3.1 - 3.3'te verildiği gibidir (Khan, Hussain ve diğ., 2024).

Katotta:



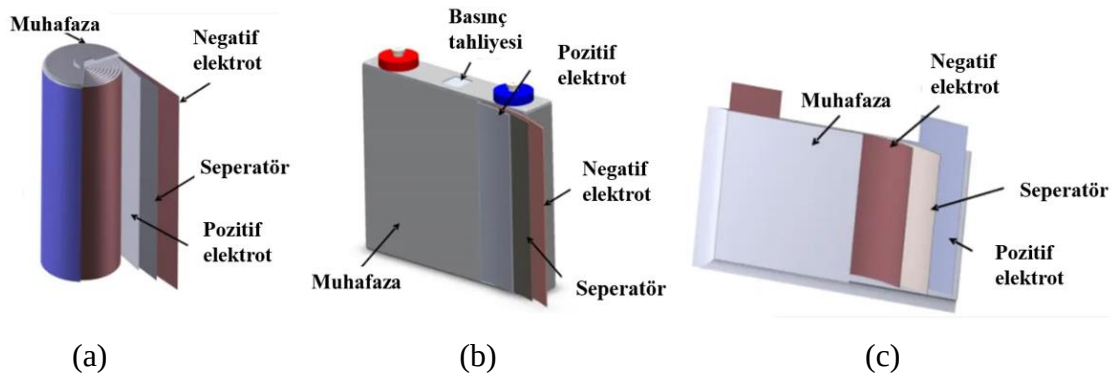
Anotta:



Tüm kimyasal reaksiyon:



Lityum iyon batarya hücrelerinin farklı türleri (silindirik, prizmatik ve kese tipi) olmasına rağmen bunların içinden silindirik hücreler yüksek basınçlara dayanımı, seri üretime yatkınlığı ve mekanik kararlılıkları sayesinde ön plana çıkmaktadır. Lityum iyon batarya türlerinin şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir. (Khan, Hussain ve diğ., 2024).



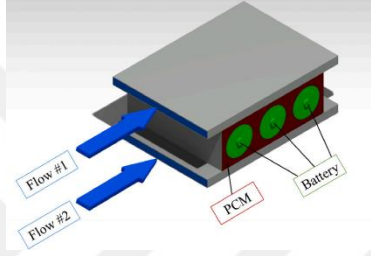
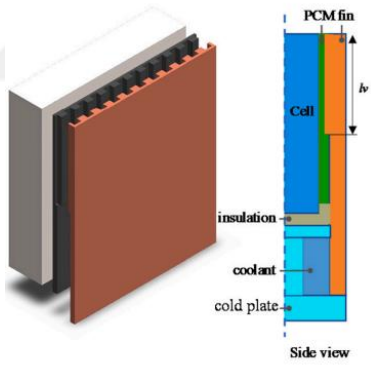
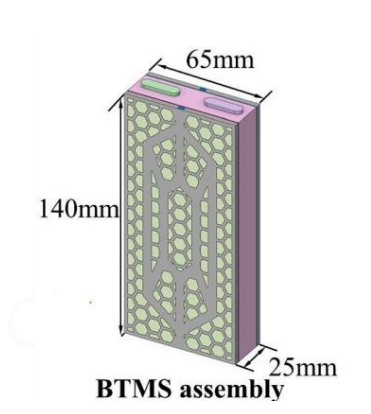
Şekil 3.2. Lityum iyon batarya tiplerinin şematik gösterimi; a) silindirik batarya hücresi, b) prizmatik batarya hücresi, c) kese tipi batarya hücresi (Lidbeck & Syed, 2017)

Bir EA için temel olarak iki kritik kavram önem arz etmektedir: sürüş mesafesi (menzil) ve şarj süresi. Uzun şarj süreleri EA'ların önünde ciddi bir sorun olarak kabul edildiğinden bu sürenin kısaltılma çalışmaları hızla devam etmektedir. Yüksek şarj hızları beraberinde yüksek sıcaklıkları da getirmektedir. Bu sürecin, bataryanın hızlı yaşlanmasına, batarya kapasitesinin düşmesine, ciddi güvenlik tehlikelerine ve batarya

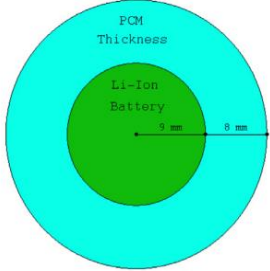
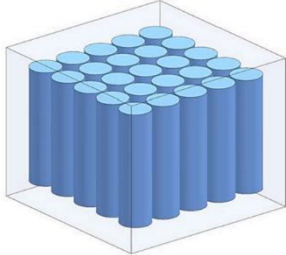
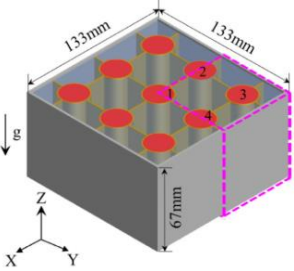
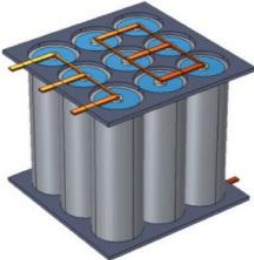
kimyasında geri döndürülemez sorunlara yol açabileceğinden hızlı şarj/deşarj stratejileri önemli oranda geliştirilmelidir. Bu konuda birçok farklı yaklaşım stratejileri söz konusudur. Hızlı şarjın önündeki kısıtlayıcı parametre anot malzemesinin ne kadar yük kabul edebileceğidir. Anot malzemesi grafit olan hücrelere hızlı şarj işlemi uygulanırsa büyük problemlere neden olabilecek lityum kaplama oluşur. Lityum kaplama batarya kapasitesini olumsuz etkilerken empedansının yükselmesine neden olur. Bu durumu engellemek için batarya hücrelerinin termal davranışının hızlı şarja hazırlanması uygun ve yeterli koşullarda sağlanan BTYS ile mümkün olmaktadır (Wassiliadis ve diğ., 2021). Literatürde EA’larda sıklıkla kullanılan batarya türleri, şematik gösterimi ve termofiziksel özellikleri Tablo 3.1’de sunuldu.

EA için kilit bileşen olan bataryaların, birim hacim ve birim kütleleri başına yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları gerekmektedir. EA’nın tek bir şarjla gidebileceği sürüş mesafesi doğrudan batarya kapasitesiyle ilişkili olup günümüzde sürekli olarak geliştirme çabaları devam etmektedir (Khan ve diğ., 2023). Lityum iyon bataryalar diğer batarya türlerine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu (100–265 Wh/kg veya 250–670 Wh/L) taşırlar (Gu, 2023). Ayrıca düşük kendi kendinedeşarj oranı, uzun çevrim ömrü ve daha çevreci olması da mevcut durumda EA’larda güç kaynağı olarak kullanımını zorunlu hale getirmektedir (Lai ve diğ., 2022). Ancak bununla birlikte lityum iyon bataryalar sıcaklığa oldukça duyarlıdır. Optimum çalışma sıcaklığı koşullarının dışında, beklenen performansı karşılamazlar (Wassiliadis ve diğ., 2021). Batarya hücresinin sıcaklığı termodinamik denge yasasına dayanmaktadır ve bataryada üretilen ısı ve batarya dışına transfer edilen ısı miktarı dengesiyle kurulmaktadır (Weng ve diğ., 2022). Lityum iyon bataryaların etkili çalışma sıcaklığı 25-40 °C arasındadır (Ranjbar Kermani ve diğ., 2024). Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, 0 °C’nin altındaki sıcaklık değerlerinde bataryanın enerji verimliliği ve güç kapasitesi önemli oranda azalır ve batarya yaşlanması hızlanır (Ma ve diğ., 2018). Ye ve diğ. (Ye ve diğ., 2024) bataryanın düşük ortam sıcaklıklarından etkilenmesini önlemek amacıyla batarya sıcaklığını kontrol altına alan bir hızlı ön ısıtma sistemi geliştirmiş ve bu sayede daha kısa şarj süresi ve daha düşük enerji tüketimi sağlamışlardır.

Tablo 3.1. EA’larda kullanılan batarya türlerinin termofiziksel özellikleri

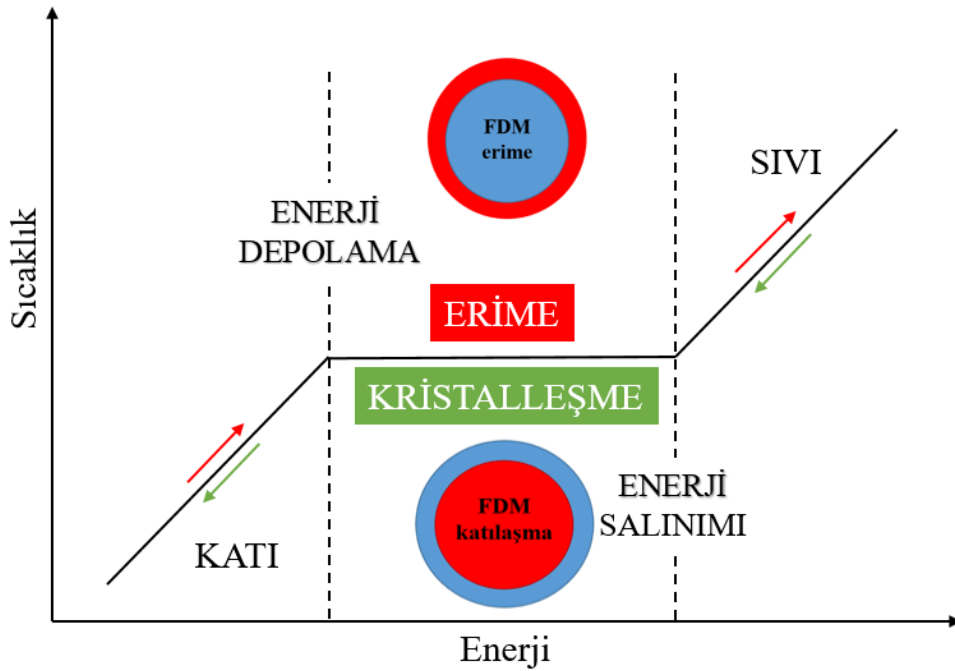
Batarya türü	Şematik gösterim	Yoğunluk (ρ) (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi (C_p) (J/kg·K)	Isı iletim katsayısı (k) (W/m·K)
26650 LiFePO4 silindirik hücre (Jiang ve diğ., 2016)		-	1375	0,98
Li-iyon 18650 silindirik hücre (Moaveni ve diğ., 2024)		2720	300	3
Li-iyon prizmatik hücre (15 × 65 × 140 mm) (Rong ve diğ., 2024)		2110	1264	$k_x, k_y = 15,6$ $k_z = 1,4$
Li-iyon prizmatik hücre (18 × 65 × 140 mm)(An ve diğ., 2024)		2140	1633	$k_x, k_y = 29$ $k_z = 1$

Tablo 3.1. (Devam) EA’larda kullanılan batarya türlerinin termofiziksel özellikleri

Li-iyon 18650 silindirik hücre, Panasonic NCR18650PF, 2.4Ah (Choudhari ve diğ., 2020)		2720	300	3
Li-iyon 18650 Silindirik (Feng ve diğ., 2024)		2721	1217	$k_r = k_\theta = 0,9$ $k_z = 12,5$
Silindirik hücre Panasonic NCR18650BD (Akula ve diğ., 2024)		1113	959	$k_r = 0,413$ $k_\theta = k_z = 1,78$
Li-iyon 26650 silindirik hücre (Fan ve diğ., 2021)		2700 (iç) 7980 (kabuk)	1100 (iç) 500 (kabuk)	5,5 (iç) 39 (kabuk)
Li-iyon 18650 silindirik hücre (Su ve diğ., 2024)		2758	1108	1,17 (radyal) 36,8 (eksenel)

3.2. FDM

FDM'ler, sahip oldukları gizli ısıları sayesinde katı-sıvı ve sıvı-katı fazlar arasında geçiş yaparak ısıyı absorbe edebilen ve serbest bırakabilen malzemelerdir (Khan ve diğ., 2023). FDM bataryanın şarj ve deşarjı sırasında açığa çıkan ısıyı absorbe ederek katı fazdan sıvı faza geçer. Bataryanın ısı üretimi durduğunda ise absorbe ettiği ısıyı serbest bırakarak katı faza dönüşür (Mahmud ve diğ., 2023). FDM'nin katı ve sıvı faz arasındaki dönüşüm prensibi Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu malzemeler, sahip oldukları erime-katılaşma sıcaklıklarına göre bu iki fazda, yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı için farklı değerler alır. FDM'lerin sisteme uyumluluk derecesi, sahip olduğu termodinamik, kimyasal, kinetik ve ekonomik olma özellikleriyle belirlenir ancak seçilen tek bir FDM, arzu edilen özellikleri karşılamada yeterli gelmeyebilir (Liu ve diğ., 2022). FDM'ler bir sisteme entegre edildiğinde, sistemin operasyon sıcaklığı ve FDM'nin faz dönüşüm sıcaklıklarının optimize edilmesi kritik konulardan biridir. Bir diğer kritik konu, enerji verimliliği ön planda tutulduğunda termal depolama kapasitesinin iyileştirilmesi için FDM'nin yüksek gizli ısı ve özgül ısı değerlerine sahip olması istenir. Ayrıca sıcaklık homojenliğinin geliştirilmesi için yüksek termal iletkenliğe sahip kompozit faz değıştiren malzemeler kullanılabilir, FDM'nin temas alanı ve hacim geometrisi optimizasyonu yapılabilir.



Şekil 3.3. FDM'nin katı ve sıvı fazlar arasında dönüşüm prensibi

FDM'ler kimyasal bileşimlerine göre organik, inorganik ve ötektik olarak 3 grupta incelenebilir (Liu ve diğ., 2022). Aşağıda, bu 3 grubun özellikleri, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajları sırasıyla ele alınmıştır.

3.2.1. Organik FDM'ler

Organik FDM'ler, katı-katı ve katı-sıvı haller arasında faz değişimi geçiren ve mükemmel termal özelliklere sahip hidrokarbon bileşikleridir. Parafin, yağ asitleri ve polialkol sıklıkla kullanılan organik FDM'lerdir (Liu ve diğ., 2022). Bu malzemeler, şarj ve deşarj esnasında üstün enerji depolama özellikleri sayesinde bataryadaki artan sıcaklığı düzenlemeye yardımcı olur ve uygulamalarda seçilebilecek geniş erime sıcaklığı aralığıyla termal depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar (Sharshir ve diğ., 2023). Diğer FDM türlerine kıyasla düşük maliyet, küçük hacim değişimi, kimyasal kararlılık, iyi kendi kendine çekirdeklenme ve korozyona dayanıklılığı sayesinde yüksek teknoloji termal yönetim sistemlerinde organik FDM'ler ön plana çıkmaktadır. (Liu ve diğ., 2022; Weng ve diğ., 2022). Ancak tüm bu özelliklerinin yanı sıra düşük termal iletkenlik, kolay alevlenme ve sızıntı riskinden dolayı kullanımları sınırlıdır. Son yıllarda, EA'larda FDM'lerin uygulanabilirliğini artırmak ve güvenli ortam koşullarını temin etmek amacıyla ciddi gelişmeler kaydedilmiştir. Bunlara örnek olarak, termal iletkenliği geliştirmeye yönelik kanatçık tasarımı, nanoakışkan kullanımı batarya için yanma önleyici yalıtım malzemelerinin modellenmesi, hazne sızdırmazlığının iyileştirilmesi optimizasyonu verilebilir.

3.2.2. İnorganik FDM'ler

Tuzlar, tuz hidratlar ve metaller inorganik FDM'lerdir (Liu ve diğ., 2022; Weng ve diğ., 2022). Organik olanlara kıyasla, inorganik FDM'ler yüksek hacimsel gizli ısıya (yaklaşık 350 MJ/m³) ve daha yüksek termal iletkenliklere (yaklaşık 0,5 W/m·K) sahiptirler buna karşın korozyona ve istenmeyen büyük hacim değişimlerine uğrarlar.

3.2.3. Ötektik FDM'ler

Ötektik FDM'ler, organik-organik, inorganik-inorganik veya organik-inorganik FDM'lerin bir araya getirilip sentezlenmesiyle oluşturulur (Maknikar & Pawar, 2023). Ötektik FDM'ler, sentezlendiği tekil FDM ile karşılaştırıldığında daha düşük erime

sıcaklığına sahiptir (Jacob ve diğ., 2023). Yüksek stabiliteye sahip olan bu FDM’ler, aynı sıcaklıkta katılaşma ve erime özelliğini barındıran homojen karışımlardır. Ancak yüksek maliyetleri nedeniyle uygulama alanlarında ve ticari kullanımlarda çok tercih edilmediğinden geri planda kalmaktadır.

Tablo 3.2’de literatürdeki mevcut çalışmalarda sıklıkla kullanılan FDM’lerin termofiziksel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 3.2. EA’lar için literatürde sıklıkla kullanılan FDM’lerin termofiziksel özellikleri

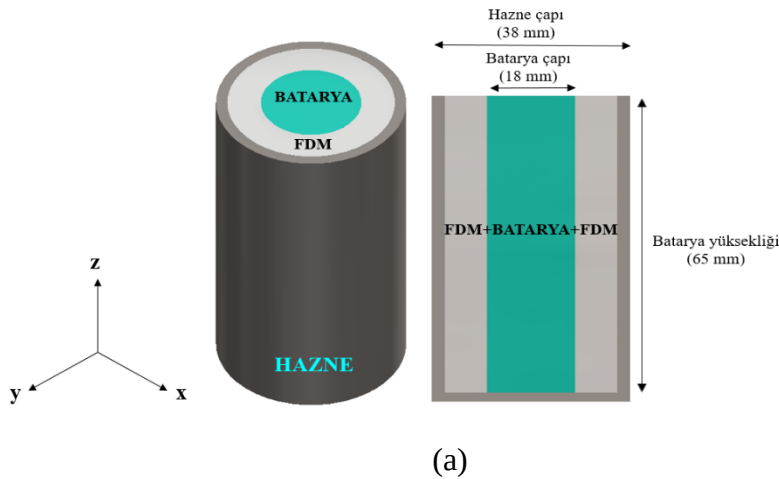
FDM	Faz değişim sıcaklığı (T _e) (°C)	Yoğunluk (ρ_k) (kg/m ³)	Yoğunluk (ρ_s) (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi (C _p) (J/kg·K)	Gizli ısı (L) (J/kg)	Isı iletim katsayısı (k) (W/m·K)
RT44HC/EG (%70 -%30) (Jiang ve diğ., 2016)		-	-	1631	192500	13,85
Laurik asit (Jilte ve diğ., 2019)	43,5-48,2	940	885	2180 (k) 2390 (s)	187210	0,16 (k) 0,14 (s)
Parafin RT27 (El Idi ve diğ., 2021)	27	870	760	2400 (k) 1800 (s)	179000	0,24 (k) 0,15 (s)
Parafin RT58 (El Idi ve diğ., 2021)	58	850	775	2100	181000	0,2
Parafin RT44HC (Moaveni ve diğ., 2024)	41-44	-	750	2250	270700	0,2
Parafin OP44E (Sun ve diğ., 2019)	40,6-44,7	880	770	2000	240800	0,2
RT58 (Kadam & Kongi, 2023)	54-58	900	760	1800 (k) 2400 (s)	179000	0,2

3.3. Problem Tanımı

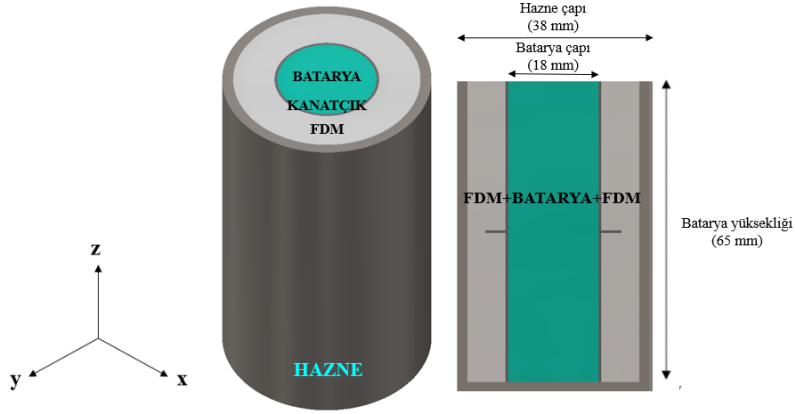
Elektrikli araçların hızlı şarj deşarj esnasında kontrol edilebilir, güvenli sıcaklık değerlerinde performansını sürdürebilmesi için farklı FDM’ler (RT31, RT38 ve RT42) ve değişken sayıda (1, 3 ve 5 kanatçık) radyal kanatçık yapısı sisteme entegre edildiğinde termal performansı iyileştirme etkilerini araştırmak amacıyla bir adet batarya hücresi dikkate alındı. Belirlenen stratejilerin batarya sıcaklığı üzerindeki etkilerini ve sistemin yararlılığını belirlemek amacıyla batarya modeli oluşturuldu. Bu batarya modelinde, Samsung INR18650 30Q, 18 mm çap ve 65 mm uzunluğa sahip batarya hücresiyle 0,5

mm genişliğinde alüminyum alaşımlı (Al 6061) radyal kanatçık temas halinde olup en dış katmanda 2 mm kalınlığa sahip naylon (PA66) hazne ile muhafaza edilmektedir. Ara katman ise her bir durum için FDM (RT31, RT38 ve RT42) ile doldurulmuş olup batarya sağlığı için en uygun çalışma koşullarını belirlemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ile çalışıldı. Çalışma modelinde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 3.3'te verildi. Dar sıcaklık aralığında, büyük miktarda enerji absorbe edebilme ve salabilme yeteneğine sahip bir organik FDM olan RT serisi kullanılmıştır (Rubitherm GmbH., Germany).

