

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER KULLANILARAK LI-
ION BATARYALARIN PASİF SOĞUTULMASI

Merve SANDIKÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Şaban PUSAT

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER KULLANARAK LI-ION
BATARYALARIN PASİF SOĞUTULMASI

Merve SANDIKÇI tarafından hazırlanan tez çalışması 26.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şaban PUSAT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Şaban PUSAT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ercan ERTÜRK, Üye
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Şaban PUSAT sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Faz Değiştiren Malzemeler Kullanılarak Li-Ion Bataryaların Pasif Soğutulması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Merve SANDIKÇI

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca engin bilgi birikimi, akademik rehberliği ve değerli yönlendirmeleriyle çalışmama şekil veren, katkılarıyla bu sürecin her aşamasında yolumu aydınlatan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Şaban Pusat'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği fedakârca sağlayan, varlıklarıyla daima güç ve ilham kaynağım olan sevgili anneme, babama, ablama ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim. Bu zorlu süreçte gösterdikleri sabır, anlayış ve sevgileri sayesinde motivasyonumu yüksek tutabildim. Stresimi, sevincimi ve üzüntülerimi büyük bir özveriyle paylaştıkları için onlara minnettarım. Her zaman yanımda olduklarını bilmek, bu akademik yolculukta bana güven ve motivasyon kazandırdı.

Merve SANDIKÇI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Li-Ion Bataryalar.....	5
2.1.1 Katot Malzemesi.....	8
2.1.2 Anot Malzemesi.....	9
2.1.3 Elektrolit Katot Malzemesi.....	10
2.2 Batarya Termal Yönetim Sistemi.....	11
2.2.1 Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemi	12
2.2.2 Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemi	13
2.2.3 Faz Değiştiren Malzeme ile Batarya Termal Yönetim Sistemi.....	14
2.3 Li-Ion Bataryaların Performans Parametreleri.....	17
2.3.1 Amper-Saat Kapasitesi	17
2.3.2 Sıcaklık Etkisi.....	18
2.3.3 C-Oranı	21
2.3.4 Özgül Enerji.....	21
2.3.5 Enerji ve Güç Yoğunluğu.....	21
2.3.6 Şarj Durumu	22
2.3.7 Çevrim Ömrü.....	23

2.3.8 Verimlilik	23
2.4 Lityum- İyon Bataryaların Enerji Tüketimi	24
2.5 FDM Seçimi	25
2.5.1 Maliyet karşılaştırması	28
2.6 Elektrikli Aracın Enerji Tüketimi	30
3 MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1 Matematiksel Model	32
3.2 Model Geliştirme	36
3.2.1 Modülün Yapısı, Geometrisi, Bileşenleri ve Yapılandırması.....	37
4 BULGULAR VE TARTIŞMA	43
5 SONUÇ	46
KAYNAKÇA	49
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	55