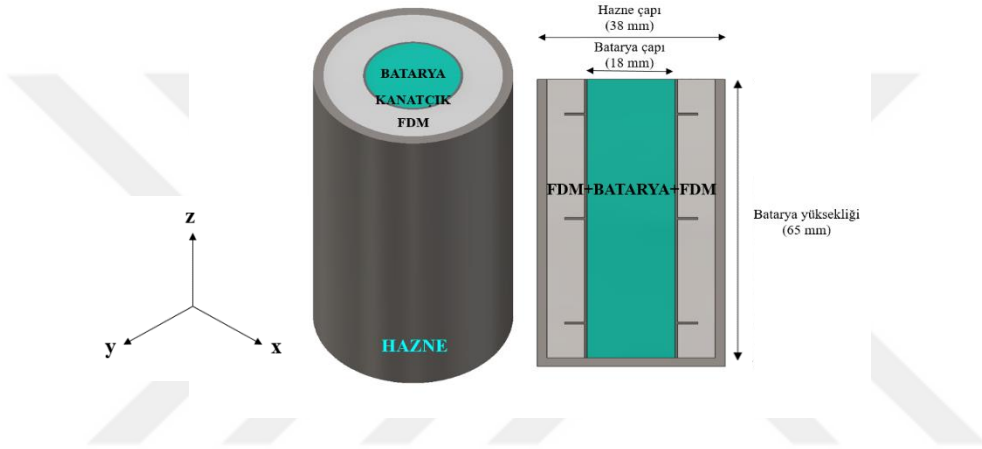
Çalışma modeli için 3 adet tasarım senaryosu kurgulandı (Şekil 3.4). Referans durum, batarya+FDM+hazne; Tasarım-I, batarya + 1 radyal kanatçık + FDM + hazne; Tasarım-II, batarya + 3 radyal kanatçık + FDM + hazne; Tasarım-III, batarya + 5 radyal kanatçık + FDM + hazne olarak düzenlendi. Çalışılan tasarım modellerinde yer çekimi ivmesi ($\vec{g}$), z yönünde $-9,81 \text{ m/s}^2$ olarak alındı. Yer çekimi ivmesinin olduğu durum ve ihmal edildiği durumlarda bataryanın sıcaklık değerleri ve FDM erime oranları da ayrıca kaydedildi ve tartışıldı. FDM'nin yer çekimi ivmesiyle hareketi esnasında bataryadaki sıcaklık değerlerinin nasıl etkilendiğini araştırmak amacıyla batarya yüzeyinde kritik öneme sahip 3 farklı nokta belirlendi. Noktalar z eksenı boyunca sırasıyla T_1 , T_2 ve T_3 olarak isimlendirildi ve $+0,025 \text{ m}$, 0 m ve $-0,025 \text{ m}$ koordinat değerlerinde atandı.



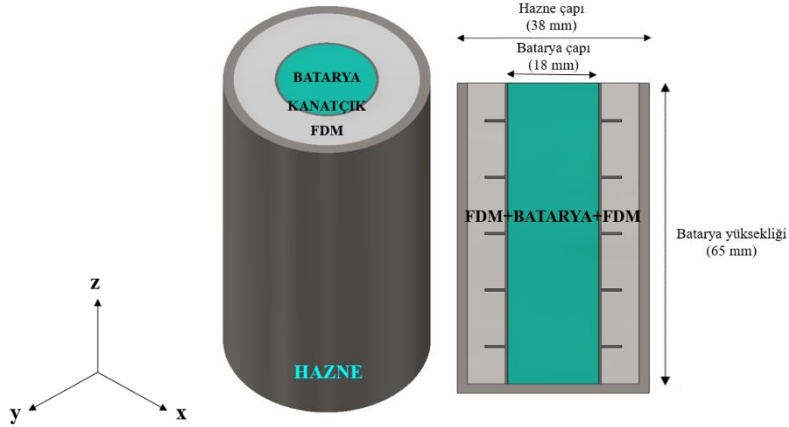
Şekil 3.4. BTYS'nin şematik gösterimi. a) Kanatçısız durumda sadece FDM olması halinde (Referans durum), b) 1 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-I), c) 3 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-II), d) 5 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-III)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.4. (Devam) BTYS'nin şematik gösterimi. a) Kanatçiksız durumda sadece FDM olması halinde (Referans durum), b) 1 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-I), c) 3 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-II), d) 5 radyal kanatçık sisteme entegre edildiğinde (Tasarım-III)

Tablo 3.3. Mevcut çalışmada kullanılan hazne, batarya, kanatçık ve FDM'lerin termofiziksel özellikleri (Fan ve diğ., 2021; Tete ve diğ., 2022)

Malzeme	ρ (kg /m ³)	C_p (J / (kg · K))	k (W/(m · K))	T_e (°C)	L (J/kg)
Naylon (PA66)	1140	1670	0,28	-	-
Batarya (INR 18650 30Q)	2775	880	3	-	-
Kanatçık (Al 6061)	2700	896	167	-	-
FDM (RT31)	880 (k) 760 (s)	2000	0,2	29 (k) 34 (s)	165000
FDM (RT38)	880 (k) 750 (s)	2000	0,2	34 (k) 39 (s)	170000
FDM (RT42)	880 (k) 760 (s)	2000	0,2	38 (k) 43 (s)	165000

En iyi termal performansı tespit etmek için hazne iç çapı sayısal analizler yardımıyla değiştirildi ve 26 mm, 30 mm ve 34 mm hazne iç çapı olacak şekilde (hazne kalınlığı ve diğer tüm parametreler sabit tutulup) sırasıyla test edildi. Bu sayede sistem için optimum FDM çapı belirlenirken aynı zamanda kütle optimizasyonundan dolayı gereksiz enerji tüketimi de kontrol altına alınır. Bataryanın farklı deşarj oranlarında (1C, 3C ve 5C için) öncelikle sadece FDM (RT31, RT38, RT42) olması halinde termal performansı incelendi. Tez çalışmasında kullanılan bataryaya özgü deşarj oranını ve deşarj süresini belirlerken nominal kapasite, deşarj akımı, deşarj kapasitesi ve uygulanan akım değerleri gerekli olup bu değerlere göre hesap yapıldı. Bataryanın çalışması gereken limit değerın üzerinde seyreden durumlar için radyal kanatçık uygulamasına gidildi. FDM'den çok daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip alüminyum alaşımlı (Al 6061) kanatçığın sisteme eklenmesiyle birlikte ısı transferi artırıldı ve bu sayede maksimum sıcaklık değeri güvenli bölgeye çekildi. Ayrıca, kanatçık sayısı optimizasyonu da gerçekleştirildi. Radyal kanatçık (1, 3 ve 5 adet), her bir durum için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ile çalışıldı. Tez çalışmasındaki akış ve ısı transferi 3 boyutlu olarak çözüldü.

3.4. Yönetici Denklemler

Elektrikli araç bataryalarındaki kompleks şarj ve deşarj süreçlerini çözümlemek için aşağıdaki varsayımlar gerekmektedir.

- 1) FDM (yoğunluk hariç), batarya, kanatçık ve hazne malzemelerinin termofiziksel özellikleri sıcaklıkla değişmemektedir.
- 2) Sıvı FDM'nin laminar akışla hareket ettiği, sıkıştırılamaz ve Newton tipi akışkan olduğu kabul edilmiştir.
- 3) Radyasyonla ısı transferi göz ardı edilmiştir.

Batarya, FDM, kanatçık ve hazne için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir (Sun ve diğ., 2021; Liu ve diğ., 2023; Rong ve diğ., 2024; Fayaz ve diğ., 2024).

Süreklilik denklemi (Denklem 3.4):

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u}) = 0 \quad (3.4)$$

Momentum denklemi (Denklem 3.5):

$$\frac{\partial (\rho_f \vec{u})}{\partial t} + \nabla (\rho_f \vec{u}) = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 \vec{u} + \rho_f G + S_f \quad (3.5)$$

Batarya hücresinde şarj ve deşarj esnasında sürekli olarak ısı üretimi gerçekleşmektedir. Batarya için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 3.6).

$$\rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \nabla (k_b \nabla T_b) + \dot{q}_{\dot{u}} \quad (3.6)$$

Burada, ρ_b (kg/m³) batarya malzemesinin yoğunluğunu, $C_{p,b}$ (J/kg·K) bataryanın özgül ısı kapasitesini, T_b (K) batarya sıcaklığını, k_b (W/m·K) bataryanın ısı iletim katsayısını, $\dot{q}_{\dot{u}}$ bataryadaki hacimsel ısı üretim hızını ifade etmektedir.

FDM için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 3.7).

$$\frac{\partial (\rho_f H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u} H) = \nabla (k_f \nabla T) \quad (3.7)$$

Burada, ρ_f (kg/m³) FDM'nin yoğunluğunu, H entalpi değerini, k_f (W/m·K) FDM'nin ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. Denklem 3.8 - 3.11 kullanılarak entalpi değeri hesaplanmaktadır.

$$H = h + \Delta H \quad (3.8)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_0}^T C_p dT \quad (3.9)$$

$$\Delta H = \beta \gamma \quad (3.10)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_{katılma} \\ \frac{T - T_{katılma}}{T_{sıvılaşma} - T_{katılma}}, & T_{katılma} < T < T_{sıvılaşma} \\ 1, & T > T_{sıvılaşma} \end{cases} \quad (3.11)$$

Burada, $T_{katılma}$ ve $T_{sıvılaşma}$ FDM'nin faz değişim sıcaklıklarını, β erime oranını, γ FDM'nin spesifik gizli ısısını ifade etmektedir. RT31, RT38 ve RT42 için katılma ve erime sıcaklıkları $T_{katılma}$ ve $T_{sıvılaşma}$ sırasıyla 29-34 °C, 34-39 °C ve 38-43 °C'dir.

Kanatçık için enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 3.12).

$$\rho_k c_{p,k} \frac{\partial T_k}{\partial t} = k_k \nabla^2 T_k \quad (3.12)$$

Burada ρ_k (kg/m³) kanatçık malzemesinin yoğunluğunu, $C_{p,k}$ (J/kg·K) kanatçık malzemesinin özgül ısı kapasitesini, T_k (K) sıcaklığı, k_k (W/m·K) kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

Bataryanın etrafındaki FDM'yi muhafaza eden, koruyan ve şekillendiren hazne malzemesi olarak rijit, ısıya dayanıklı, yüksek kimyasal dayanım ve yüksek mukavemete sahip Naylon (Poliamid 66) seçilmiştir. Hazne için enerjinin korunumu denklemi aşağıda sunulmuştur (Denklem 3.13).

$$\rho_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = k_h \nabla^2 T_h \quad (3.13)$$

Bu denklemde ρ_h (kg/m³), $C_{p,h}$ (J/kg·K), T_h (K), k_h (W/m·K) sırasıyla hazne malzemesinin yoğunluğunu, hazne malzemesinin özgül ısı kapasitesini, sıcaklığı, ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

Mevcut çalışmadaki hesaplama bölgesi için başlangıç koşulları Denklem 3.14'teki gibidir:

$$t=0, T=T_b=T_f=T_k=T_h=T_0 \quad (3.14)$$

Burada T_0 , ortam sıcaklığını temsil etmekte olup 25 °C olarak alınmıştır.

Batarya-FDM sınır koşulları aşağıdaki gibidir (Denklem 3.15):

$$-k_b \frac{\partial T_b}{\partial \eta} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial \eta} \quad (3.15)$$

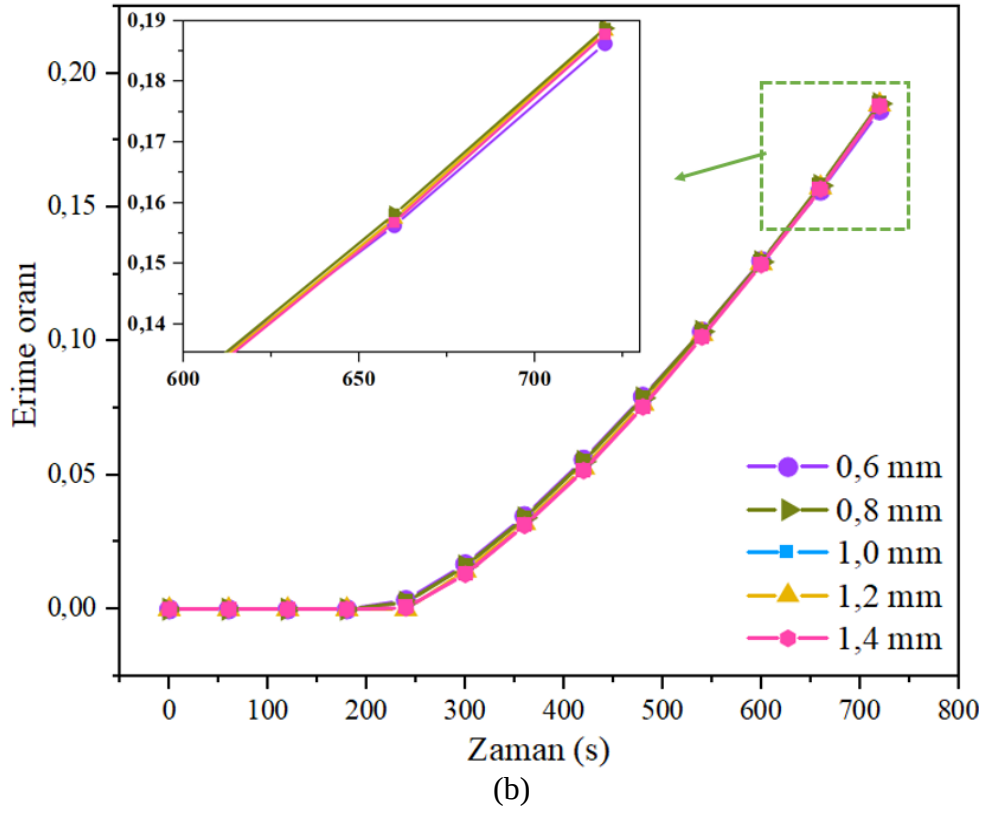
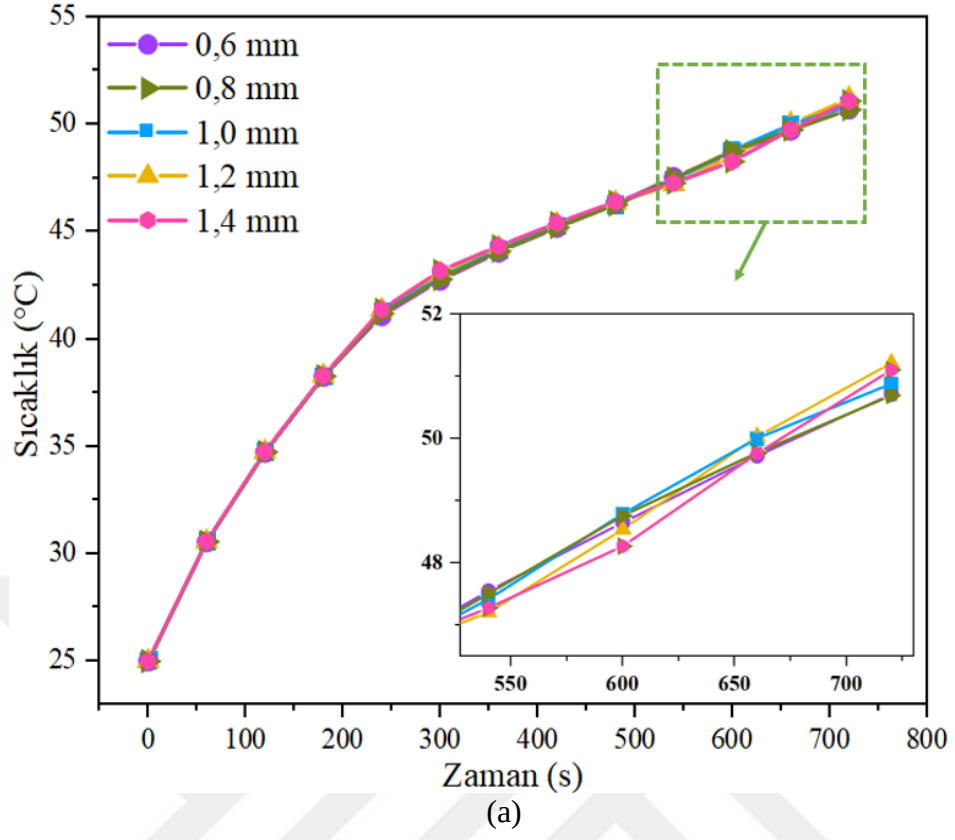
FDM-hazne sınır koşulları aşağıdaki gibidir (Denklem 3.16):

$$-k_f \frac{\partial T_f}{\partial \eta} = -k_h \frac{\partial T_h}{\partial \eta} \quad (3.16)$$

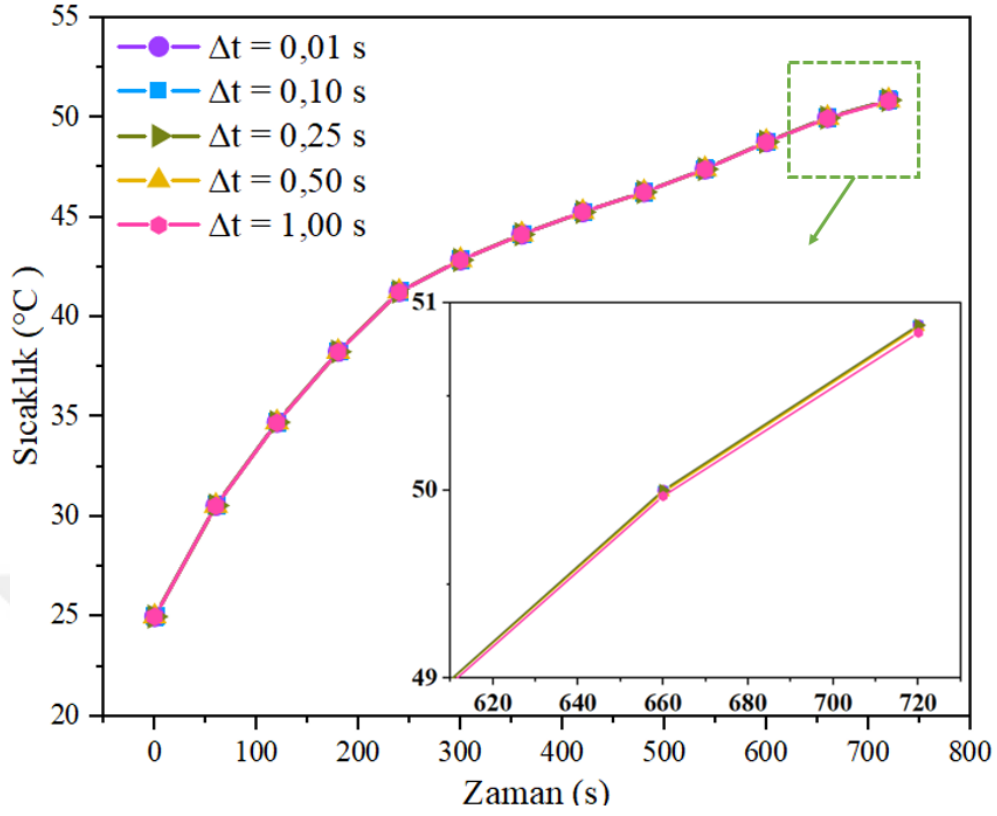
Hazne-dış ortam sınır koşulu adyabatik olarak alınmıştır.

3.5. Ağ Boyutu ve Zaman Adımından Bağımsızlık Testi

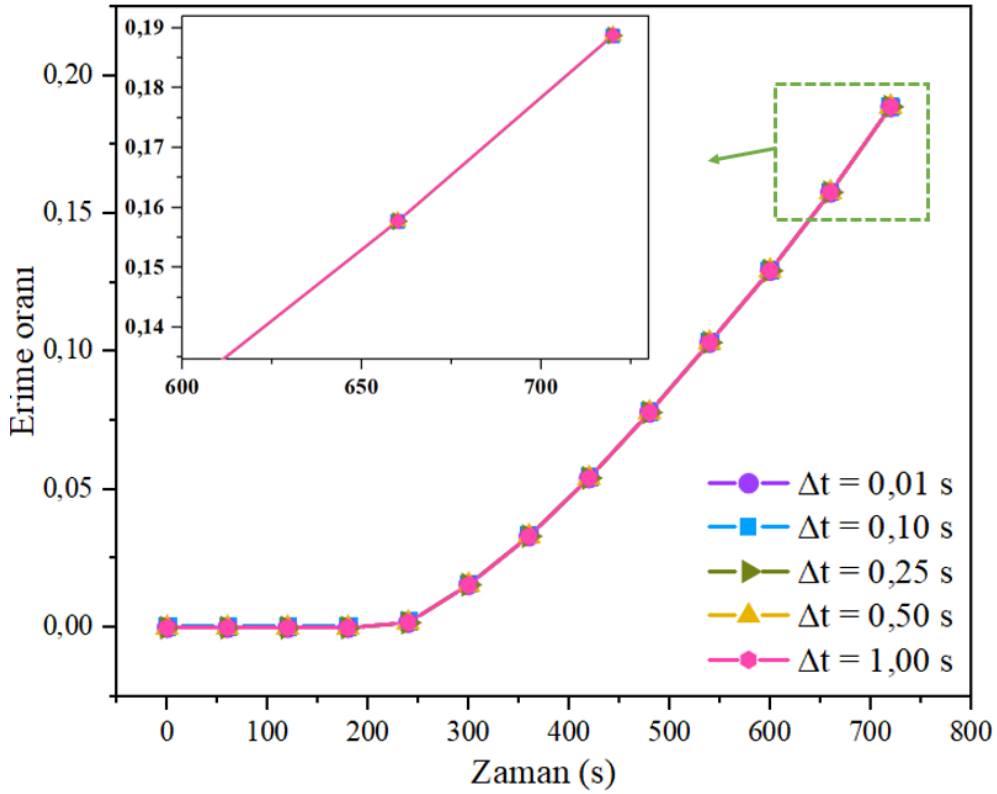
Tasarlanan batarya modelinde öncelikle, ağ boyutundan bağımsızlık testi çalışıldı (RT42-referans durum için). Ağ boyutunun analiz sonuçları üzerinde önemli etkileri olabileceğinden bu adım önem arz etmektedir. Çözüm sonuçlarının ağ boyutundan bağımsız olduğunu test etmek amacıyla $\Delta x = 0,6$ mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm ve 1,4 mm olmak üzere 5 farklı ağ boyutu analizi gerçekleştirildi (ağ boyutu testi için $\Delta t = 0,25$ s olarak alınmıştır). Bu ağ boyutları için eleman ve düğüm sayıları sırasıyla 1242464, 547572, 272400, 167634, 104650 ve 620200, 275895, 137750, 82121, 51638'dir. Şekil 3.5'ten de görülebileceği gibi $\Delta x = 0,6$ mm, 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm ve 1,4 mm ağ boyutları için maksimum sıcaklık değeri ve erime oranı grafiklerinde ihmal edilebilecek bir fark olduğu görüldü. Ancak, hassas bir çözümleme yapabilmek ve aynı zamanda, zaman tasarrufu sağlamak adına daha sonraki çalışmalarda uygulanmak üzere optimum ağ boyutunun seçilmesi gereklidir. Bu bağlamda, hesaplanacak sayısal çözümler için güvenilirlik ve zaman maliyeti göz önüne alındığında 1 mm ağ boyutunun yeterli olduğuna karar verildi. Ağ boyutundan bağımsızlık testine ek olarak, zaman adımından bağımsızlık testi de çalışılmış olup Şekil 3.6'da sayısal sonuçlar sunuldu. $\Delta t = 0,01$ s, 0,1 s, 0,25 s, 0,5 s ve 1,0 s olmak üzere 5 farklı zaman adımı çalışılmış olup 5C deşarj süreci boyunca maksimum sıcaklık ve erime oranı eğrisinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlendi. Bu nedenle hesaplanacak sayısal kodlar için 0,5 s zaman adımının uygun olduğuna karar verildi.