SİMGE LİSTESİ

U	Açık Devre Gerilimi
I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
A	Amper
Q	Bataryanın Nominal Kapasitesi
m	Debi
C	Deşarj Oranı
E	Enerji
H	Entalpi
V	Hacim
K	Kelvin
C_p	Özgül Isı
T	Sıcaklık
σ	Termal İletkenlik
V	Volt
W	Watt
μ	Vizkozite
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ANSYS	Mühendislik Simülasyon Yazılımı
Ah	Amper-saat
BEA	Batarya Elektrikli Araç
BTYS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CFD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
CFDM	Kompozit Faz Değiştiren Malzemeler
DoD	Deşarj Derinliği
EA	Elektrikli Araç
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
HTF	Isı Transferi Akışkanı
Li-ion	Lityum-İyon
NiMH	Nikel Metal Hidrit
SoC	Şarj Durumu
SoH	Sağlık Durumu
UDF	Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Temel elektrikli aracın güç aktarma organı.....	1
Şekil 1.2	Farklı batarya tiplerinin özgül enerji ve enerji yoğunluğu [1]	2
Şekil 2.1	Pilin şarj edilmesi ve deşarj sırasında Li-ion taşınması [20].....	6
Şekil 2.2	Li-ion pil tasarımları: (a) silindirik, (b) kese ve (c) prizmatik hücreler [21]	7
Şekil 2.3	Kristal yapı: katmanlı, spinel ve olivin [22].....	8
Şekil 2.4	Serbest konvektif hava soğutma sistem şeması.....	13
Şekil 2.5	Doğrudan temaslı veya dolaylı temaslı sıvı soğutma.....	13
Şekil 2.6	FDM'ler için sıcaklık profili [38]	15
Şekil 2.7	FDM'lerin sınıflandırması [42]	16
Şekil 2.8	Farklı FDM grupları için erime sıcaklıkları [44].....	17
Şekil 2.9	Batarya sıcaklık-performans eğrisi [34]	18
Şekil 2.10	Araç hızına göre enerji tüketimi [58]	25
Şekil 3.1	Batarya modülü katı modeli	38
Şekil 3.2	Batarya modülünün üç boyutlu mesh yapısı	39
Şekil 3.3	Batarya model özellikleri	40
Şekil 4.1	FDM kullanılan ve kullanılmayan batarya sistemlerinin sıcaklık profilleri	44
Şekil 4.2	FDM'li/FDM'siz pilin termal tepki grafiği	45

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Farklı kaynaklara göre Li-ion ve diğer batarya türleri için önerilen optimal sıcaklık aralıkları	19
Tablo 2.2 Pillerin çalışma prensibinde sıcaklığın etkisi [47]	20
Tablo 2.3 Batarya tiplerine göre enerji ve güç yoğunlukları [22]	22
Tablo 2.4 Farklı paraffin türlerinin fiyat karşılaştırılması ve erime sıcaklıkları ...	29
Tablo 2.5 Rubitherm firmasına ait FDM türlerinin termofiziksel özellikleri ve maliyet karşılaştırması	30
Tablo 3.1 Modülde kullanılan malzeme özellikleri	41
Tablo 5.1 Farklı soğutma yöntemlerinin termal performanslarının karşılaştırılması [79]	47

Faz Değiştiren Malzemeler Kullanılarak Li-Ion Bataryaların Pasif Soğutulması

Merve SANDIKÇI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. şaban PUSAT

Gelişen teknolojiyle birlikte güçlü ve hafif elektronik cihazlara olan talebin artması, bu sistemlerin geliştirilmesi ve sürdürülmesini kritik bir öneme sahip hâle getirmiştir. Geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan Li-ion piller; yüksek çıkış gücü, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek gerilim gibi özellikler sunmaktadır. Ancak, bu pillerin yüksek çalışma sıcaklıkları, şarj/deşarj döngülerinin tekrarlanmasıyla birlikte kapasitelerinin hızla düşmesine ve toplam çıkış gücünün azalmasına neden olabilmektedir. Pil sistemlerinde karşılaşılan performans ve güvenlik problemlerinin çözümünde termal yönetim sistemleri önemli bir etkiye sahiptir. Li-ion pillerin termal yönetimi üç ana yöntemle sınıflandırılmaktadır: hava soğutma, sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme (FDM) ile soğutma. Mevcut literatürde hava ve sıvı soğutma sistemleri aktif termal yönetim sistemleri olarak sınıflandırılırken, FDM ile yapılan soğutma pasif bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Aktif termal yönetim sistemlerinin verimli olduğu kanıtlanmış olsa da, batarya yüzeyinden ısıyı dağıtmak için önemli ölçüde alan gerektirmektedir. Buna karşılık, pasif termal yönetim sistemleri mekanik bileşenler

ve ek güç gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Belirtilen parametreler doğrultusunda, bataryanın gerekli sıcaklık sınırları içerisinde verimli ve doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla uygun bir FDM seçilecektir. Analiz verileri ANSYS yazılımı kullanılarak sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, lityum-iyon batarya, batarya soğutma, pasif soğutma, termal yönetim.