Şekil 3.5. 5C deşarj koşullarında ağ boyutundan bağımsızlık testi. (a) Sıcaklığın zamanla değişimi, (b) Erime oranının zamanla değişimi



(a)



(b)

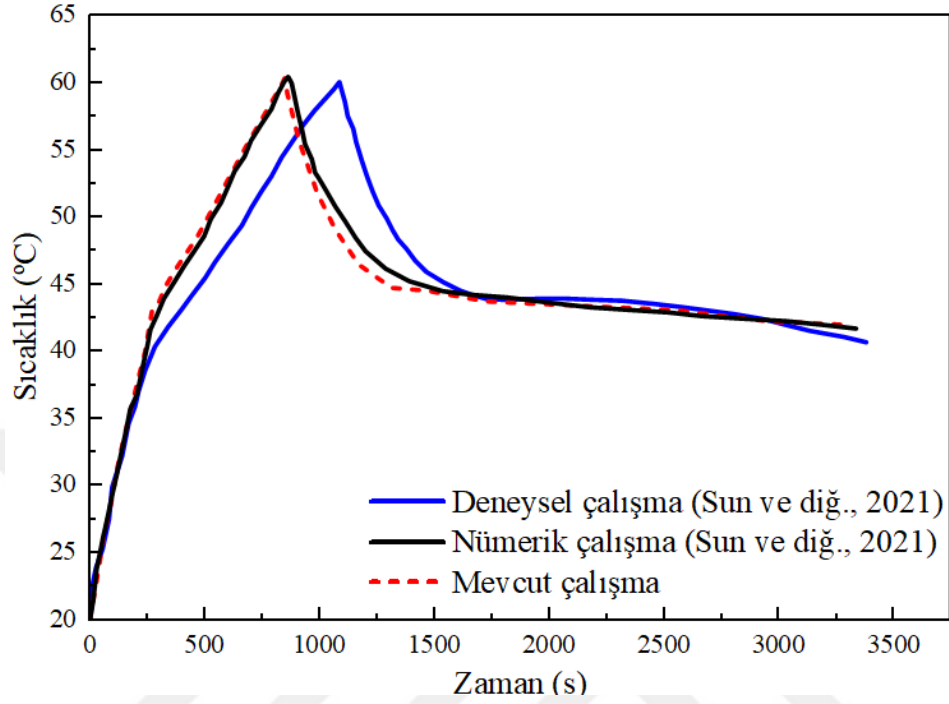
Şekil 3.6. 5C deşarj koşullarında zaman adımından bağımsızlık testi. (a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi (b) Erime oranının zamanla değişimi

3.6. Doğrulama Çalışması

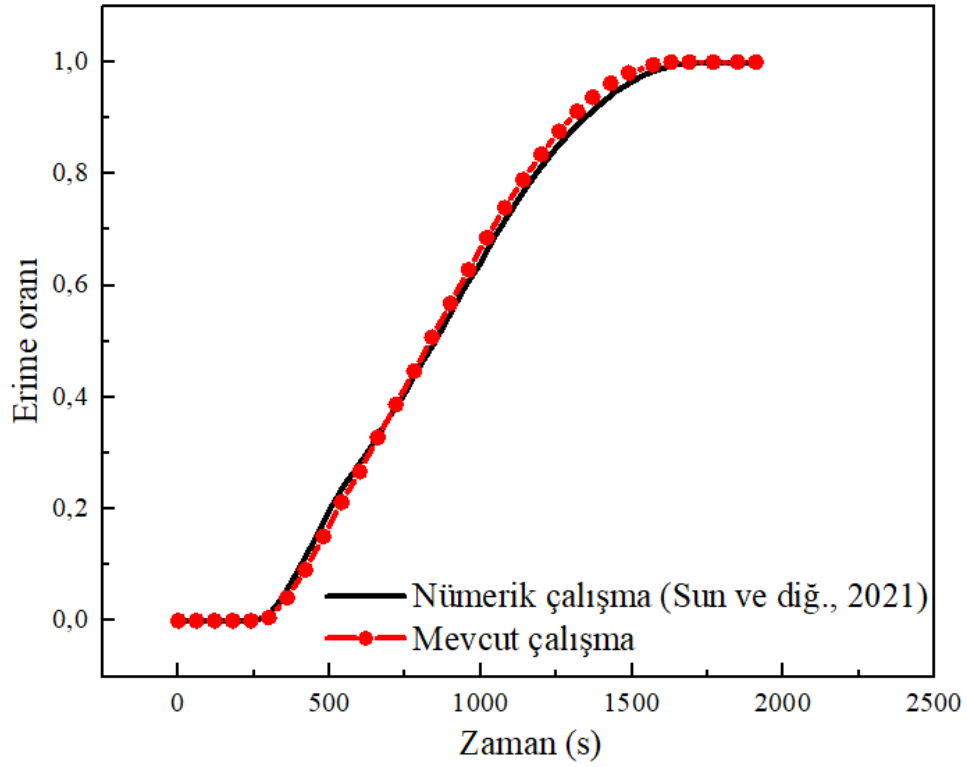
Sun ve diğ. (Sun ve diğ., 2021) FDM'nin soğutma performansını iyileştirmek amacıyla batarya yüzeyiyle temas halinde olan düz ve yay kanatçık tasarımı geliştirmişlerdir. Tek bir silindirik 26650 LİB (dışında 75 mm uzunluğa ve 2 mm kalınlığa sahip hazne ile korunan) ve OP44E (43 mm dış çapa sahip) kullanarak tasarladıkları modeli 8 W, 12 W, 16 W test koşulları altında deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. 20 °C, 30 °C ve 40 °C ortam sıcaklıkları için çalışılan modelde, FDM ve kanatçık kullanılan durumda, sadece FDM kullanılan duruma kıyasla operasyon süresinde büyük oranda iyileşme gözlenmiştir. Aynı zamanda, sisteme kanatçık entegrasyonu ve süreç içerisinde faz dönüşümünün gerçekleşmesiyle ısı transferinin iyileştiği ve sıcaklık eğiminin düşüş gösterdiği görülmüştür. Deneysel ve sayısal olarak kurulan modelde, 16 W ısı üretim oranı için düz kanatçıklı durumda FDM'nin erime süreçleri 300. saniyeden başlayarak 1980. saniyenin sonuna kadar karşılaştırılmıştır. Kaldırma kuvvetinin etkisiyle eriyik FDM'nin özellikle bataryanın üst kısmında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Erime bölgesinin kanatçık-batarya yüzeyinin temas bölümlerinde gelişmeye devam ettiği görülmüştür. 16 W ısı üretim oranında, 1980. saniye süre sonunda sayısal çalışmada FDM'nin tamamen sıvı halde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hazne malzemesinin bataryanın termal performansına etkileri de tartışılmıştır. Bu nedenle, naylon, titanyum, alüminyum alaşımı ve bakır malzemeler de 16 W test koşullarında çalışılmıştır. Alüminyum alaşımı ve bakır kullanılan modelin sıcaklık değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ancak alüminyum alaşımının bakıra kıyasla daha hafif olması nedeniyle hazne olarak kullanılmasının uygun olabileceğine karar verilmiştir.

Doğrulama çalışması, 16 W ısı üretim oranında düz kanatçık içeren durum için analiz edildi. Ağ boyutu $\Delta x=0,8$ mm ve zaman adımı $\Delta t=0,25$ mm olarak çalışmadan alındı. Öncelikle, bataryanın ısı üretimi gerçekleşirken sıcaklık değeri 20 °C'den (başlangıç sıcaklığı), 60 °C'ye (limit sıcaklık) kadar analizi gerçekleştirildi (Şekil 3.7a). Doğrulama çalışmasında 60 °C sıcaklık değeri 838. saniyede elde edildi. Ardından, batarya yaklaşık 40 °C'ye düşene kadar dinlenme sürecine bırakıldı. Sıcaklık grafiği iki çevrimden oluşmaktayken (1. çevrim bataryanın 60 °C'ye kadar ısınması, 2. çevrim 40 °C'ye kadar soğutulması), erime oranı grafiği bu çalışmanın tek çevriminden elde edildi ve 1690. saniyede %100 erime gerçekleşti (Şekil 3.7b). Sonuçlar, sayısal çalışma ve mevcut

çalışmadaki sıcaklık ve erime oranının zamana bağlı değişiminin, oldukça tutarlı ve yakın değerler aldığını gösterdi.



(a)



(b)

Şekil 3.7. Mevcut çalışma modelinin 16W için deneysel ve sayısal sonuçlarla doğrulanması. (a) Sıcaklığın zamanla değişimi, (b) Erime oranının zamanla değişimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, batarya modelinin termal performansını incelemek için kurgulanan senaryolardan elde edilen analiz sonuçları yer almaktadır. Radyal kanatçık entegresinin (1, 3 ve 5 kanatçık) sistemin termal performansına etkisi, farklı hazne iç çapının (26, 30 ve 34 mm) termal performansa etkisi ve son olarak FDM'nin gizli ısıısının termal performansa etkisi sırasıyla tartışıldı. Ayrıca, taşınımın batarya sıcaklığı ve FDM erime oranına etkilerini incelemek amacıyla taşınımın ihmal edildiği durum (yer çekimi ivmesi kapalı, $g=0 \text{ m/s}^2$) ve dâhil olduğu durum için (yer çekimi ivmesi açık, z yönünde $g=-9,81 \text{ m/s}^2$) analiz çalışması gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçları gözlemleyebilmek amacıyla bu bölüm farklı alt bölümlere ayrıldı ve detaylıca incelendi. Batarya sıcaklığının, farklı deşarj hızlarındaki değişimini tespit etmek adına 3 farklı durum (1C, 3C ve 5C), 3 farklı FDM (RT31, RT38 ve RT42) için test edildi. Modelin çalışma süresi (deşarj süresi) sırasıyla 3600, 1200 ve 720 saniye olarak hesaplandı. Batarya modelinin maksimum sıcaklığına ek olarak, batarya yüzeyinin sıcaklık değerleri de (T_1 , T_2 ve T_3) kaydedildi. Bu noktalar konumu itibarıyla, batarya hücresinde sıcaklık homojenliğinin belirlenmesinde kritik öneme sahip olduğundan her durum için ayrı ayrı incelendi ve tartışıldı.

Bölüm 4'te kurgulanan senaryolar üzerine, gerçekleştirilen analiz çalışmaları özet şeklinde Tablo 4.1'de sunuldu. Referans durum, RT31, RT38 ve RT42 için 1C, 3C ve 5C deşarj oranında analiz edilmiş olup, 5C deşarj oranından elde edilen sıcaklık değerlerinin bataryanın termal performansı için kritik aralıkta olduğu tespit edildi. Bu nedenle, Tasarım-I (1 radyal kanatçık), Tasarım-II (3 radyal kanatçık) ve Tasarım-III (5 radyal kanatçık) 5C deşarj oranı için çalışıldı. Analiz sonucundan elde edilen bulgular, Bölüm 4.1'de detaylı olarak tartışıldı.

Tablo 4.1. Farklı senaryolar için değişken tutulan parametreler

Senaryo	FDM	Deşarj oranı	Kanatçık sayısı
Referans durum	RT31, RT38, RT42	1C, 3C, 5C	-
Tasarım-I	RT31, RT38, RT42	5C	1
Tasarım-II	RT31, RT38, RT42	5C	3
Tasarım-III	RT31, RT38, RT42	5C	5

4.1. Radyal Kanatçığın Termal Performansa Etkisi

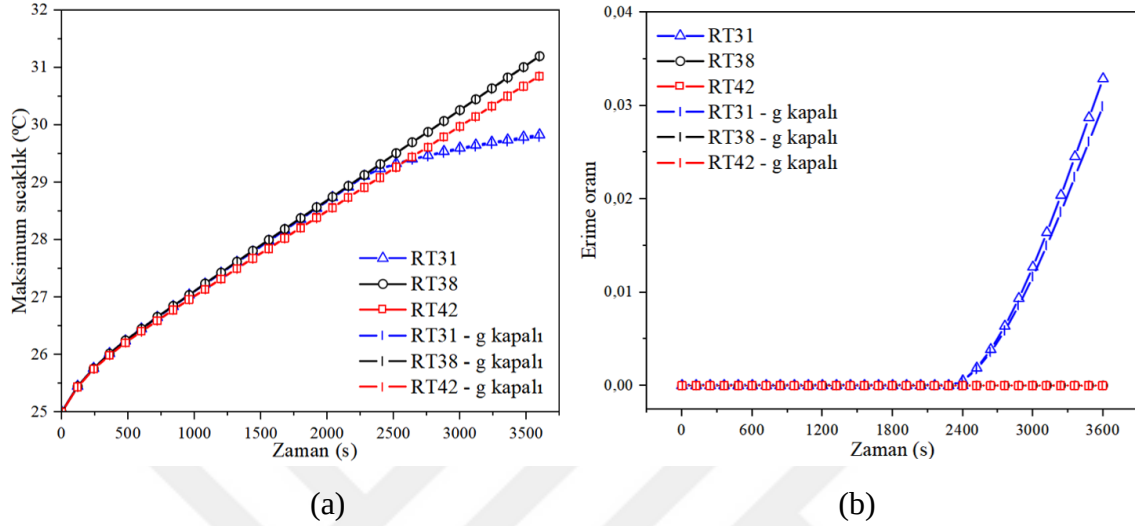
Bu bölümde kanatçık sayılarına göre referans durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III senaryoları için analiz çalışması gerçekleştirildi. Bu senaryolardan elde edilen bulgular alt bölümlerde sırasıyla tartışıldı.

4.1.1. Referans Durum

İlk olarak, tek başına FDM kullanımının optimum batarya çalışma sıcaklığı aralığını ne denli kontrol altında tutabildiğini test etmek amacıyla bir referans durum oluşturuldu ($D_b=18$ mm, $L_b=65$ mm $D_{hi}=34$ mm ve $D_{hd}=38$ mm) ve 3 farklı FDM (RT31, RT38 ve RT42) uygulanarak çalışıldı. Modellenen sistemin maksimum sıcaklığı, batarya yüzeyinden alınan 3 noktadaki sıcaklık değerleri ve erime oranları karşılaştırılmış olup detaylıca analiz edildi. Diğer durumlar için referans durum baz alınarak soğutma performansını iyileştirme çalışmaları yapıldı.

1C deşarj koşullarında, 3600 saniye süre sonunda tüm durumlar için bataryanın optimum çalışma sıcaklığı aralığında kaldığı, güvenlik problemi ve termal risk teşkil etmediği söylenebilir (Şekil 4.1). RT38 ve RT42’de bu süre içerisinde herhangi bir erime gözlenmezken, RT31’in daha düşük erime sıcaklığına sahip olmasından dolayı mevcut süre içerisinde erime sürecinin başladığı ve erime devam ederken sıcaklık grafiğinin yatay seyrettiği görüldü. Süre sonunda RT31 en düşük sıcaklığa sahip oldu (29,83 °C). Ayrıca 1C deşarj koşulları için taşınımın, batarya sıcaklığı ve FDM erime oranına etkileri de incelendi. Bu nedenle, yapılan analizlere ek olarak yer çekimi ivmesi pasif haldeyken de analiz çalışması gerçekleştirildi. Süre sonuna kadar, taşınımın dikkate alınmadığı (yer çekimi ivmesi kapalı, $g=0$ m/s²) durumda açık olduğu (yer çekimi ivmesi açık, z yönünde $g=-9,81$ m/s²) duruma kıyasla referans durum için RT38 ve RT42 maksimum sıcaklık değerlerinin aynı olduğu tespit edilirken, süre sonunda RT31’de ise 0,03 °C sıcaklık düşüşü görüldü. 1C deşarj sonunda yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla erime oranları karşılaştırıldığında RT38 ve RT42’de erime gözlenmezken, RT31’de 0,033’ten 0,029’a düşüş gözlemlendi. Sonuç olarak referans durumda 1C deşarj hızında, batarya sağlığı ve hizmet ömrünü olumsuz yönde etkileyecek bir sıcaklık artışı olmadığından bataryanın optimum çalışma sıcaklığının korunduğu, ancak bu deşarj hızında FDM’nin faz dönüşüm sıcaklığına ulaşmaması nedeniyle gizli

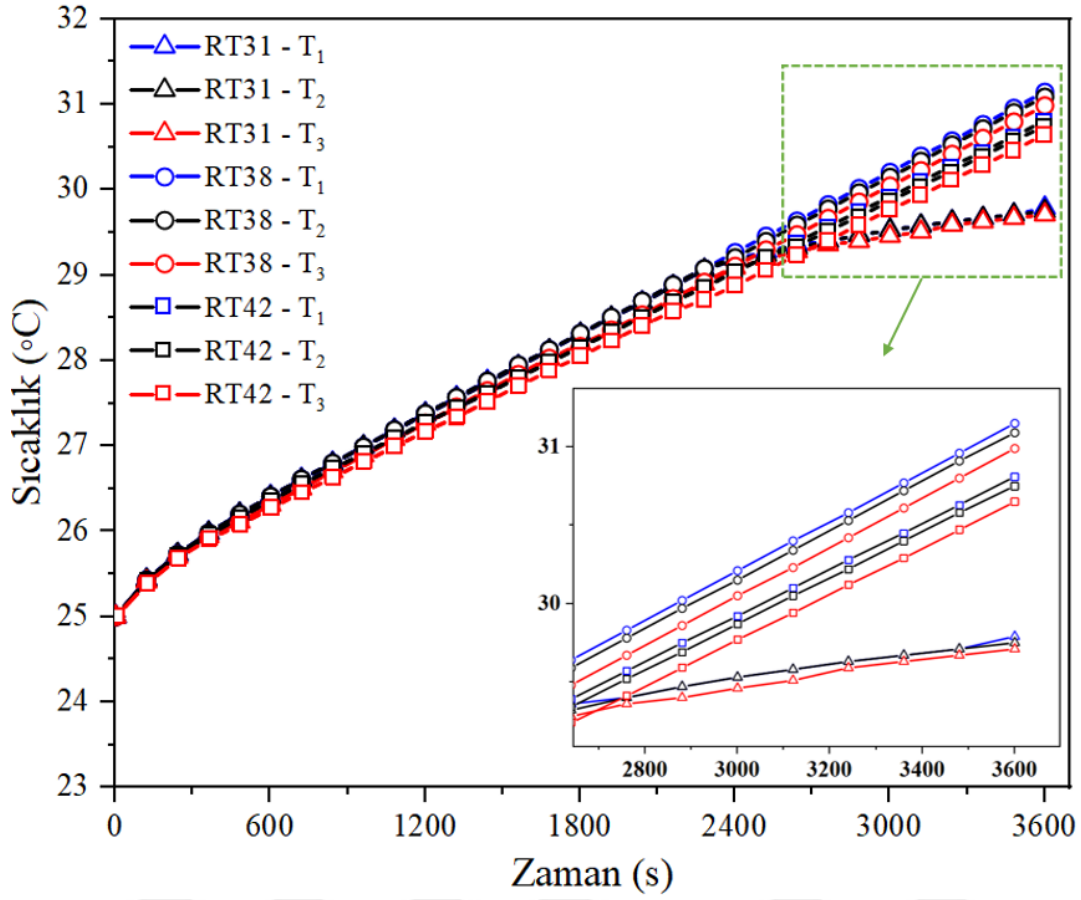
ısının tam anlamıyla kullanılmadığı ortaya çıktı. Ek olarak, 1C deşarj koşullarında referans durum için yapılan incelemeler sonucunda batarya sıcaklığı ve FDM erime oranında yer çekimi etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görüldü.



Şekil 4.1. 1C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi

Batarya modelinin maksimum sıcaklığına ek olarak batarya yüzeyinden alınan 3 spesifik noktanın da (T_1 , T_2 ve T_3) sıcaklık değerleri kaydedildi (Şekil 4.2). Bu değerlerin araştırılmasındaki amaç, batarya hücresinin sıcaklık homojenliğinin tespit edilmesidir. 1C deşarj koşullarında gerçekleştirilen analiz sonucunda, 3 farklı durum için T_1 , T_2 ve T_3 incelendiğinde sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve homojen sıcaklık dağılımının olduğu görüldü. Bu veriler, maksimum sıcaklık değerleriyle karşılaştırıldı. Maksimum sıcaklık ve T_1 , T_2 ve T_3 noktaları arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 0,21 °C olarak hesaplandı (RT38- T_3 ve RT42- T_3). En yüksek sıcaklık değerinin 3 durum için de T_1 'de (RT31-29,79 °C, RT38-31,15 °C, RT42-30,81 °C) elde edildiği görüldü.

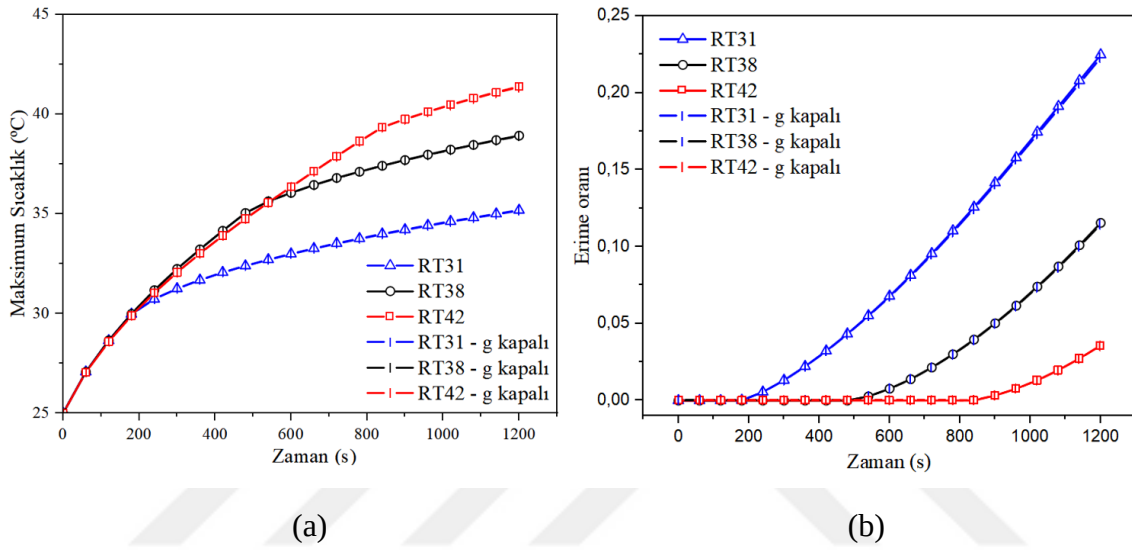
3C deşarj koşullarında, 1200 saniye süre sonunda yapılan analiz sonuçları incelendiğinde yaklaşık 200 saniyeye kadar sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın seyrettiği bu süreden sonra RT31'in erime sürecinin başlamasıyla aralarındaki sıcaklık farkının arttığı görüldü (Şekil 4.3). RT42'nin 40 °C'yi bulması yaklaşık 960 saniye sürdü ve 1200 saniye süre sonunda 41,39 °C ile en yüksek sıcaklık değerine ulaştı. RT31 ve RT38 daha düşük sıcaklık değerlerinde seyretti. RT31, süre sonunda 35,18 °C ile en düşük sıcaklığa sahip oldu.



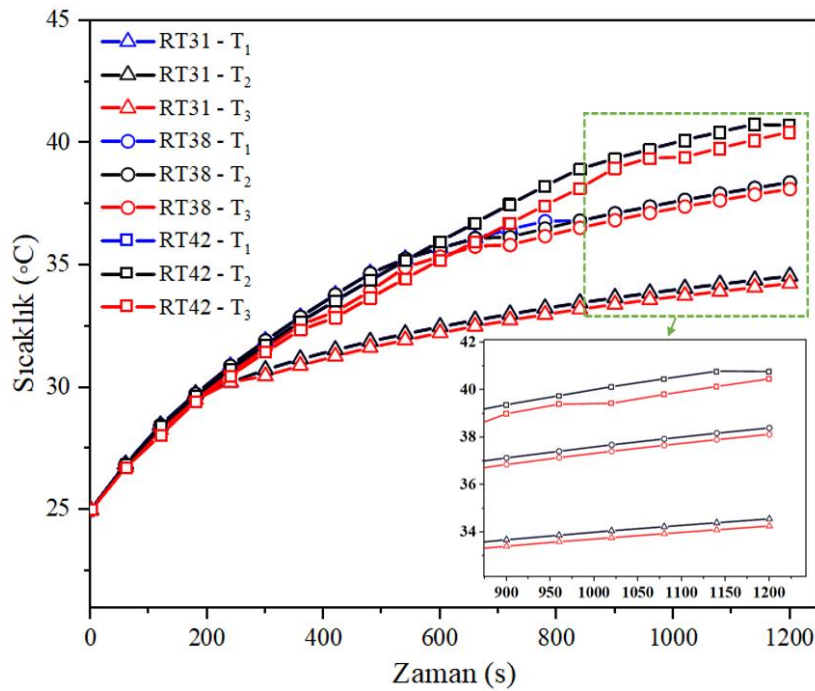
Şekil 4.2. 1C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi

RT31, diğerlerine kıyasla daha düşük erime sıcaklığına sahip olduğundan erime sürecinin erken başlamasıyla en yüksek erime oranına sahip olurken (0,22), RT42’de erime süreci (yaklaşık 840.saniyede) yeni başladı. 3C deşarj koşullarında referans durum için yer çekimi ivmesi altında yapılan analizlere ek olarak yer çekimi etkisinin ihmal edildiği durumlar için de sayısal analiz çalışması yapıldı. Süre sonunda, yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla referans durum için RT31, RT38 ve RT42 maksimum sıcaklık değerlerinde sırasıyla 0,02 °C, 0,03 °C ve 0,04 °C düşüş görüldü. 3C deşarj sonunda yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durum ve açık olduğu durumdaki erime oranları karşılaştırıldığında yer çekiminin ihmal edilmesiyle birlikte RT31’de 0,224’ten 0,222’ye, RT38’de 0,115’ten 0,114’e ve RT42’de 0,0358’den 0,0357’ye düşüş gözlemlendi. 3C deşarj oranı referans durumdan elde edilen veriler, maksimum sıcaklık ve erime oranı değerlerinin yer çekimi etkisiyle değişiminin ihmal edilebilecek düzeyde ve taşınımın zayıf olduğunu gösterdi.

Aynı deşarj koşullarında batarya yüzeyindeki T_1 , T_2 ve T_3 noktasının sıcaklık değerleri de alındı (Şekil 4.4). 3 durum için T_1 ve T_2 değerleri hemen hemen aynı olup T_3 noktasından daha yüksek sıcaklık değerine sahip olduğu görüldü. Süre sonuna kadar noktalar arasındaki maksimum sıcaklık farkı RT42’de elde edilmiş olup 0,79 °C olarak hesaplandı. Elde edilen bulgular, 3C deşarj oranı için batarya yüzeyinde sıcaklığın dengeli dağıldığını göstermektedir.



Şekil 4.3. 3C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



Şekil 4.4. 3C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi

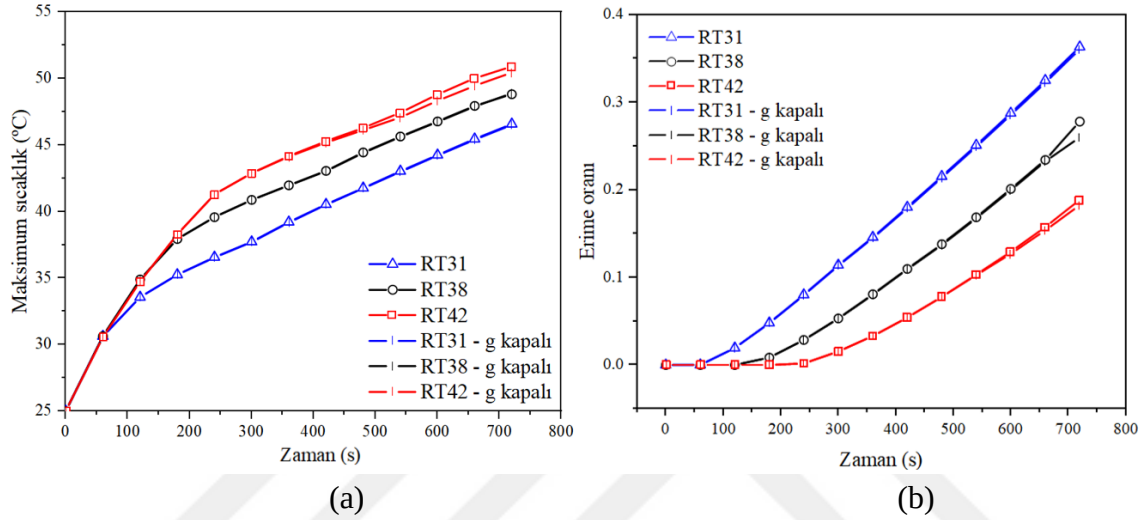
Son olarak referans durum, 5C deşarj oranı için çalışıldı ve bulgular Şekil 4.5'te sunuldu. 5C deşarj oranında ısı üretimi diğer iki duruma (1C ve 3C) kıyasla daha yüksek olduğundan maksimum sıcaklık değerlerinin 720 saniye süre sonuna kadar hızla arttığı gözlemlendi. Ancak sonuçlar incelendiğinde yaklaşık 60 saniye süreye kadar sıcaklık değerlerinin tüm durumlar için hemen hemen aynı olduğu bu süreden sonra RT31'in erime sürecinin başlamasıyla eğim açısının azaldığı görülmektedir. Aynı durum RT38 ve RT42 için de geçerlidir. FDM, gizli ısı gibi mükemmel bir özelliğe sahip olmasaydı 720 saniye süre sonunda maksimum sıcaklığın daha yüksek olacağı çıkarılmaktadır. Gizli ısı değerlerinin birbirine çok yakın (RT31 - 165000 J/kg, RT38 - 170000 J/kg, RT42 - 165000 J/kg) olmasına rağmen süre sonunda maksimum sıcaklık değerleri (RT31 - 46,56 °C , RT38 - 48,8 °C , RT42 - 50,88 °C) arasında belirgin fark görüldü. Bu farkın belirleyici unsuru FDM'nin erime sıcaklığıdır.

1C ve 3C deşarj koşulları altında yapılan analizlere ek olarak 5C deşarj koşulları için de taşınımın batarya sıcaklığı ve FDM erime oranına etkileri tartışıldı. 720 saniye süre sonunda, taşınımın ihmal edildiği (yer çekimi ivmesi kapalı, $g=0 \text{ m/s}^2$) durumda, açık olduğu (yer çekimi ivmesi açık, z yönünde $g=-9,81 \text{ m/s}^2$) duruma kıyasla referans durum için RT31 ve RT42 maksimum sıcaklık değerlerinde sırasıyla 0,06 °C ve 0,45 °C düşüş, RT38'de ise 0,07 °C artış görüldü. Yer çekimi etkisinin ihmal edildiği durumda yer çekimi etkisinin dikkate alındığı duruma kıyasla erime oranları karşılaştırıldığında süre sonunda RT31 0,363'ten 0,360'a, RT38 0,278'den 0,249'a ve RT42 0,188'den 0,182'ye düşüş görüldü. Bu durum, taşınımın referans durum 5C deşarj oranı için 1C ve 3C deşarj oranına kıyasla daha etkili olduğunu gösterdi.

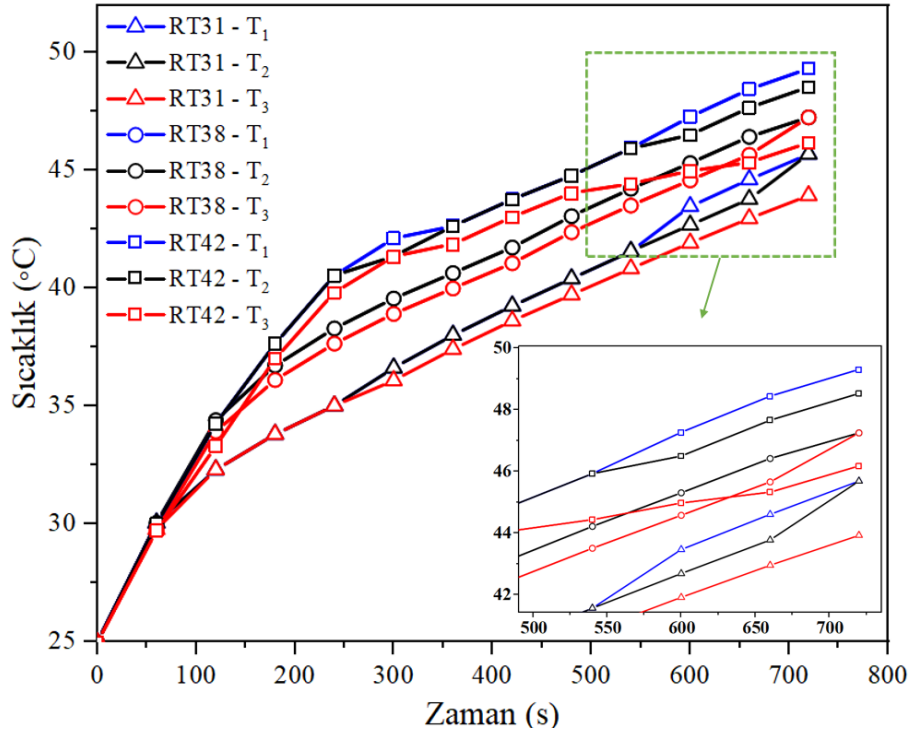
5C deşarj koşullarında, 720 saniye süre boyunca batarya yüzeyinden alınan noktaların sıcaklık değerleri takip edildi ve Şekil 4.6'da verildi. Bulgular, noktalar arası maksimum sıcaklık farkının 3,13 °C (RT42) olduğunu göstermektedir. Deşarj oranı 1C'den 5C'ye çıkıldıkça T_1 , T_2 ve T_3 noktaları arasındaki sıcaklık farkının arttığı Şekil 4.2, Şekil 4.4 ve Şekil 4.6'da açıkça görülmektedir.

Elde edilen bulgular neticesinde 5C deşarj oranının batarya için kritik olduğu ve iyileştirme çalışması gerektirdiği sonucuna varıldı. Bundan sonraki bölümlerde 5C deşarj oranı için yapılan analizlerin termal performans ve geliştirme çalışmaları üzerine

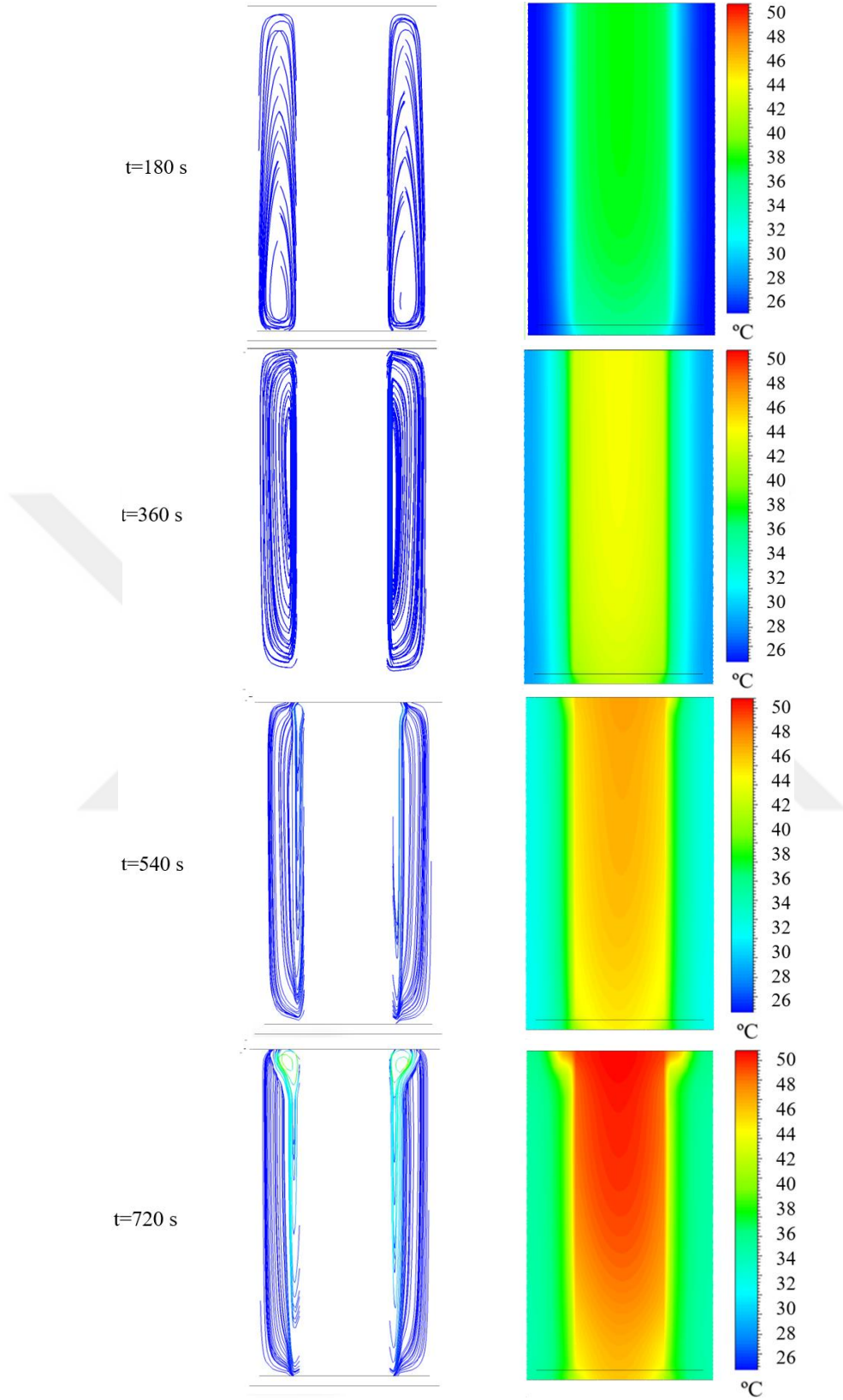
yoğunlaştırıldı. Referans durumdaki bileşenlerin bütün özellikleri sabit tutularak içte bataryayla, dışta FDM ile temas halinde olan radyal kanatçık tasarımı geliştirildi. 1 radyal kanatçık kullanıldığı durum Tasarım-I, 3 radyal kanatçık kullanıldığı durum Tasarım-II ve 5 radyal kanatçık kullanıldığı durum Tasarım-III olarak isimlendirildi. Alüminyum alaşımlı kanatçığın üç tasarım durumu için de kalınlığı ($W_k=0,5$ mm) ve uzunluğu ($L_k=4$ mm) aynı alındı.



Şekil 4.5. 5C deşarj koşullarında farklı FDM kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



Şekil 4.6. 5C deşarj koşullarında T₁, T₂ ve T₃ noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi



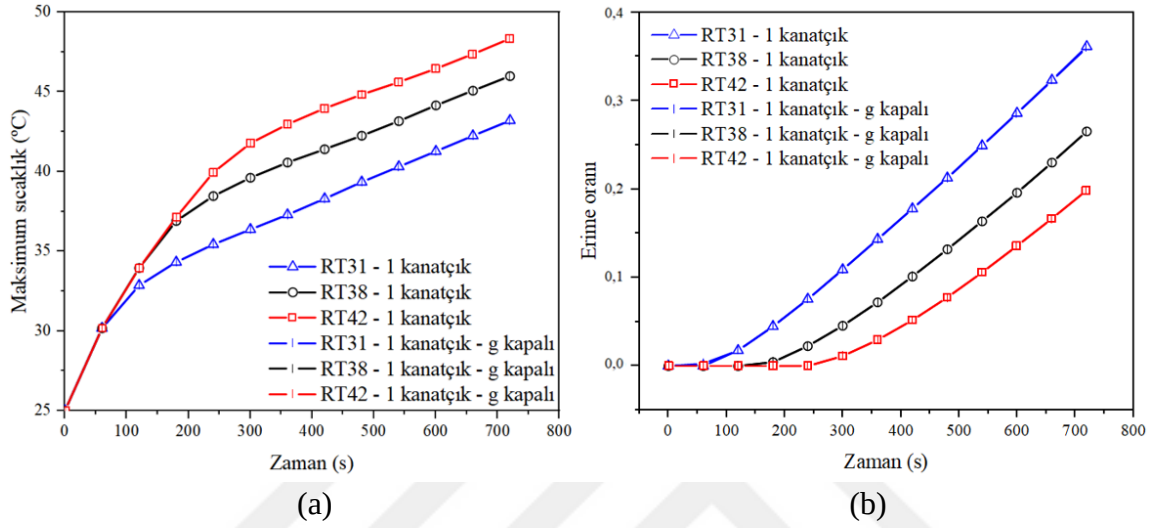
Şekil 4.7. 5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca referans durumdan (RT42) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

Referans durum, 5C deşarj koşulları altında 720 saniye süre boyunca sayısal olarak analiz edildi ve farklı süreler için (180 s, 360 s, 540 s ve 720 s) batarya modelindeki akım çizgileri (solda) ve modelin sıcaklık konturları (sağda) Şekil 4.7’de verildi. 180. saniyede batarya sıcaklığının 38,27 °C olduğu belirlendi. t=360. saniyede modelin maksimum sıcaklığının 44,16 °C olduğu ve RT42’nin faz dönüşüm sürecinin başladığı görüldü. FDM’nin erime sürecinin, direkt olarak bataryayla temas ettiği en yüksek sıcaklık değerine sahip sıcak bölgeden başlayarak akışın sıvı-katı arayüzler arasında geliştiği belirlendi. Bu süreden sonra eriyik RT42’nin, kaldırma kuvvetinin etkisiyle batarya yüzeyi boyunca modelin üst yüzeyine doğru genişlediği görüldü. Deşarj sonuna doğru erimenin artmasıyla birlikte taşınım hareketlerinin etkisi baskın gelmiş ve eriyik RT42’nin modelin alt temas noktalarına doğru genişlediği belirlendi. Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III’e kıyasla referans durumda eriyik RT42’nin ilerlemesinin önünde bir engel bulunmadığından erime bölgesinin daha doğrusal genişlediği görüldü. t=720. saniye süre sonunda bataryanın maksimum sıcaklığı 50,88 °C olup bu süre sonuna kadar hızla arttığı gözlemlendi.

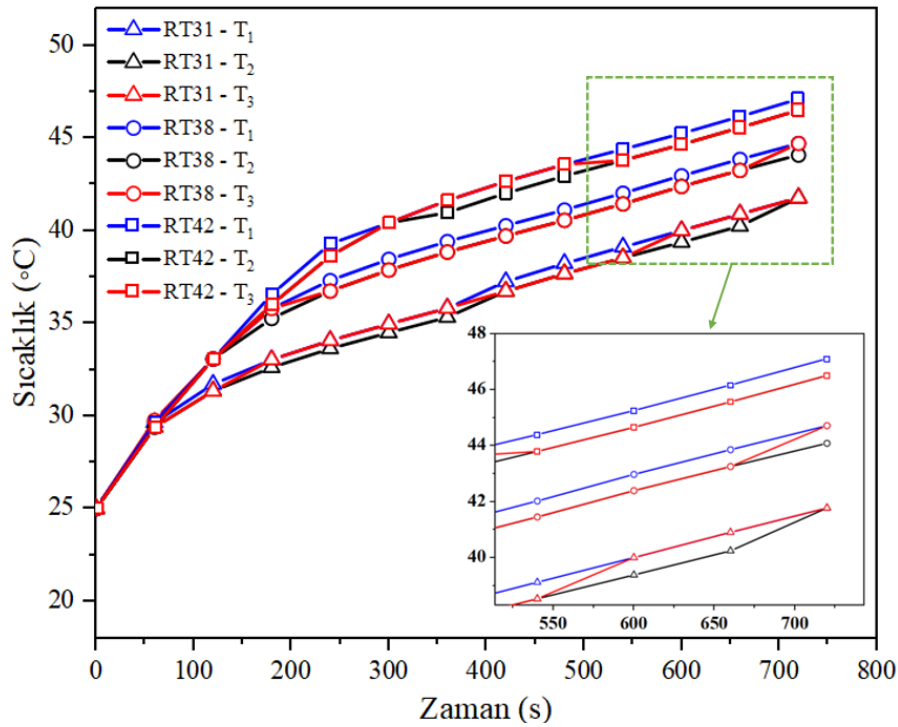
4.1.2. Tasarım-I

Kanatçığın, batarya sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemek için 5C deşarj oranında farklı sayıda kanatçık analizi gerçekleştirildi. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere 3 farklı FDM için öncelikle tek kanatçığın incelemesi yapıldı ve sonuçlar tartışıldı. RT31, RT38 ve RT42’nin 5C deşarj süreci sonunda, referans durumda 45 °C maksimum sıcaklığın üzerinde olduğu gözlemlendi. Referans duruma kıyasla Tasarım-I’de sırasıyla 3,36 °C, 2,82 °C ve 2,55 °C sıcaklık düşüşü meydana geldi. Ancak iki durumun erime oranlarının çok yakın sonuçlandığı tek bir kanatçığın, erime oranını iyileştirmeye yeterli gelmediği görüldü. Ayrıca yer çekimi ivmesinin bataryanın termal performansına etkisi incelendi. Tasarım-I, yer çekimi etkisi altında yapılan sayısal analizlere ek olarak yer çekimi etkisi ihmal edilerek de çalışıldı ve sonuçlar tartışıldı. 5C deşarj sonunda yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla Tasarım-I için RT31 maksimum sıcaklık değerinde 0,01 °C düşüş gözlenirken, RT38 ve RT42’nin sıcaklık değerlerinin aynı seyrettiği görüldü (RT38 - 45,98 °C ve RT42 - 48,33 °C). Aynı durum için 720 saniye süre sonunda erime oranları incelendiğinde RT31 erime oranının 0,361’den 0,360’e düştüğü RT38 ve RT42’nin aynı kaldığı sonucuna varıldı.

Maksimum sıcaklığa ek olarak, T_1 , T_2 ve T_3 noktalarının sıcaklık değerleri de araştırıldı ve Şekil 4.9'da sunuldu. Dikkat çeken bir diğer husus, aynı koşullar altında analizi gerçekleştirilen referans durum ve Tasarım-I karşılaştırıldığında, Tasarım-I'de noktalar arası sıcaklık dağılımının daha dengeli olduğu gözlemlendi. Referans durumda noktalar arası sıcaklık farkı 3,13 °C iken, Tasarım-I'de bu değer 0,65 °C'ye düştüğü görüldü.



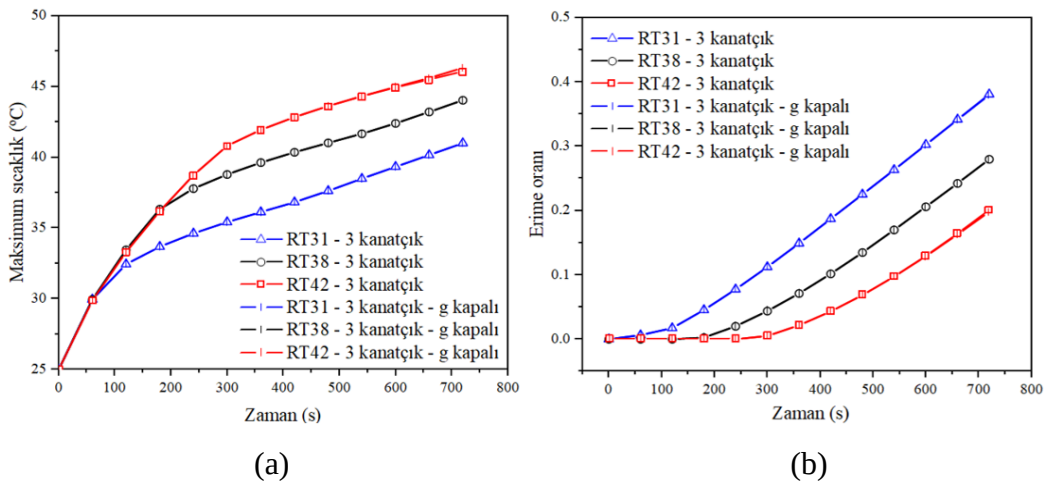
Şekil 4.8. 5C deşarj koşullarında 1 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



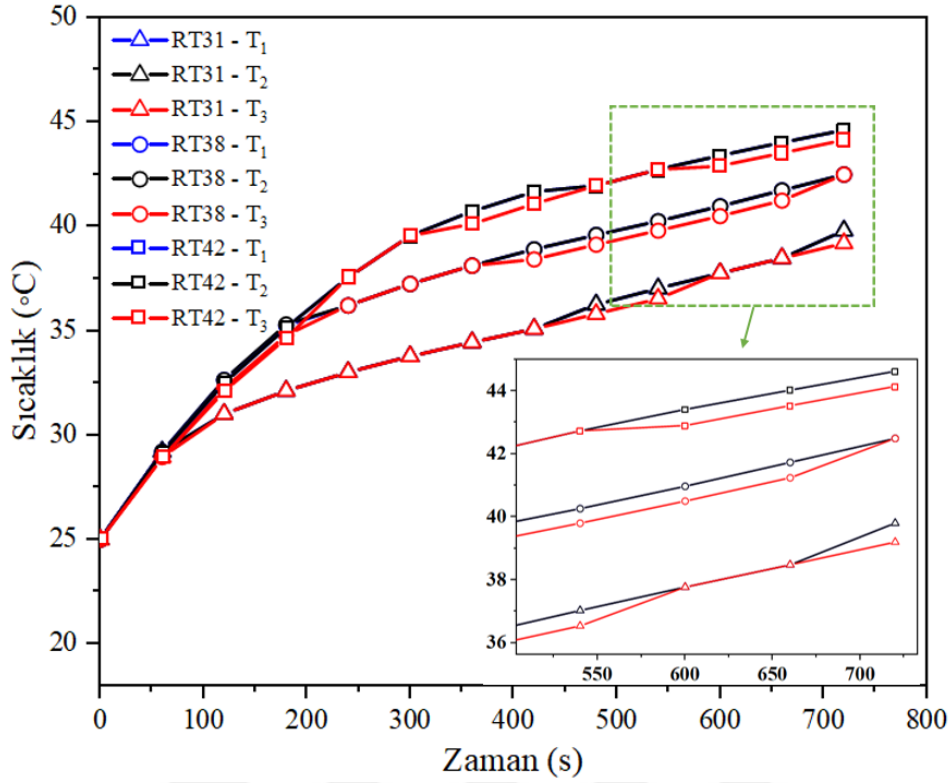
Şekil 4.9. 5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-I)

4.1.3. Tasarım-II

Şekil 4.10'da, kanatçık sayısı 1'den 3'e çıkarıldığında maksimum sıcaklıkta ve erime oranında meydana gelen değişimlerin grafiği verildi. Tasarım-II'de, Tasarım-I'e kıyasla RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla 2,2 °C, 1,94 °C ve 2,25 °C sıcaklık düşüşü meydana geldi. Kanatçık dağılımının geliştirilmesiyle FDM'nin erime oranı artırılmış olup termal yönetim performansı iyileştirildi. Sonuçlar da bu durumu doğrular niteliktedir. RT31, RT38 ve RT42 erime oranlarında Tasarım-I'e kıyasla sırasıyla %5,5, %5 ve %2 oranında artış görüldü. Bu da FDM'den yararlanma oranının iyileştirildiğini göstermektedir. Tasarım-II, 5C deşarj koşullarında yer çekimi ivmesinin olduğu durum ve göz ardı edildiği durum için RT31, RT38 ve RT42 için ayrı ayrı incelendi ve bulgular tartışıldı. 5C deşarj sonunda, yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla RT42'de 0,25 °C artış gözlenirken, RT31 ve RT38'in maksimum sıcaklık değerlerinin süre sonuna kadar aynı olduğu görüldü (RT31 - 41 °C ve RT38 - 44,04 °C). Aynı durum için 720 saniye süre sonunda erime oranları incelendiğinde RT31, RT38 ve RT42'nin erime oranlarının hemen hemen aynı kaldığı görüldü. Ayrıca, sürekli kanatçık optimizasyonu sayesinde T_1 , T_2 ve T_3 noktalarındaki sıcaklık değerleri incelendiğinde sıcaklık farkında düzelme meydana gelmiştir geldi (Şekil 4.11). Ayrı ayrı incelendiğinde, RT31, RT38 ve RT42'de deşarj süreci sonuna kadar T_1 ve T_2 sıcaklığının sıcaklıklarının hemen hemen aynı olduğu ve T_3 ile maksimum 0,61 °C sıcaklık farkı gösterdiği görüldümüştür. Bu durum, kanatçık sayısı arttıkça ısı transfer yüzey alanının artması ve yeni ısı transfer ağlarının sağlanmasıyla yakından ilişkilidir.

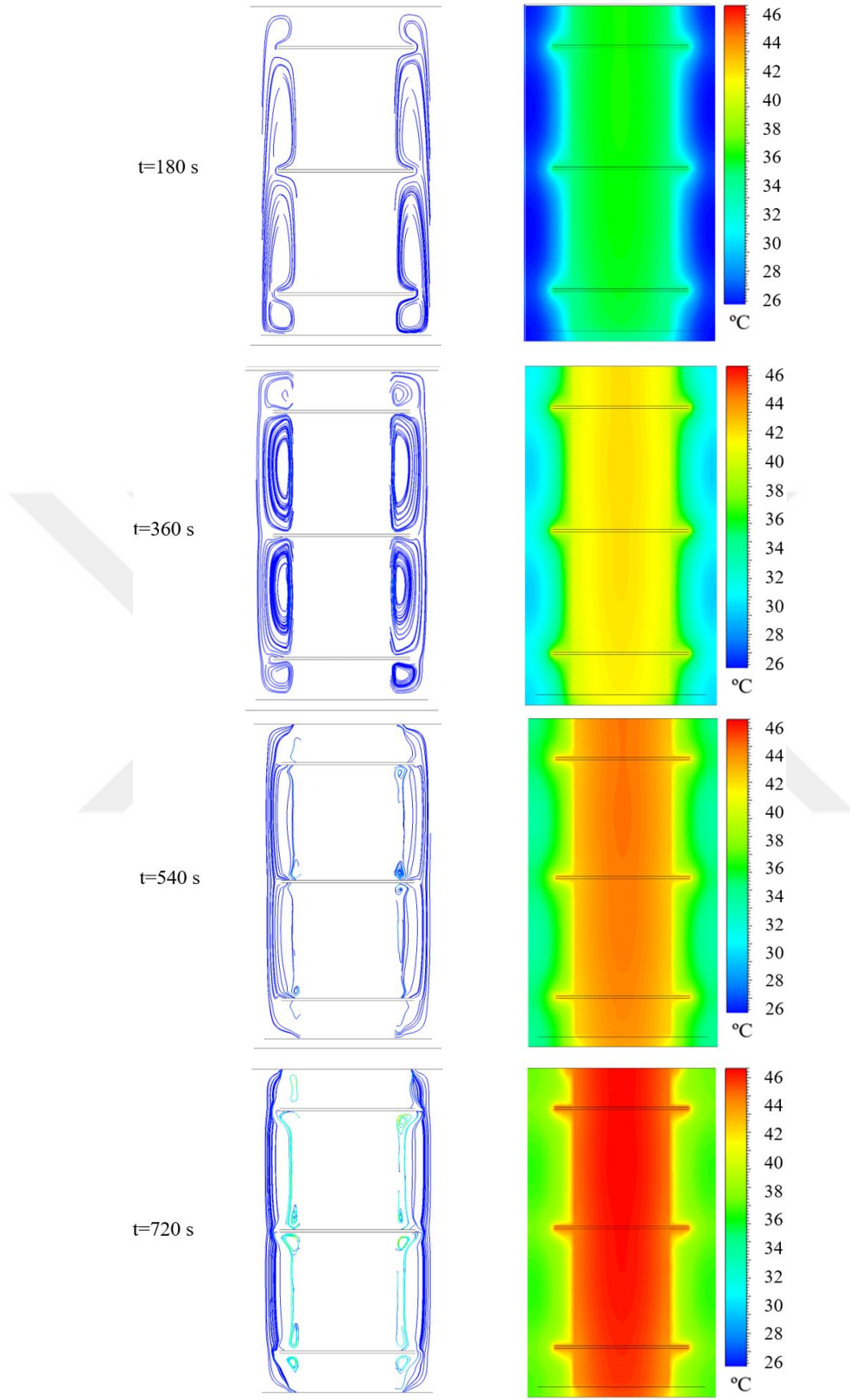


Şekil 4.10. 5C deşarj koşullarında 3 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



Şekil 4.11. 5C deşarj koşullarında T₁, T₂ ve T₃ noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-II)

3 kanatçık entegre edilen Tasarım-II, 5C deşarj koşulları altında 720 saniye süre boyunca sayısal olarak analiz edildi ve farklı süreler için (180 s, 360 s, 540 s ve 720 s) batarya modelindeki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda) ayrı ayrı Şekil 4.12’de sunuldu. t=180. saniyede batarya sıcaklığının 36,19 °C olduğu ve FDM’nin erime sürecinin henüz başlamadığı tespit edildi. t=360. saniyede maksimum sıcaklık 41,94 °C’dir ve RT42’nin faz dönüşüm sıcaklığına (38-43 °C) ulaşmasıyla birlikte erime sürecinin başladığı görüldü. Erimenin maksimum sıcaklığın olduğu temas yüzeyinden başlayarak sıvı-katı arayüzler arasında ilerlediği ve hazne ve kanatçık arasında bulunan hacim boyunca geliştiği görüldü. Bu süreden sonra erimiş RT42, bataryayla temas halinde olan kanatçık yüzeyi boyunca kaldırma kuvveti sayesinde üst yüzeye doğru çıkma eğilimi göstermektedir. Deşarj sonuna doğru erimenin gelişmesiyle birlikte taşınımın etkisi artmakta ve eriyik RT42 kanatçık uçlarından alt temas noktalarına doğru hücreler oluşturarak genişlemektedir. 3 kanatçıklı durumla karşılaştırıldığında 5 kanatçıklı durumda, eriyik RT42’deki hücrelerin daha belirgin görüldüğü tespit edildi. t=720. saniyede bataryanın maksimum sıcaklığı 46,08 °C olup ısı transferi, bataryaya temas eden kanatçıklardan kanatçık uçlarına ve buradan da FDM’ye iletilmektedir.



Şekil 4.12. 5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca Tasarım-II'den (RT42) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

4.1.4. Tasarım-III

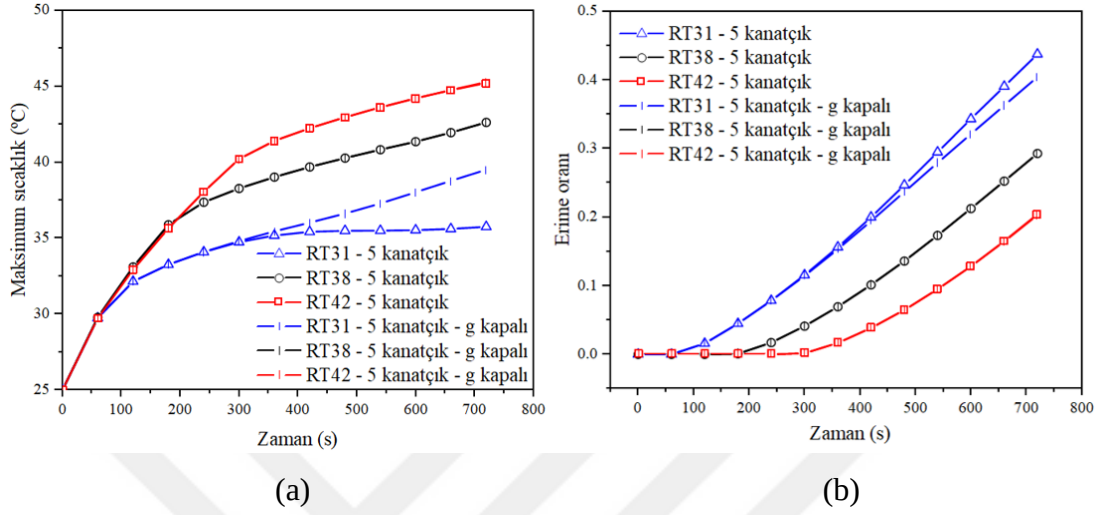
Son olarak 5 radyal kanatçıının sisteme entegre edilmesiyle oluşturulan Tasarım-III ele alındı. Şekil 4.13'te ilk dikkat çeken husus, deşarj sonunda RT31'in maksimum sıcaklık değişimidir. RT38 ve RT42, süre sonunda 42,63 °C ve 45,22 °C sıcaklık değerlerine ulaştı ve referans duruma kıyasla sıcaklık değerlerinde %12,64 ve %11,12 oranında azalma görüldü. Bir diğer kritik nokta, Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III incelendiğinde kanatçık sayısı arttıkça erime oranının da buna bağlı olarak arttığıdır. Bunun nedeni kanatçık ve FDM ısı transfer yüzey alanının artmasıyla erimenin hızlanmasıdır. RT31 Tasarım-I için erime oranı 0,36 iken RT31 Tasarım-III için yaklaşık %22 artış göstererek 0,44'e ulaştı. Aynı şekilde RT38 için bu değer %11,5 ve RT42 için %3 olarak hesaplandı.

Yer çekiminin, maksimum batarya sıcaklığı ve FDM erime oranındaki etkilerini değerlendirmek amacıyla, son olarak Tasarım-III, 5C deşarj koşullarında yer çekimi ivmesinin olduğu ve olmadığı durum için RT31, RT38 ve RT42 için sayısal olarak çalışıldı. 720 saniye deşarj sonunda, yer çekimi ivmesinin kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla RT31 ve RT42'de sırasıyla 3,76 °C ve 0,07 °C artış gözlenirken, RT38'in maksimum sıcaklık değerlerinin her iki durum için de aynı olduğu görüldü (RT38 - 42,63 °C). Her iki durum için erime oranları incelendiğinde süre sonunda RT31'in 0,44'ten 0,40'a düştüğü, RT38 ve RT42'de kritik bir fark olmadığı sonucuna varıldı.

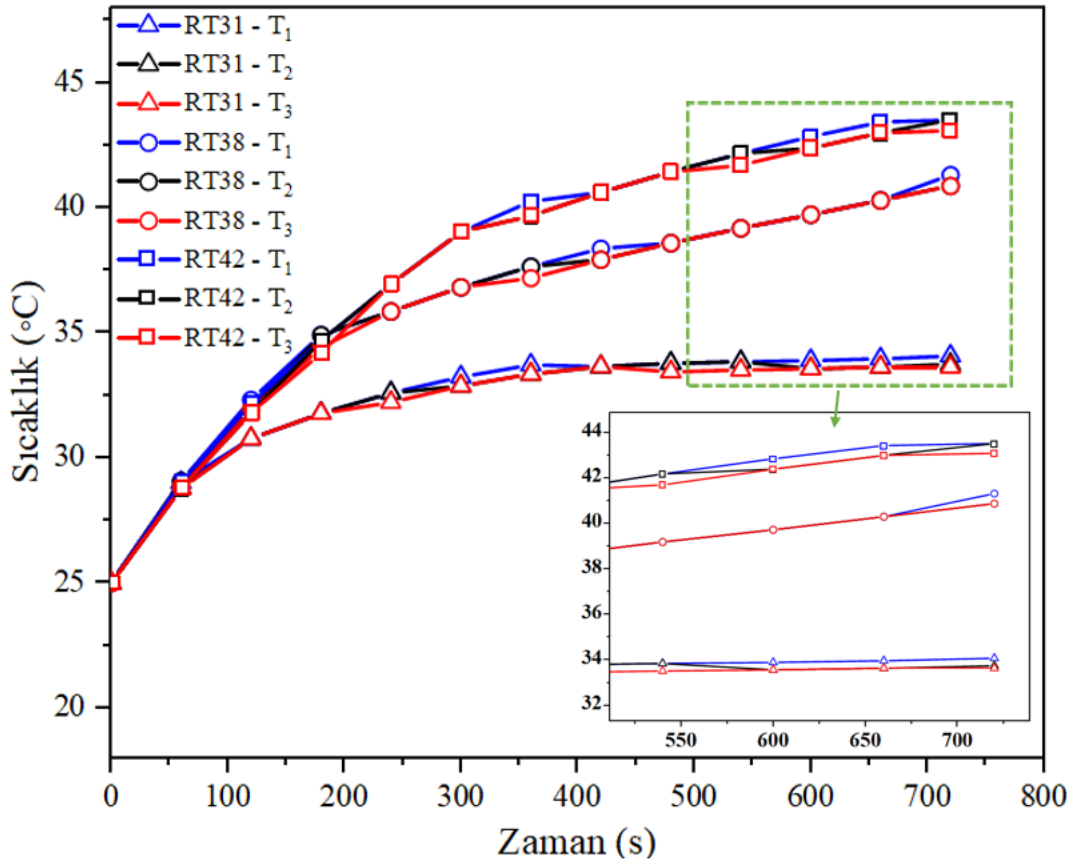
Şekil 4.14, batarya sıcaklığının dağılımı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Batarya yüzeyinden alınan T_1 , T_2 ve T_3 noktalarının her 3 durum için de deşarj sonuna kadar birbiriyle oldukça yakın değerler aldığı ve maksimum sıcaklık farkının 0,67 °C olduğu hesaplandı.

Referans durumla karşılaştırıldığında kanatçık ilavesinin sıvı FDM hareketine etkisini araştırmak amacıyla FDM'ye kesit düzlemi atandı (Şekil 4.15). Tasarım-I, incelendiğinde erimenin batarya yüzeyinde başladığı ve merkeze konumlandırılmış tek kanatçıının etrafında yoğunlaştığı görüldü. Tasarım-II'de bataryanın üst ve altına birer kanatçıının daha eklenmesiyle birlikte erime bölgesindeki değişim dikkat çekmektedir. Entegre edilen kanatçıının ısı iletim katsayısının yüksek olması FDM'nin aktivasyonunun gelişmesine katkı sağladığı sonucu ortaya çıktı. Aynı şekilde Tasarım-III için sıvı

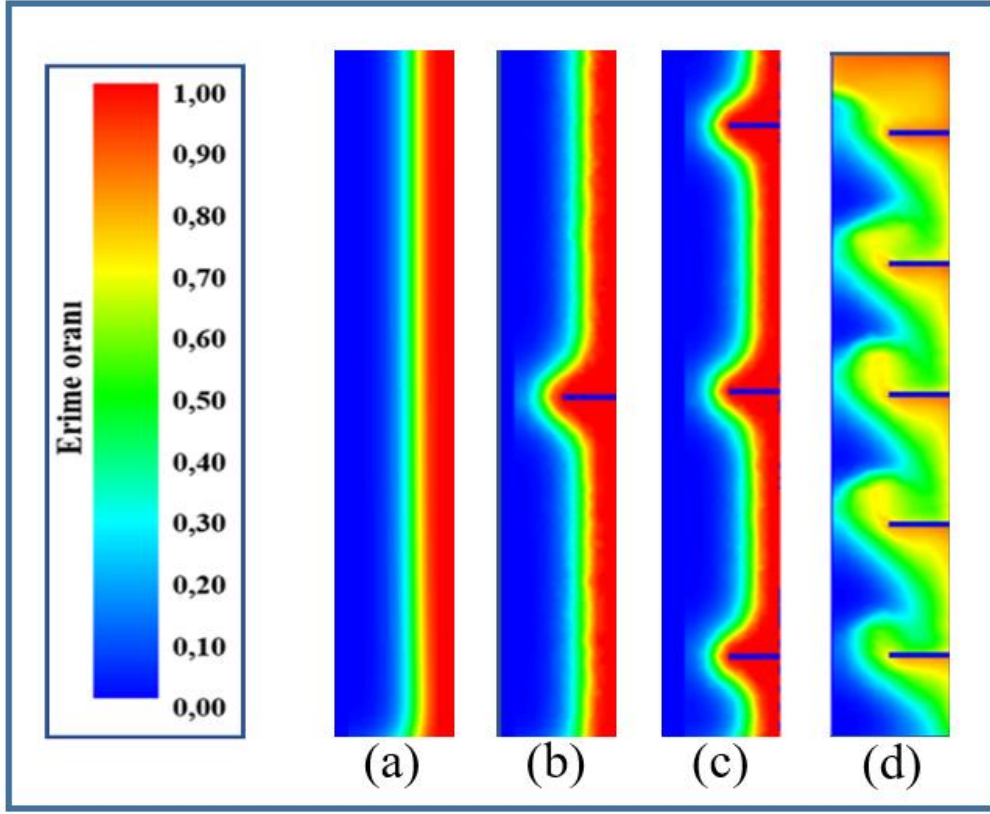
hareketlerindeki hücreler kanatçık etkisini daha net gözler önüne sermektedir. Doğal taşınım nedeniyle erime, modelin üst bölümünden başlayıp alt kısma doğru ilerlemektedir.



Şekil 4.13. 5C deşarj koşullarında 5 kanatçık kullanıldığı durumda a) Maksimum sıcaklığın zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi

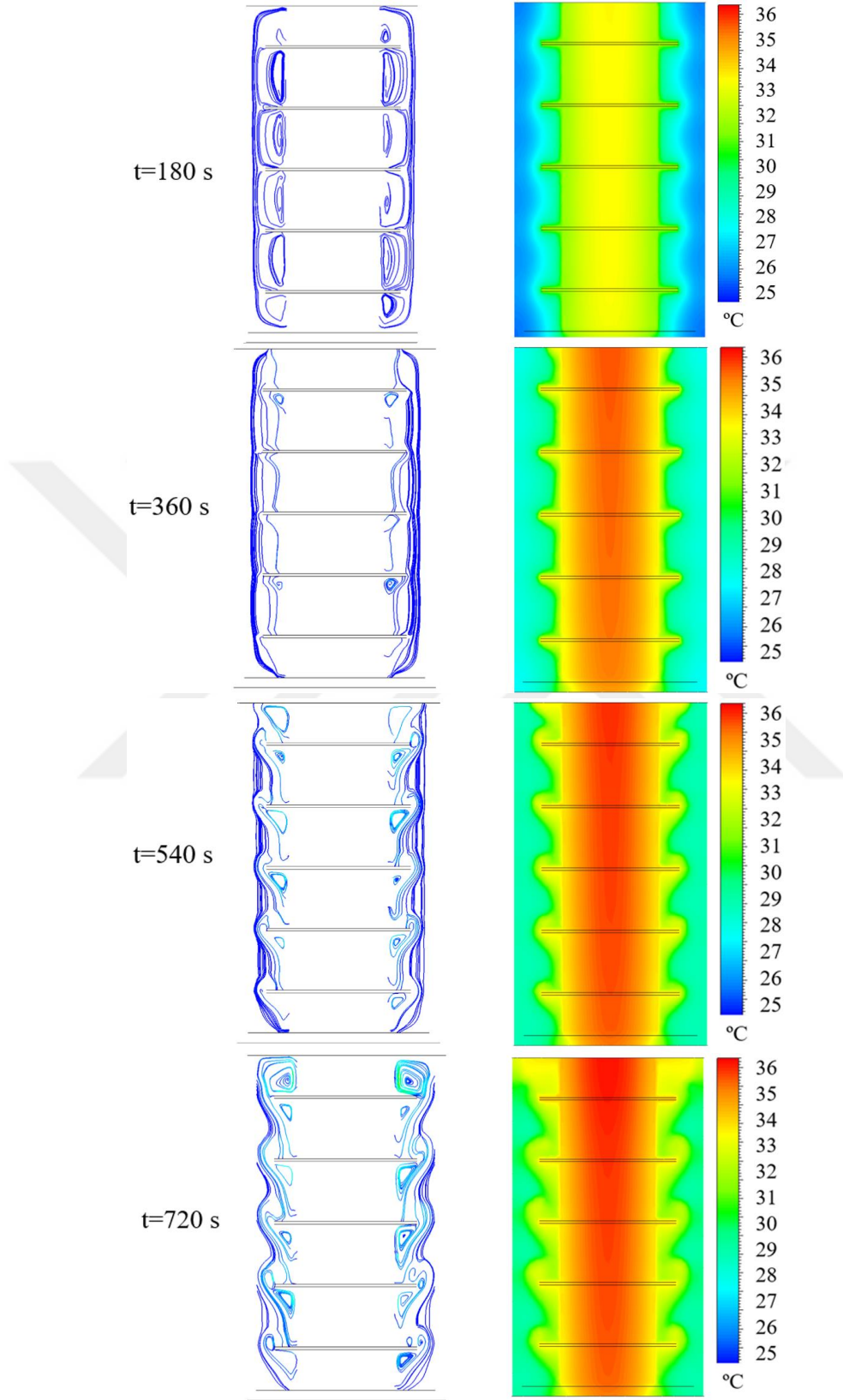


Şekil 4.14. 5C deşarj koşullarında T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi (Tasarım-III)



Şekil 4.15. 5C deşarj koşulları ve 720 saniye sonunda RT31'in erime grafiği. a) Referans durum, b) Tasarım-I, c) Tasarım-II, d) Tasarım-III

Tasarım-III, 5C deşarj koşulları altında 720 saniye süre boyunca sayısal olarak analiz edildi ve farklı sürelerdeki (180 s, 360 s, 540 s ve 720 s) akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda) Şekil 4.16'da verildi ve sonuçlar tartışıldı. $t=180$. saniyede bataryanın maksimum sıcaklığı $33,26^{\circ}\text{C}$ olup bu sıcaklık değerinin FDM'nin faz dönüşüm sıcaklığı aralığında olduğu (RT31 faz dönüşüm sıcaklığı $29-34^{\circ}\text{C}$ arasında) ve ısı üretimi gerçekleşen bataryanın etrafında FDM'nin erime sürecinin başladığı görülmektedir. $t=360$. saniyede, kaldırma kuvveti etkisiyle üst kısımda yoğunlaşan eriyik FDM'nin, taşınımın etkisiyle kanatçıklar arasından hücreler oluşturarak 720. saniye sonuna kadar genişlediği tespit edildi. Süre sonuna kadar bataryada sürekli ısı üretimi olmasından dolayı, batarya sıcaklığının arttığı ve temas halindeki kanatçıkların ve FDM'nin de sıcaklığının buna bağlı arttığı görüldü. Ancak erimiş halde ve daha yüksek sıcaklıktaki FDM'nin, hazneye yakın ve henüz erimeye başlamamış FDM'yle sıvı-katı temas yüzeyinde sıcaklığının düştüğü belirlendi.

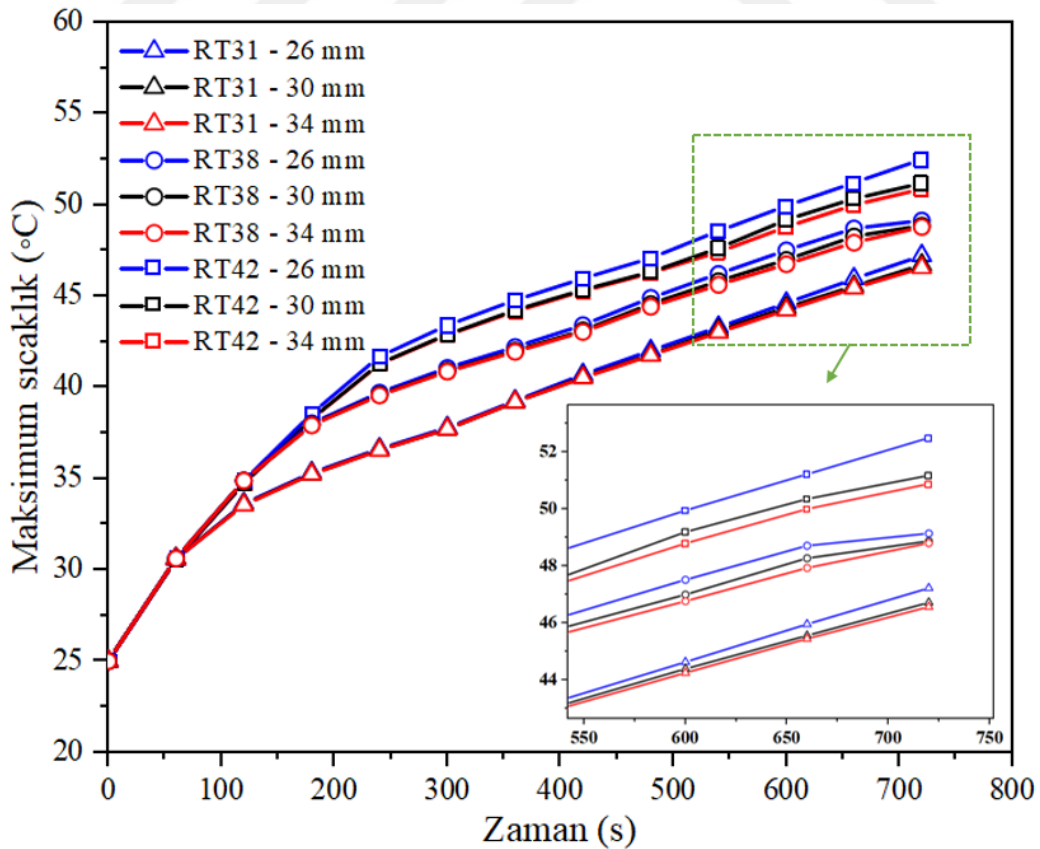


Şekil 4.16. 5C deşarj koşullarında ve 720 saniye süre boyunca Tasarım-III'ten (RT31) elde edilen akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

4.2. Farklı Hazne Çapının Termal Performansa Etkisi

Batarya sıcaklığını optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutmak ilgilenilen odak noktadır ancak pratikteki uygulama sahası, minimum hacimde FDM'den maksimum fayda almayı gerektirmektedir. Bu nedende hazne çapının, batarya üzerindeki termal performans etkilerini araştırmak amacıyla farklı hazne iç çapları için (26, 30 ve 34 mm) analiz çalışması yapıldı.

Şekil 4.17'deki sonuçlar incelendiğinde FDM hacminin artmasının, gizli ısı kapasitesini artırmasına rağmen ısı transferi üzerinde çok kritik bir etkisi olmadığı görüldü (özellikle RT31 ve RT38 için). Ancak hazne iç çapının erime oranında ciddi değişimlere sebep olduğu açıktır. 5C deşarj oranında ve RT31 kullanılarak yapılan analiz sonucunda, FDM çapı 34 mm'den 26 mm'ye düşürüldüğünde erime oranı 0,36'dan 0,89'a çıktı. Bununla birlikte, deşarj işlemi sonunda maksimum sıcaklık değerinde 46,56 °C'dan 47,22 °C'ye 0,55 °C'lık bir artış görüldü. Aynı işlem RT38 ve RT42 için gerçekleştirildiğinde, erime oranları sırasıyla 0,28'den 0,76'ya ve 0,19'dan 0,65'e yükseldi. Süre sonunda maksimum sıcaklık değerlerinin 0,34 °C ve 1,62 °C arttığı gözlemlendi.

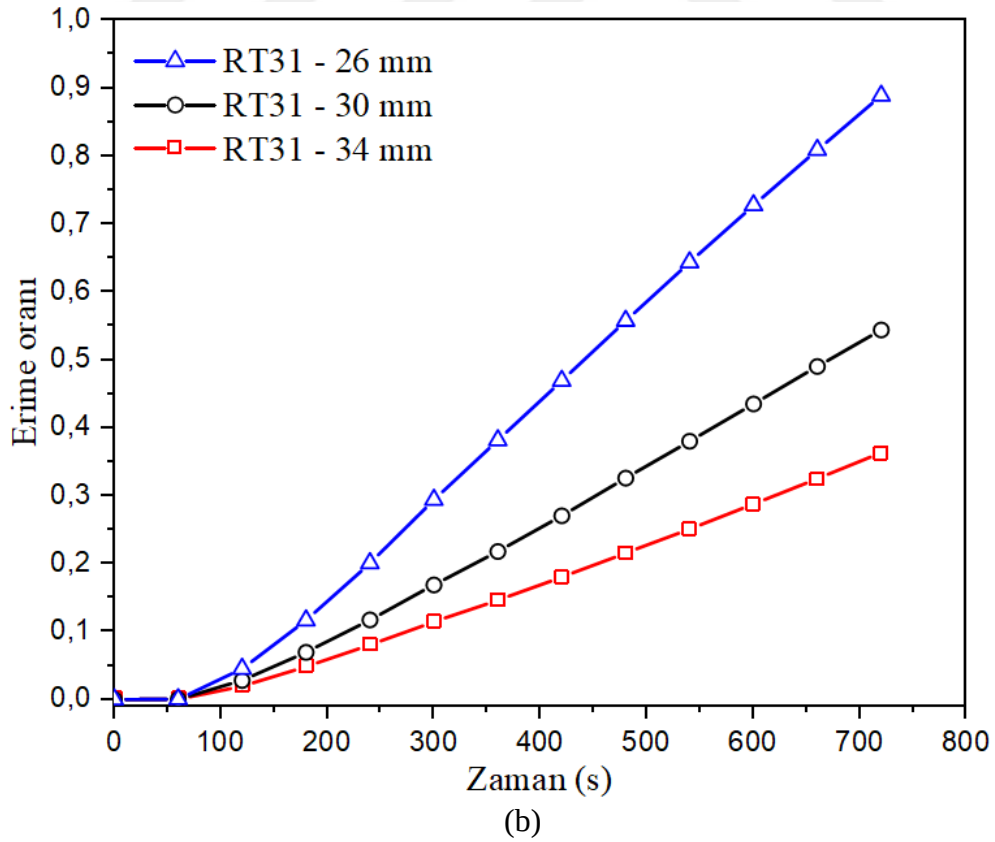
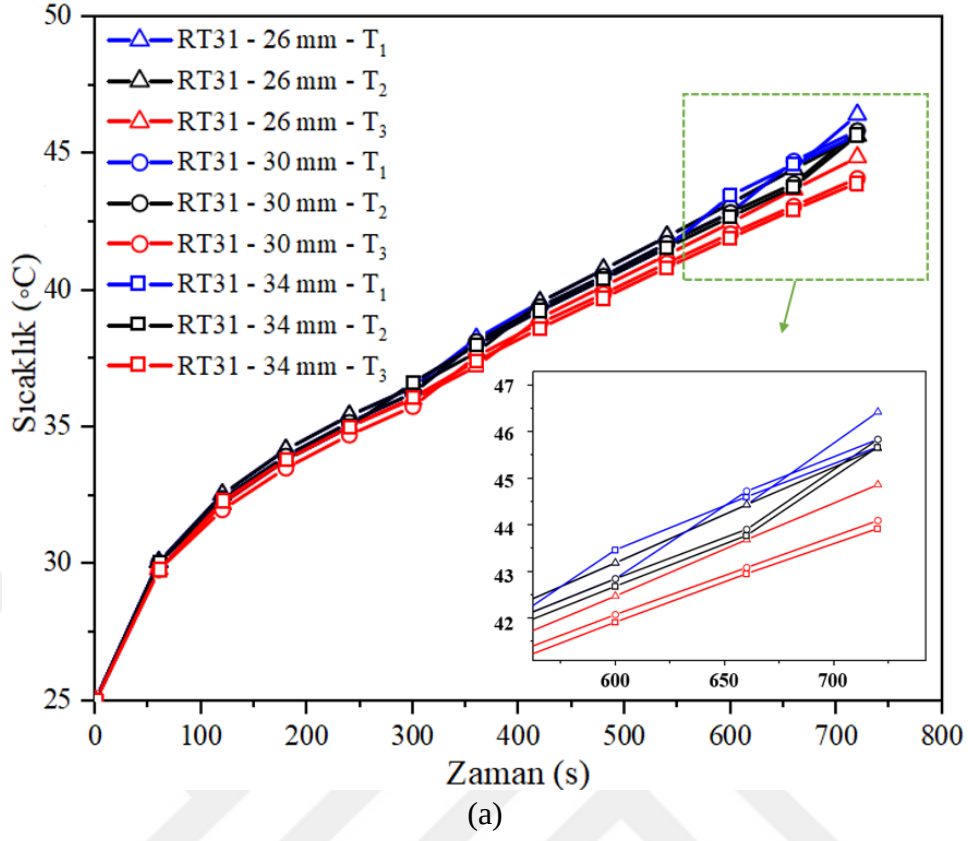


Şekil 4.17. 5C deşarj koşullarında farklı çapta hazne için maksimum sıcaklık grafiği

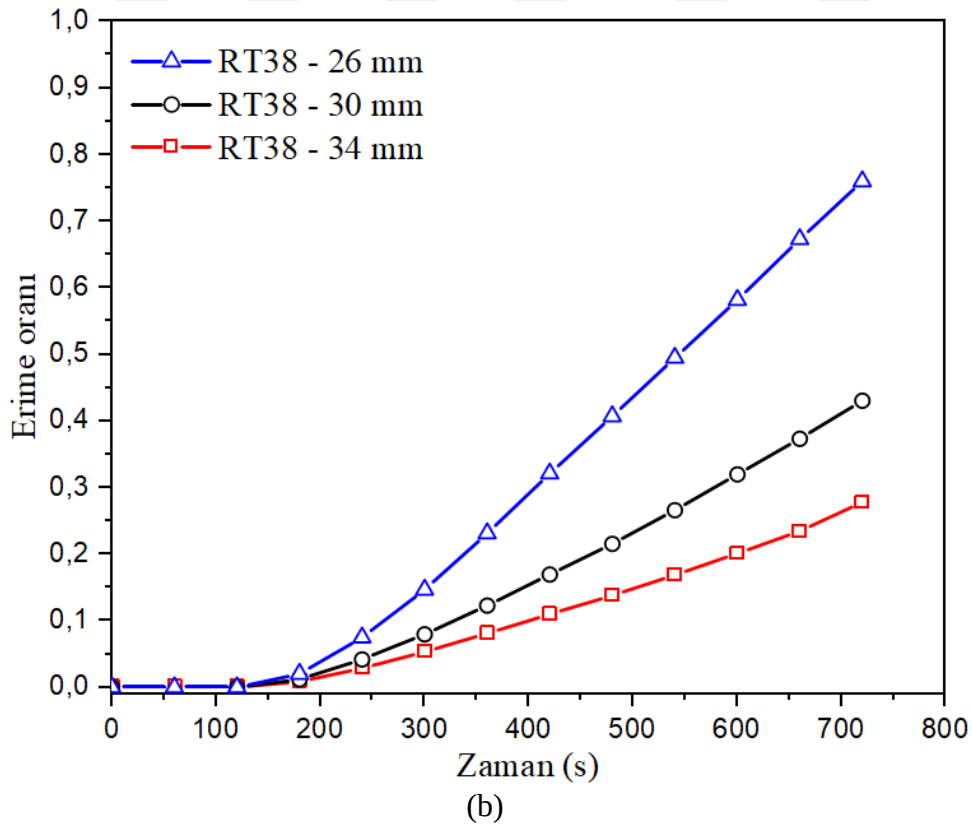
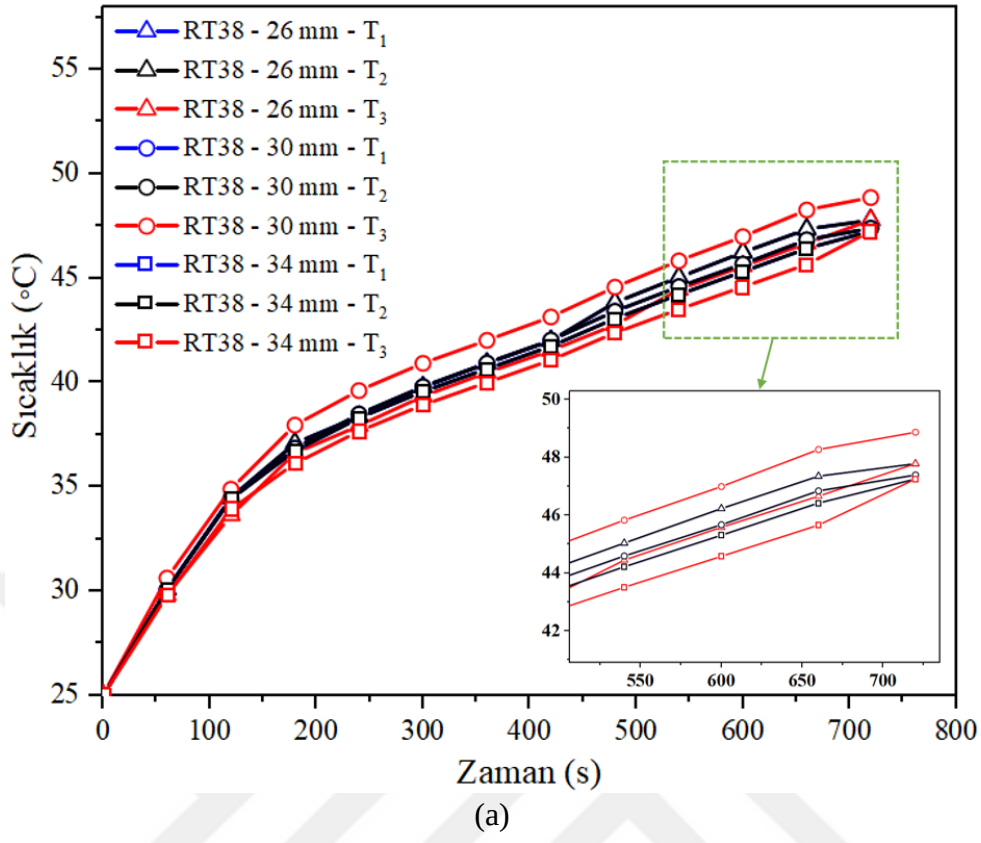
Öncelikle RT31'in 26, 30 ve 34 mm hazne çapından elde edilen T_1 , T_2 ve T_3 noktası sıcaklık sonuçları tartışıldı (Şekil 4.18). FDM hacminin artması gizli ısı kapasitesini artırmaktadır bundan dolayı en düşük T_1 ve T_3 sıcaklığı (45,68 °C ve 43,93 °C) 34 mm'de, en yüksek T_1 ve T_3 sıcaklığı (46,43 °C ve 44,87 °C) 26 mm FDM çapına sahip modelde bulundu. RT31'in 26, 30 ve 34 mm hazne çapından elde edilen T_1 ve T_3 noktalarının sıcaklık farkı karşılaştırıldığında sırasıyla 1,56 °C, 1,74 °C ve 1,75 °C olduğu hesaplandı. FDM çapının 34 mm'den 26 mm'ye düşürülmesiyle maksimum sıcaklık (RT31-34 mm 46,56 °C ve RT31-26 mm 47,22 °C) değerinde artış meydana gelmesine rağmen batarya hücrelerinin sıcaklık homojenliğinin iyileştiği görüldü. Bu durum, hazne iç çapı daraldıkça erime oranının artmasıyla yakından ilişkilidir. 34 mm hazne çapının 26 mm'ya düşürülmesiyle yaklaşık 0,36 olan erime oranı %59,55 artışla 0,89'a ulaşarak önemli miktarda artış gösterdi (Şekil 4.18b).

Bir diğer durum RT38 için, T_1 , T_2 ve T_3 noktalarının sıcaklık değerleri Şekil 4.19'da verildi ve bulgular tartışıldı. 26 mm hazne çapına sahip RT38'de, T_1 ve T_2 noktalarının 720. saniye sonuna kadar aynı sıcaklık değerlerine sahip olduğu tespit edildi. Deşarj sonuna kadar T_3 sıcaklığı diğer iki noktaya kıyasla daha düşük olmasına rağmen 720 saniye süre sonunda üç noktanın da aynı sıcaklık değerine ulaştığı görüldü (47,78 °C). Aynı durum 30 mm ve 34 mm hazne çapına sahip RT38'de de gözlemlendi (47,39 °C ve 47,25 °C). 30 mm ve 34 mm hazne çapına sahip RT38'de T_1 ve T_3 noktalarının sıcaklık değerlerinin süre sonuna kadar aynı olduğu ancak 720 saniye sonunda 3 noktanın da aynı değeri aldığı görüldü. Şekil 4.19b'de verilen erime oranı incelendiğinde süre sonunda 34 mm hazne çapına sahip FDM'nin erime oranı %28 iken, çap 26 mm'ye düşürüldüğünde erime oranı büyük oranda artarak %76'ya ulaştı.

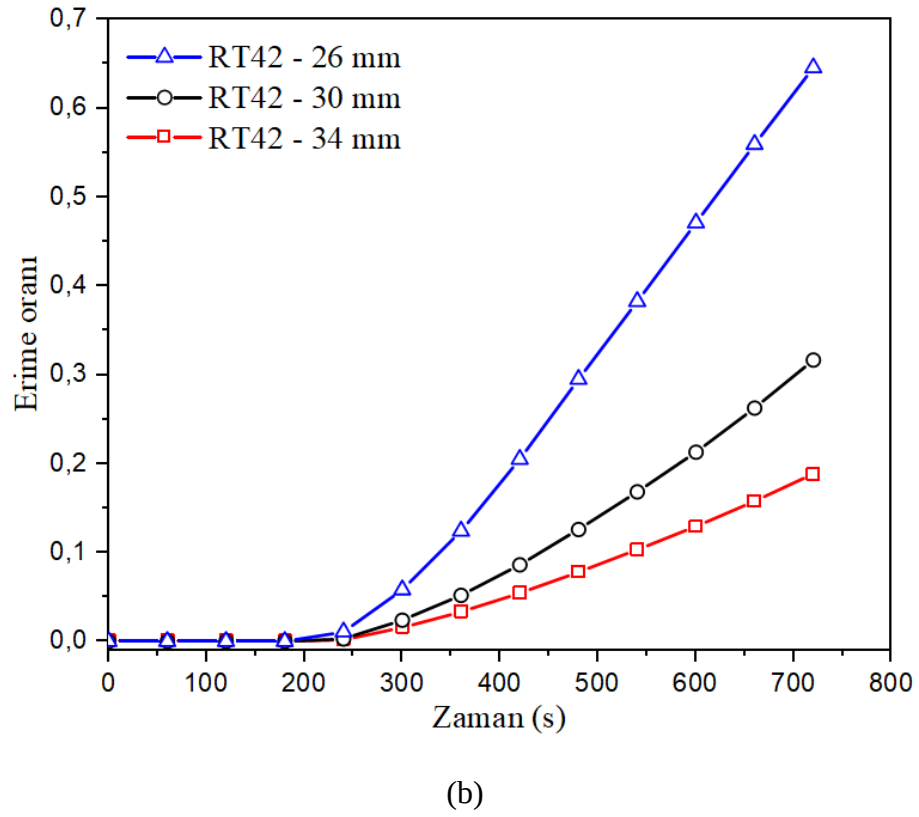
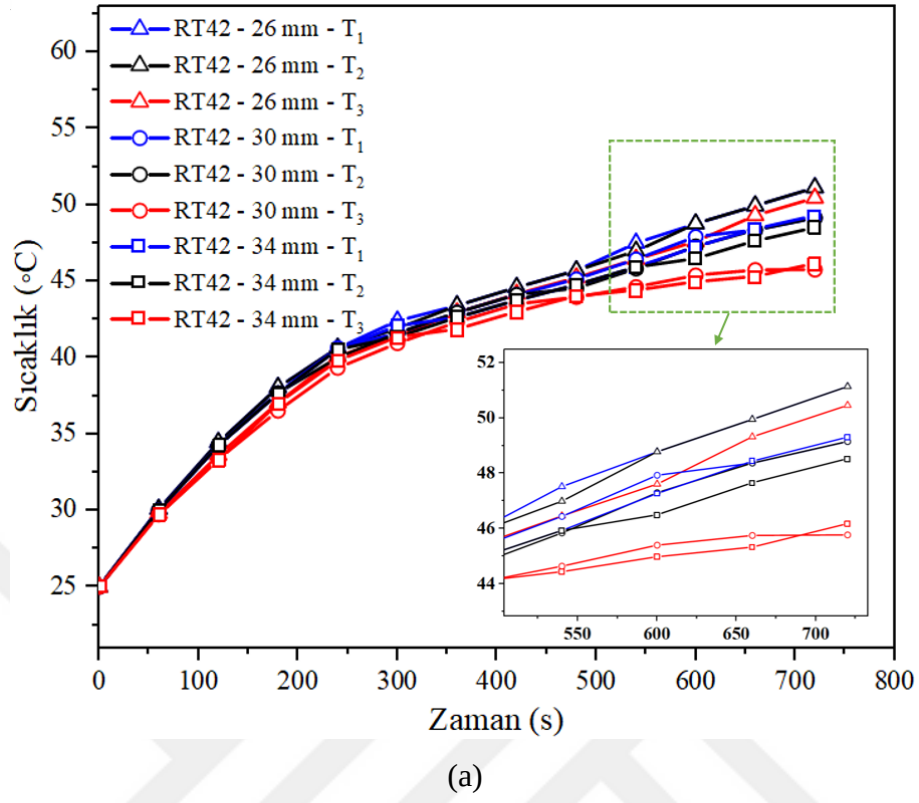
Son olarak farklı hacimdeki RT42'nin, T_1 , T_2 ve T_3 noktalarındaki sıcaklık değişimi Şekil 4.20'de sunuldu ve elde edilen veriler karşılaştırıldı. Şekil 4.19'dan farklı olarak sıcaklık değerlerinin yaklaşık 500. saniyeden itibaren birbirinden uzaklaştığı görülmektedir. Deşarj işlemi sonunda en yüksek sıcaklık 26 mm hazne çapına sahip batarya modelinin T_1 ve T_2 (iki nokta için de 51,14 °C) noktalarından alınırken, en düşük sıcaklık 30 mm hazne çapına sahip batarya modelinin T_3 (45,77 °C) noktasından elde edildi. 34 mm hazne çapına sahip RT42, %19 erime oranına henüz ulaşmışken, 26 mm hazne çapındaki RT42'nin erime oranının %65'e ulaştığı belirlendi.



Şekil 4.18. 5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT31) a) T₁, T₂ ve T₃ noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



Şekil 4.19. 5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT38) a) T₁, T₂ ve T₃ noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi



Şekil 4.20. 5C deşarj koşullarında farklı hazne çapı kullanıldığı durumda (RT42) a) T₁, T₂ ve T₃ noktası sıcaklığının zamanla değişimi, b) Erime oranının zamanla değişimi

Farklı hazne çapının, termal performans analizine ek olarak sistem kütleisindeki değişimi ve erime oranını belirlemek amacıyla kütle hesaplamaları yapıldı. Tablo 4.2’de hazne çapı, kütle ve erime oranı ilişkisi özetlendi. Tablodaki kütle değerleri, batarya, FDM ($T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ başlangıç durumdayken) ve haznenin toplam kütleisini ifade etmekte olup her bir durum için ayrı ayrı hesaplandı. Hazne çapının 34 mm’den 26 mm’ye düşürülmesiyle toplam kütlede 26,29 gram (%34,43) azalma hesaplandı. Hazne çapının 34 mm olduğu durumda RT31, RT38 ve RT42’nin erime oranları sırasıyla %36, %28 ve %19 iken, hazne çapının 26 mm olduğu durumda erime oranlarının %89, %76 ve %65’e çıktığı gözlemlendi. Bu durum, hazne çapının 26 mm’ye düşürülmesiyle FDM’nin gizli ısısından yararlanma oranının arttığını göstermektedir.

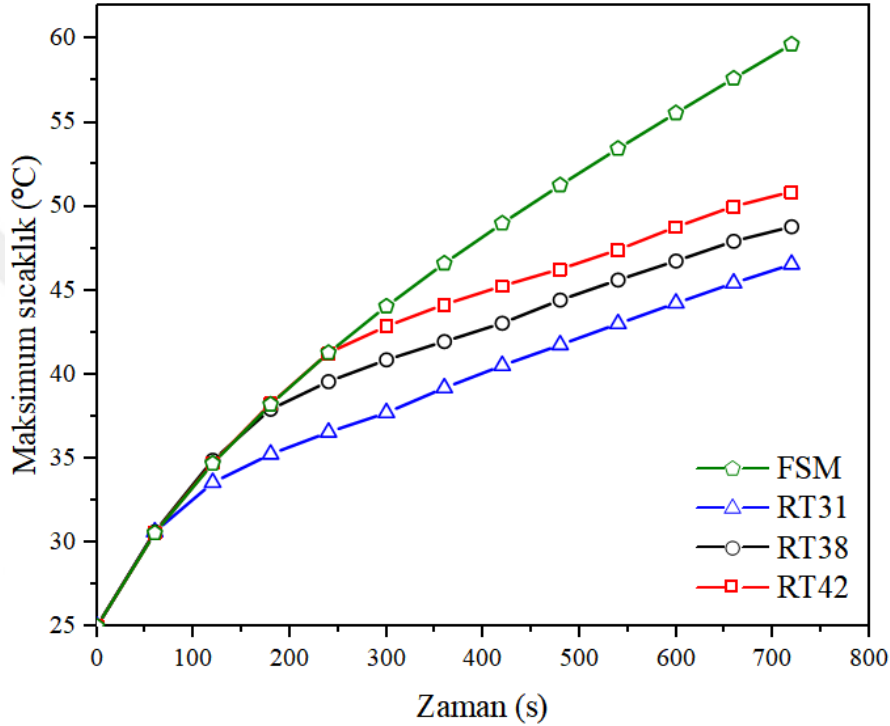
Tablo 4.2. Farklı hazne çapındaki sistem kütlesi ve 720 saniye sonundaki erime oranı

FDM	Hazne çapı	m (gr)	Erime oranı
RT31	26 mm	76,34	%89
	30 mm	88,75	%54
	34 mm	102,63	%36
RT38	26 mm	76,34	%76
	30 mm	88,75	%43
	34 mm	102,63	%28
RT42	26 mm	76,34	%65
	30 mm	88,75	%32
	34 mm	102,63	%19

4.3. FDM Gizli Isısının Termal Performansa Etkisi

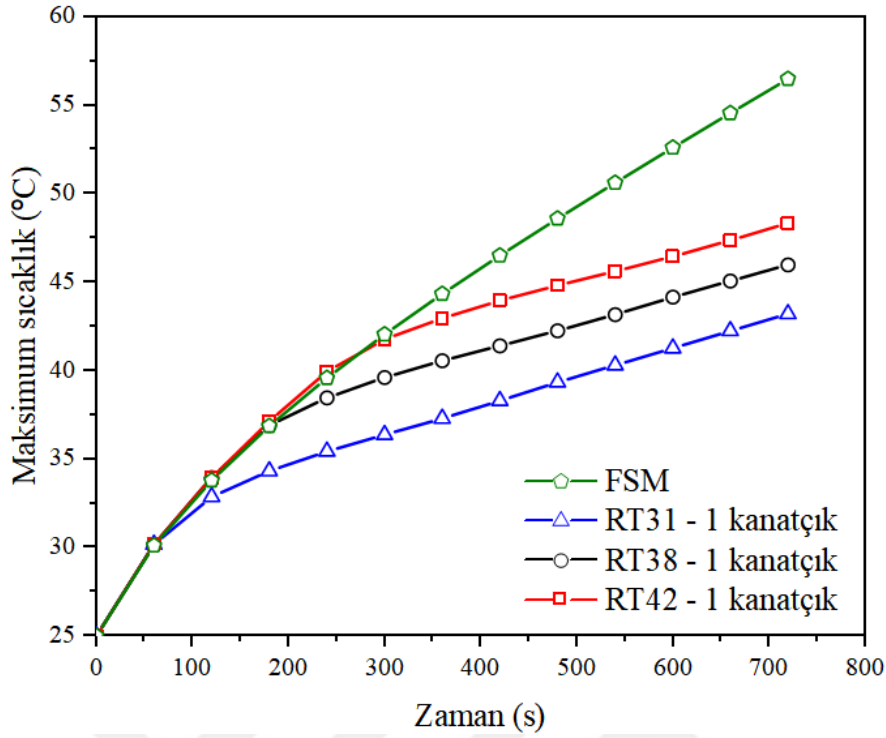
FDM gizli ısısının, soğutma performansına katkısını incelemek amacıyla Bölüm 4.1’de referans durumda sunulan analiz sonuçlarına ek olarak FDM faz dönüşüm modu pasif olduğu durumda yapılan analiz sonuçları eklendi (Şekil 4.21). FDM ile (erime ve katılaşma süreçleri hariç bu nedenle gizli ısıya sahip değil) birebir aynı termofiziksel özelliklere sahip Faz Stabil Malzeme (FSM) yaklaşımı kullanıldı (Arıcı ve diğ., 2022). Batarya modeline entegre edilen FSM, termal kapasitenin artmasına sebep olur. Bu 3 farklı FDM’nin katı haldeki yoğunluk, (erime/katılaşma modu kapalı olduğundan sadece $\rho_k=880\text{ kg/m}^3$ dikkate alındı) özgül ısı kapasitesi ($C_p=2000\text{ J/kg}\cdot\text{K}$) ve ısı iletim katsayısı ($k=0,2\text{ W/m}\cdot\text{K}$) değerleri aynı olduğundan FSM kullanıldığında aynı sıcaklık değeri sonucuna ulaşıldı. Referans durumun 5C deşarj oranı altında, 720 saniye süre

sonunda maksimum sıcaklığı 59,65 °C'ye ulaşmıştır ki bu da LİB için optimum çalışma sıcaklığının çok üzerinde olduğunu göstermektedir. Dikkat çekici bir diğer husus, FDM'nin depoladığı enerji sayesinde sıcaklık grafiğinde düşük bir eğim açısı söz konusuyken, FSM'de daha dik açıyla arttığı görülmektedir. Sonuç olarak gizli ısının RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla 13,09 °C, 10,85 °C ve 8,77 °C'lik sıcaklık düşüşü gösterdiği ve soğutma etkinliğine katkısının ihmal edilemeyecek boyutta olduğu açıktır.



Şekil 4.21. 5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Referans durum)

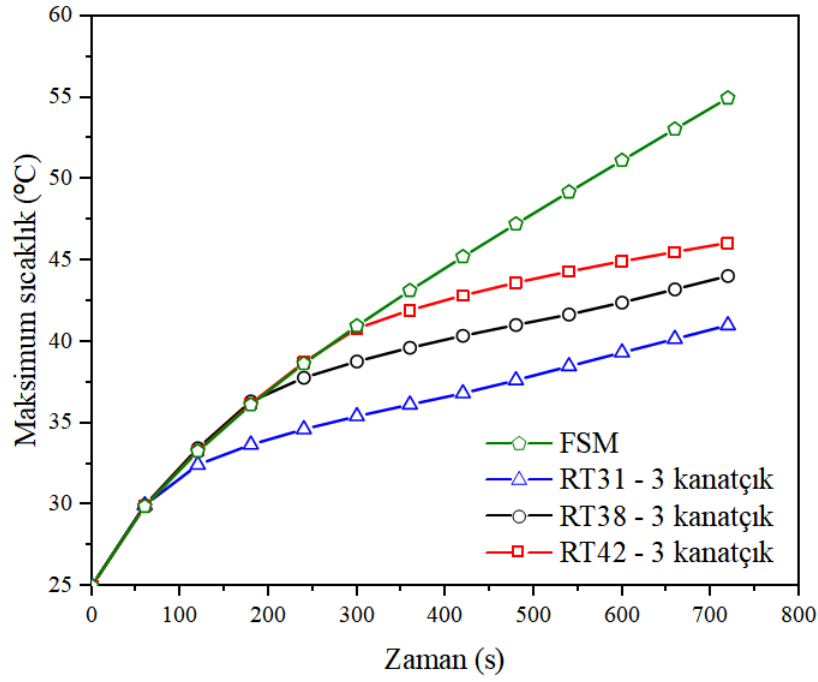
Kanatçık entegresi ve kanatçık sayısı değişiminin gizli ısı kullanım oranına ilişkin detaylı analizi yapıldı. Bu nedenle referans duruma ek olarak, sırasıyla Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III için FSM'nin termal etkileri analiz edildi. Şekil 4.22'de Tasarım-I için daha önce Bölüm 4.1'de sunulan analiz sonuçlarına ek olarak FSM etkisi de eklendi. Tasarım-I, FDM kullanıldığında deşarj sonunda RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla 43,2 °C, 45,98 °C ve 48,33 °C sıcaklık değerlerine ulaşırken, FSM entegre edildiğinde %30,74, %22,83 ve %16,86 artarak 56,48 °C'yle sonuçlandı. FSM kullanıldığında, sıcaklık değerlerinin bu denli yükselmesi, gizli ısının sistem içerisindeki etkinliğini ve kullanım gerekliliğini açıkça ortaya çıkarmaktadır.



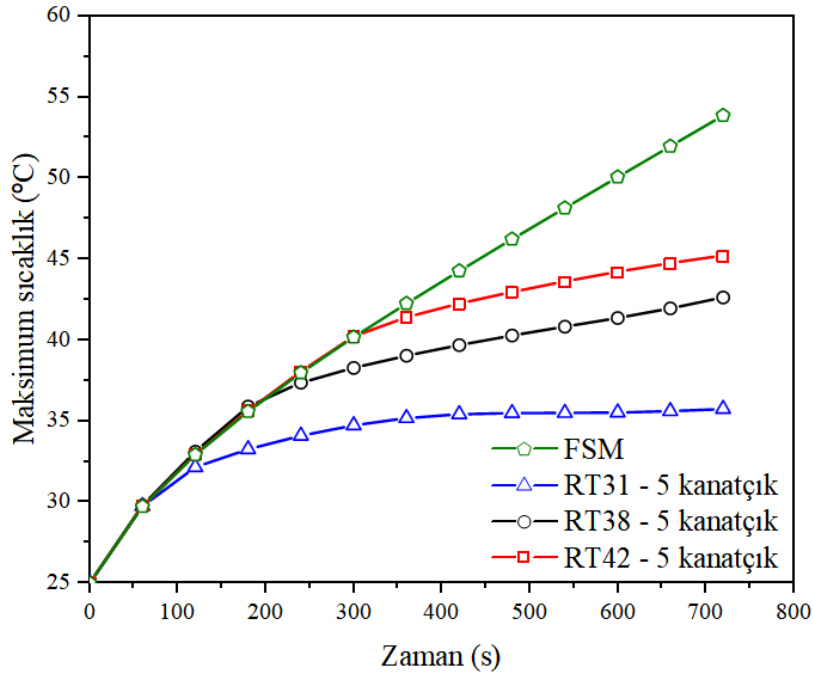
Şekil 4.22. 5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-I)

Bir diğer durum Tasarım-II, FDM ve FSM entegre edilerek analiz edildi ve sonuçlar Şekil 4.23'te sunuldu. Deşarj işlemi sonunda, RT31, RT38, RT42 için sıcaklık değerleri sırasıyla 41 °C, 44,04 °C, 46,08 °C olarak elde edildi ve FSM dahil edildiğinde %34, %24,79 ve %19,27 artarak 54,96 °C'ye ulaştı. Bulgular incelendiğinde, Tasarım-I'e kıyasla süre sonunda FDM sıcaklığında 2,2 °C, 1,94 °C ve 2,25 °C, FSM sıcaklığında 1,52 °C düşüş tespit edildi.

Gizli ısıнын iyileştirici etkisini ve soğutma performansına katkısını ortaya çıkarmak amacıyla, son olarak Tasarım-III için FDM ve FSM karşılaştırmalı olarak incelendi ve Şekil 4.24'te verildi. Deşarj süreci sonunda, RT31, RT38, RT42'nin maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 35,75 °C, 42,63 °C, 45,22 °C elde edilirken, FSM ile bu değerlerin %53,85, %26,34 ve %19,10 artışla 53,86 °C'ye çıktığı görüldü. Tasarım-II'ye kıyasla süre sonunda RT31, RT38 ve RT42 sıcaklığında sırasıyla 5,25 °C, 1,41 °C ve 3,86 °C, FSM sıcaklığında 1,1 °C düşüş tespit edildi.



Şekil 4.23. 5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-II)



Şekil 4.24. 5C deşarj koşullarında FDM ve FSM'nin soğutma performansına etkisi (Tasarım-III)

Bölüm 4.3'te, gizli ısıнын katkısını belirlemek amacıyla referans duruma ek olarak Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III için analiz çalışması gerçekleştirildi. Yüksek deşarj hızlarında, FDM gizli ısıнын bataryadaki ani sıcaklık artışlarını dengelediği ve kontrol

altında tuttuğu açığa çıktı. Ayrıca, kanatçık sayısı arttıkça gizli ısı aktivasyonunun sıcaklık üzerindeki etkisi daha net görüldü.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada FDM entegre edilmiş batarya hücresinin termal performansı farklı yaklaşımlara dayanarak çözümlendi. Bu sebeple, kanatçık sayısı (1, 3 ve 5 kanatçık), hazne çapı (26 mm, 30 mm ve 34 mm) ve FDM gizli ısı etkisi (FSM yaklaşımı), 3 farklı FDM (RT31, RT38 ve RT42) ve 3 farklı deşarj oranı (1C, 3C ve 5C) için çalışılmış olup elde edilen bulgular tartışıldı.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Referans durumda, 1C deşarj sonunda üç farklı FDM için maksimum sıcaklık değerinin bataryanın etkili çalışma sıcaklığı (25-40 °C) aralığında kaldığı görüldü. 3C deşarj sonunda RT42, 41,39 °C ile en yüksek sıcaklık değerine ulaşırken RT31, 35,18 °C ile en düşük sıcaklığa sahip oldu. 5C deşarj sonunda maksimum sıcaklık değerlerinin bataryanın optimum çalışma sıcaklığı üst limit değerini (40 °C) aştığı ve sırasıyla 46,56 °C, 48,8 °C ve 50,88 °C'ye ulaştığı görüldü. Ayrıca, 5C deşarj oranının kritik olduğu ve termal performans özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varıldı.

Tasarım-I, FDM içinde yeni ısı iletim kanalları oluşturarak, ısı transferini geliştirici etki gösterdi ve 5C deşarj sonucunda RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla 3,36 °C, 2,82 °C ve 2,55 °C sıcaklık düşüşü meydana getirdi.

Kanatçık sayısının 1'den 3' e çıkarılmasıyla oluşturulan Tasarım-II'de, Tasarım-I'e kıyasla maksimum sıcaklık değerlerinde RT31, RT38 ve RT42 için sırasıyla 2,2 °C, 1,94 °C ve 2,25 °C sıcaklık düşüşü görüldü.

Tasarım-III, deşarj sonunda incelendiğinde, RT31, RT38 ve RT42'de referans duruma kıyasla sırasıyla %23,21, %12,64 ve %11,12 oranında sıcaklık düşüşü gözlemlendi.

Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III'ten elde edilen bulgulara göre, kanatçık sayısı arttıkça erime oranının da artış gösterdiği görüldü. Tasarım-II'nin erime oranı, Tasarım-I'e kıyasla %5,5, %5 ve %2 oranında iyileşti. Aynı şekilde Tasarım-III için erime oranı incelendiğinde, Tasarım-I'e kıyasla %22, %11,5 ve %3 oranında artış görüldü (RT31, RT38 ve RT42). Bu durum, kanatçık ve FDM ısı transfer yüzey alanının artmasıyla erimenin hızlanmasından kaynaklanmaktadır.

Referans durumda, T_1 , T_2 ve T_3 noktaları arasındaki $3,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan maksimum sıcaklık farkının, Tasarım-II'de $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düştüğü görüldü. Sonuçlar, kanatçık entegresiyle batarya yüzeyindeki sıcaklık homojenliğinin geliştiğini göstermektedir.

Hazne çapının 34 mm 'den 26 mm 'ye düşürülmesinin, gizli ısı kapasitesini azaltmasına rağmen ısı transferi üzerinde çok kritik bir etkisi olmadığı ancak erime oranında ciddi değişimlere sebep olduğu görüldü. 5C deşarj oranında, RT31, RT38 ve RT42 kullanılarak yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, hazne çapı 34 mm 'den 26 mm 'ye düşürüldüğünde erime oranının $0,36$ 'dan $0,89$ 'a, $0,28$ 'den $0,76$ 'ya, $0,19$ 'dan $0,65$ 'e çıktığı tespit edildi. Bununla birlikte, maksimum sıcaklık değerlerinde $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ artış görüldü. Ayrıca, hazne çapı 34 mm 'den 30 mm 'ye ve 30 mm 'den 26 mm 'ye düşürüldüğünde, batarya modeli kütleinde sırasıyla $13,88\text{ gr}$ ve $12,41\text{ gr}$ azalma hesaplandı.

FDM ve FSM karşılaştırılarak, gizli ısının termal performansa katkısı ve kullanım etkinliği incelendi. 5C deşarj koşullarında yapılan analiz sonucunda, FSM yerine FDM entegre edilmesiyle referans durum için RT31, RT38 ve RT42'de sırasıyla $13,09\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $8,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tasarım-I için $13,28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $8,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tasarım-II için $13,96\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $8,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve Tasarım-III için $18,11\text{ }^{\circ}\text{C}$, $11,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $8,64\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık düşüşü görüldü. Referans durum, Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III için ayrı ayrı gerçekleştirilen analizler sonucunda gizli ısının sıcaklık düşüşü sağladığı ve soğutma etkinliğine katkısının ihmal edilemeyecek boyutta olduğu sonucuna varıldı.

Referans durum, Tasarım-I, Tasarım-II ve Tasarım-III için taşınımın batarya termal performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yer çekimi ivmesinin ihmal edildiği senaryolar oluştu ve analiz sonuçları tartışıldı. 3C deşarj koşullarında yer çekimi ivmesi kapalı olduğu durumda, açık olduğu duruma kıyasla referans durum için RT31, RT38 ve RT42 maksimum sıcaklık değerlerinde sırasıyla $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ düşüş görüldü. Erime oranları karşılaştırıldığında yer çekiminin ihmal edilmesiyle birlikte RT31'de $0,224$ 'ten $0,222$ 'ye, RT38'de $0,115$ 'ten $0,114$ 'e ve RT42'de $0,0358$ 'den $0,0357$ 'ye düşüş gözlemlendi. Aynı analiz 5C deşarj oranı için gerçekleştirildiğinde, yer çekimi ivmesinin kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla referans durum için RT31 ve RT42 maksimum sıcaklık değerlerinde sırasıyla $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ düşüş,

RT38’de ise 0,07 °C artış görüldü. Süre sonunda RT31’de, 0,363’ten 0,360’a, RT38 0,278’den 0,249’a ve RT42’de 0,188’den 0,182’ye düşüş yaşandı.

5C deşarj koşullarında referans durum ve Tasarım-III için yer çekimi ivmesinin etkisi karşılaştırıldığında referans durumda göz ardı edilebilecek seviyelerde olan maksimum sıcaklık farkının Tasarım-III’te arttığı görüldü (özellikle RT31’de). 720 saniye deşarj sonunda Tasarım-III’te, yer çekimi ivmesinin kapalı olduğu durumda açık olduğu duruma kıyasla RT31 ve RT42’de sırasıyla 3,76 °C ve 0,07 °C artış gözlenirken, RT38’in maksimum sıcaklık değerlerinin her iki durum için de aynı olduğu görüldü (RT38 - 42,63 °C). Erime oranları incelendiğinde süre sonunda RT31’in 0,44’ten 0,40’a düştüğü, RT38 ve RT42’de kritik bir fark olmadığı sonucuna varıldı.

Tez çalışmasında elde edilen bulgular ışığında gelecek çalışmalar için aşağıdakiler önerilebilir:

Tez çalışması 25 °C ortam sıcaklığı için 3 farklı FDM ile çalışıldı. Ancak değişken iklim koşulları ve FDM’lerin erime ve katılaşma sıcaklıkları düşünüldüğünde EA bataryalarının düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında (özellikle 0 °C altı ve 60 °C üzerindeki sıcaklık değerleri için) FDM ile sağlıklı operasyon koşullarını sürdürebilmesi için analizler yapılmalıdır.

Kanatçık entegre edilmiş BTYS’lerde batarya yüzeyi boyunca üniform dağılıma sahip olmayan kanatçık geometrisinin, ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmelidir. Ayrıca, eksenel ve radyal kanatçıkla oluşturulmuş tasarımların termal yönetim performansları karşılaştırılmalıdır.

FDM’lerin, tek başına bataryanın soğutma yükünü karşılamada yetersiz kaldığı durumlarda diğer soğutma stratejileriyle birleştirilip (hibrit BTYS’ler) kompakt tasarımının ve ticari uygulamaya elverişliliğinin geliştirilme çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abd, H. M., Khalifa, A. H. N., & Hamad, A. J. (2024). Experimental comparison of the Li-ion battery thermal management systems using a new hybrid model of flat heat pipe coupled with phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 84, 110963. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.110963>
- Akinlabi, A. A. H., & Solyali, D. (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109815. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109815>
- Akula, R., Minnikanti, A., & Balaji, C. (2024). Pin fin-PCM composite heat sink solution for thermal management of cylindrical Li-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 248, 123146. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123146>
- An, Z., Gao, W., Zhang, J., Liu, H., & Gao, Z. (2024). Enhancing heat dissipation of thermal management system utilizing modular dual bionic cold plates for prismatic lithium batteries. *Journal of Energy Storage*, 87, 111541. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111541>
- Arici, M., Bilgin, F., Krajčák, M., Nižetić, S., & Karabay, H. (2022). Energy saving and CO2 reduction potential of external building walls containing two layers of phase change material. *Energy*, 252, 124010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124010>
- Aswin Karthik, C., Kalita, P., Cui, X., & Peng, X. (2020). Thermal management for prevention of failures of lithium ion battery packs in electric vehicles: A review and critical future aspects. *Energy Storage*, 2(3), e137. <https://doi.org/10.1002/est2.137>
- Bhutto, Y. A., Pandey, A. K., Saidur, R., Sharma, K., & Tyagi, V. V. (2023). Critical insights and recent updates on passive battery thermal management system integrated with nano-enhanced phase change materials. *In Materials Today Sustainability*, 23, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100443>
- Cai, S., Zhang, X., & Ji, J. (2023). Recent advances in phase change materials-based battery thermal management systems for electric vehicles. *In Journal of Energy Storage*, 72, 108750. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108750>
- Cheng, G., Wang, Z., Tang, T., & He, Y. (2024). A novel double-layer lithium-ion battery thermal management system based on composite PCM optimized heat dissipation and preservation in cold climates. *Journal of Energy Storage*, 85, 110992. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110992>
- Chen, K., Huang, Q., Li, Q. Y., Liang, S., & Wu, X. (2024). Optimization strategy for battery thermal management system with phase change materials, aerogel and cold plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221, 125070. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125070>

- Chen, M., Zhu, M., Zhang, S., Ouyang, D., Weng, J., Wei, R., Chen, Y., Zhao, L., & Wang, J. (2023). Experimental investigation on mitigation of thermal runaway propagation of lithium-ion battery module with flame retardant phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121401. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121401>
- Choudhary, V. G., Dhoble, A. S., & Panchal, S. (2020). Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 163, 120434. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120434>
- Dey, H., Pati, S., Randive, P. R., & Baranyi, L. (2024). Effect of finned networks on PCM based battery thermal management system for cylindrical Li-ion batteries. *Case Studies in Thermal Engineering*, 59, 104572. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104572>
- Ebbs-Picken, T., Da Silva, C. M., & Amon, C. H. (2023). Design optimization methodologies applied to battery thermal management systems: A review. In *Journal of Energy Storage*, 67, 107460. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107460>
- El Idi, M. M., Karkri, M., & Abdou Tankari, M. (2021). A passive thermal management system of Li-ion batteries using PCM composites: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120894. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120894>
- Fan, R., Zheng, N., & Sun, Z. (2021). Evaluation of fin intensified phase change material systems for thermal management of Li-ion battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166, 120753. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120753>
- Fayaz, H., Ramesh, S., Raja, V., Linul, E., Khan, S. A., Asif, M., Buradi, A., & Samuel, O. D. (2024). Temporal numerical analysis of beeswax PCM melting in a cube geometry subjected to a constant wall temperature condition. *Case Studies in Thermal Engineering*, 56, 104273. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104273>
- Feng, X. H., Li, Z. Z., Gu, F. S., & Zhang, M. L. (2024). Structural design and optimization of air-cooled thermal management system for lithium-ion batteries based on discrete and continuous variables. *Journal of Energy Storage*, 86, 111202. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111202>
- Ghaeminezhad, N., Wang, Z., & Ouyang, Q. (2023). A Review on lithium-ion battery thermal management system techniques: A control-oriented analysis. In *Applied Thermal Engineering*, 219, 119497. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119497>
- Goodenough, J. B. (2015). Energy storage materials: A perspective. In *Energy Storage Materials*, 1, 158–161. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2015.07.001>

- Gu, Y. (2023). Rational Design of Nanoelectrodes for Highly Efficient Lithium-Ion Batteries. In *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 29, 168-174.
- Haddad, Z., Belkadi, D., Mourad, A., Aissa, A., Said, Z., Younis, O., Alazzam, A., & Abu-Nada, E. (2024). Advancements and comprehensive overview of thermal management systems for lithium-ion batteries: Nanofluids and phase change materials approaches. In *Journal of Power Sources*, 603, 234382. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234382>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101235>
- Jacob, J., Paul, J., Pandey, A. K., Selvaraj, J., Rahim, N. A., Samykano, M., & Kadirgama, K. (2023). Analyzing long-term reliability and potential of organic eutectic Phase Change Material as thermal batteries. *Journal of Energy Storage*, 74, 109480. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109480>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197>
- Jilte, R. D., Kumar, R., Ahmadi, M. H., & Chen, L. (2019). Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling. In *Applied Thermal Engineering*, 161, 114199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114199>
- Kadam, G., & Kongi, P. (2023). Battery thermal management system based on PCM with addition of nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1543–1549. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.384>
- Khan, F. M. N. U., Rasul, M. G., Sayem, A. S. M., & Mandal, N. K. (2023). Design and optimization of lithium-ion battery as an efficient energy storage device for electric vehicles: A comprehensive review. In *Journal of Energy Storage*, 71, 108033. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108033>
- Khan, M. M., Alkhedher, M., Ramadan, M., & Ghazal, M. (2023). Hybrid PCM-based thermal management for lithium-ion batteries: Trends and challenges. In *Journal of Energy Storage*, 73, 108775. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108775>
- Khan, S. A., Hussain, I., Thakur, A. K., Yu, S., Lau, K. T., He, S., Dong, K., Chen, J., Xiangrong, L. I., Ahmad, M., & Zhao, J. (2024). Advancements in battery thermal management system for fast charging/discharging applications. In *Energy Storage Materials*, 65, 103144. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.103144>
- Khan, S. A., Xiangrong, L. I., Lau, K. T., Dong, K., He, S., Wabaidur, S. M., Thakur, A. K., & Zhao, J. (2024). Metallic PCM-based battery thermal management system for

- fast charging/discharging applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 155, 107473. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107473>
- Kim, I., Kim, Y., Kwon, J., Lee, C., & So, J. (Jason). (2023). Beyond concept: The viability of exclusive lanes for zero emission vehicles on expressways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103803>
- Kong, D., Peng, R., Ping, P., Du, J., Chen, G., & Wen, J. (2020). A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures. *Energy Conversion and Management*, 204, 112280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112280>
- Lai, X., Chen, Q., Tang, X., Zhou, Y., Gao, F., Guo, Y., Bhagat, R., & Zheng, Y. (2022). Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. In *eTransportation*, 12, 100169. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100169>
- Lidbeck, A., & Syed, K. (2017). Experimental characterization of li-ion battery cells for thermal management in heavy duty hybrid applications
- Liu, H., Jin, C., Li, H., & Ji, Y. (2023). A numerical study of PCM battery thermal management performance enhancement with fin structures. *Energy Reports*, 9, 1793–1802. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.04.214>
- Liu, Y., Zheng, R., & Li, J. (2022). High latent heat phase change materials (PCMs) with low melting temperature for thermal management and storage of electronic devices and power batteries: Critical review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112783>
- Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S., & Huang, L. (2022). Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review. In *Chemical Engineering Journal*, 430, 132741. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741>
- Luo, M., Zhang, Y., Wang, Z., Niu, Y., Lu, B., Zhu, J., Zhang, J., & Wang, K. (2024). Thermal performance enhancement with snowflake fins and liquid cooling in PCM-based battery thermal management system at high ambient temperature and high discharge rate. *Journal of Energy Storage*, 90, 111754. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111754>
- Mahmud, M., Rahman, K. S., Rokonzaman, M., Habib, A. K. M. A., Islam, M. R., Motakabber, S. M. A., Channumsin, S., & Chowdhury, S. (2023). Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material: A review. *Results in Engineering*, 20, 101424. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101424>

- Maknikar, S. K., & Pawar, A. M. (2023). Application of phase change material (PCM) in battery thermal management system (BTMS): A critical review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.329>
- 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. *In Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653-666. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- Moaveni, A., Siavashi, M., & Mousavi, S. (2024). Passive and hybrid battery thermal management system by cooling flow control, employing nano-PCM, fins, and metal foam. *Energy*, 288, 129809. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129809>
- Murugan, M., Saravanan, A., Elumalai, P. V., Murali, G., Dhineshababu, N. R., Kumar, P., & Afzal, A. (2022). Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study. *Journal of Energy Storage*, 52, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104723>
- Najafi Khaboshan, H., Jaliliantabar, F., Abdullah, A. A., Panchal, S., & Azarinia, A. (2024). Parametric investigation of battery thermal management system with phase change material, metal foam, and fins; utilizing CFD and ANN models. *Applied Thermal Engineering*, 247, 123080. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123080>
- Najafi Khaboshan, H., Jaliliantabar, F., Adam Abdullah, A., & Panchal, S. (2023). Improving the cooling performance of cylindrical lithium-ion battery using three passive methods in a battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 227, 120320. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120320>
- Nasajpour-Esfahani, N., Garmestani, H., Rozati, M., & Smaisim, G. F. (2023). The role of phase change materials in lithium-ion batteries: A brief review on current materials, thermal management systems, numerical methods, and experimental models. *In Journal of Energy Storage*, 63, 107061. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107061>
- Paneerselvam, P., S.K., N., Suyamburajan, V., Murugaiyan, T., Singh Shekhawat, K., & Rengasamy, G. (2024). A review on recent progress in battery thermal management system in electric vehicle application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.094>
- Ranjbar Kermani, J., Mahlouji Taheri, M., Pakzad, H., Minaei, M., Bijarchi, M. A., Moosavi, A., & Shafii, M. B. (2024). Hybrid battery thermal management systems based on phase transition processes: A comprehensive review. *In Journal of Energy Storage*, 86, 111227. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111227>
- Rong, L., Bai, X. S., Li, J. C., Zhang, R. Z., & Yang, W. W. (2024). Design and optimization of a hybrid cooling configuration combining PCM and liquid cooling

- for Li-ion battery using data-based response surface approximation model. *Applied Thermal Engineering*, 245, 122844. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122844>
- Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R. (2024). A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles. *Next Sustainability*, 3, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100036>
- Sharshir, S. W., Joseph, A., Elsharkawy, M., Hamada, M. A., Kandeal, A. W., Elkadeem, M. R., Kumar Thakur, A., Ma, Y., Eid Moustapha, M., Rashad, M., & Arıcı, M. (2023). Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. *In Energy and Buildings*, 285, 112908. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112908>
- Son, Y. W., Kang, D., & Kim, J. (2023). Passive battery thermal management system for an unmanned aerial vehicle using a tetrahedral lattice porous plate. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120186. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120186>
- Sun, Z., Fan, R., Yan, F., Zhou, T., & Zheng, N. (2019). Thermal management of the lithium-ion battery by the composite PCM-Fin structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118739. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118739>
- Sun, Z., Fan, R., & Zheng, N. (2021). Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Thermal Sciences*, 165, 106945. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106945>
- Su, Y., Xu, X., Chen, X., Shi, S., Qian, J., Song, Z., & Zhou, F. (2024). Experimental and numerical investigation of a battery thermal management system using a novel EVA-based thermal-induced flexible composite phase change material. *Journal of Energy Storage*, 83, 110607. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110607>
- Tete, P. R., Gupta, M. M., & Joshi, S. S. (2022). Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct. *Journal of Energy Storage*, 48, 104041. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104041>
- Wang, C., Xu, J., Wang, M., & Xi, H. (2023). Experimental investigation on reciprocating air-cooling strategy of battery thermal management system. *Journal of Energy Storage*, 58, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106406>
- Wankhede, S., & Kamble, L. V. (2023). A novel battery cooling system using nanofluids on MATLAB Simulink. *Energy Storage*, 5(3), e418. <https://doi.org/10.1002/est2.418>
- Wassiliadis, N., Schneider, J., Frank, A., Wildfeuer, L., Lin, X., Jossen, A., & Lienkamp, M. (2021). Review of fast charging strategies for lithium-ion battery systems and

- their applicability for battery electric vehicles. In *Journal of Energy Storage*, 44, 103306. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103306>
- Weng, J., Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Ouyang, D., Chen, M., Yuen, A. C. Y., Li, A., Lee, E. W. M., Yang, W., Wang, J., & Yang, X. (2022). Safety issue on PCM-based battery thermal management: Material thermal stability and system hazard mitigation. In *Energy Storage Materials*, 53, 580–612. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.09.007>
- Weragoda, D. M., Tian, G., Burkitbayev, A., Lo, K. H., & Zhang, T. (2023). A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. In *Applied Thermal Engineering*, 224, 120070. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120070>
- Xu, B., Xia, F., Wang, Y. liang, Xie, X., & Gan, W. tao. (2023). A battery thermal management scheme suited for cold regions based on PCM and aerogel: Demonstration of performance and availability. *Applied Thermal Engineering*, 227, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120378>
- Ye, Z., Fu, X., & Zhou, S. (2024). Research on control strategy of rapid preheating for power battery in electric vehicle at low temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 245, 122770. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122770>
- Youssef, R., Kalogiannis, T., Behi, H., Pirooz, A., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2023). A comprehensive review of novel cooling techniques and heat transfer coolant mediums investigated for battery thermal management systems in electric vehicles. In *Energy Reports*, 10, 1041–1068. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.041>
- Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Zhang, H. (2021). A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. In *Journal of Power Sources*, 501, 230001. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230001>
- Zhao, L., Li, W., Wang, G., Cheng, W., & Chen, M. (2023). A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced air-cooling. *Applied Thermal Engineering*, 232, 120992. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120992>
- Zheng, J., Chang, L., Mu, M., Li, J., Li, C., Ma, C., & Du, H. (2024). A novel thermal management system combining phase change material with wavy cold plate for lithium-ion battery pack under high ambient temperature and rapid discharging. *Applied Thermal Engineering*, 245, 122803. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122803>
- Zheng, M., Liu, Y., Ma, Z., Li, Y., Li, D., Lu, Z., Song, H., Guo, X., & Shao, W. (2023). Numerical study on power battery thermal management system based on heat pipe technology. *Energy Reports*, 9, 350–361. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.187>

- Zheng, N., Fan, R., Sun, Z., & Zhou, T. (2020). Thermal management performance of a fin-enhanced phase change material system for the lithium-ion battery. *International Journal of Energy Research*, 44(9), 7617–7629. <https://doi.org/10.1002/er.5494>
- Zhu, J., Chaturvedi, R., Fouad, Y., Albaijan, I., Juraev, N., Alzubaidi, L. H., Mahariq, I., Afandi, A., & Garalleh, H. A. L. (2024). A numerical modeling of battery thermal management system using nano-enhanced phase change material in hot climate conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 58, 104372. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104372>



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yavuz, B., Arıcı, M. (2023). Battery Thermal Management Systems For Electric Vehicles. *In ICTEA: International Conference on Thermal Engineering*, Yalova, Türkiye, 25-27 Mayıs 2023.



ÖZGEÇMİŞ

Beyzanur YAVUZ, 2017 yılında Kdz. Ereğli Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümündeki eğitimini makine mühendisi ünvanı alarak tamamladı. 2022 yılında aynı üniversitede Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı, 2023 yılı Mart ayından itibaren Düzce Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