Passive Cooling Of Li-Ion Batteries Using Phase Change Materials

Merve SANDIKÇI

Department of Mechanical Engineering
Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Şaban PUSAT

As the demand for powerful and lightweight electronic devices increases in tandem with advancing technology, the development and maintenance of suitable systems has become a matter of critical importance. Lithium-ion batteries, which are utilised in a wide range of applications requiring electricity, offer features such as high output power, high energy density, and high voltage. However, it should be noted that their high operating temperatures can lead to rapid capacity degradation and reduced total output power after repeated charge/discharge cycles. Thermal management systems have a significant impact on solving performance and safety issues encountered in battery systems. The thermal management of lithium-ion batteries can be categorised into three methods: air cooling, liquid cooling, and cooling with phase change material (PCM). In the extant literature, air and liquid cooling systems are classified as active thermal management systems, while PCM cooling is considered to be passive. Active thermal management systems have been shown to be efficient but require significant space to dissipate heat from the battery surface. Conversely, passive thermal management systems mitigate the necessity

for mechanical components and auxiliary power to operate. Within the specified parameters, a suitable PCM will be selected to ensure the battery operates within the required temperature limits efficiently and accurately. The analysis data will be provided using ANSYS software.

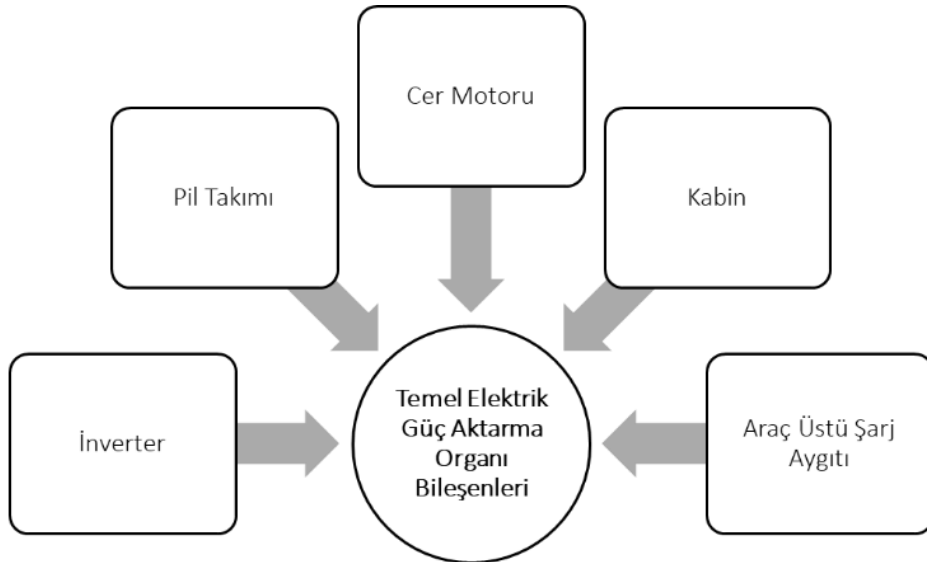
Keywords: Phase change materials, lithium-ion battery, battery cooling, passive cooling, thermal management.



1 GİRİŞ

Elektrikli araçlar, fosil kaynaklı enerjinin tükenme riski ve çevresel kaygılar nedeniyle günümüzde sürdürülebilir ulaşım çözümleri arasında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre çalışabilme potansiyeli, sıfır emisyon salımı, çevresel kirlilik yaratmaması ve yüksek enerji verimliliği gibi özellikleri sayesinde elektrikli araçlar, otomotiv endüstrisinde giderek artan bir öneme sahiptir.

Elektrikli araçlar; elektriksel, mekanik ve termal bakımdan birbirleriyle etkileşim hâlinde çalışan çok sayıda alt sistemden oluşan karmaşık yapılar barındırmaktadır. Bu alt sistemler hem aracın performansını hem de enerji verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Şekil 1.1’de tipik bir elektrikli aracın alt sistemleri ile bu sistemlere ait temel bileşenler şematik olarak gösterilmektedir.

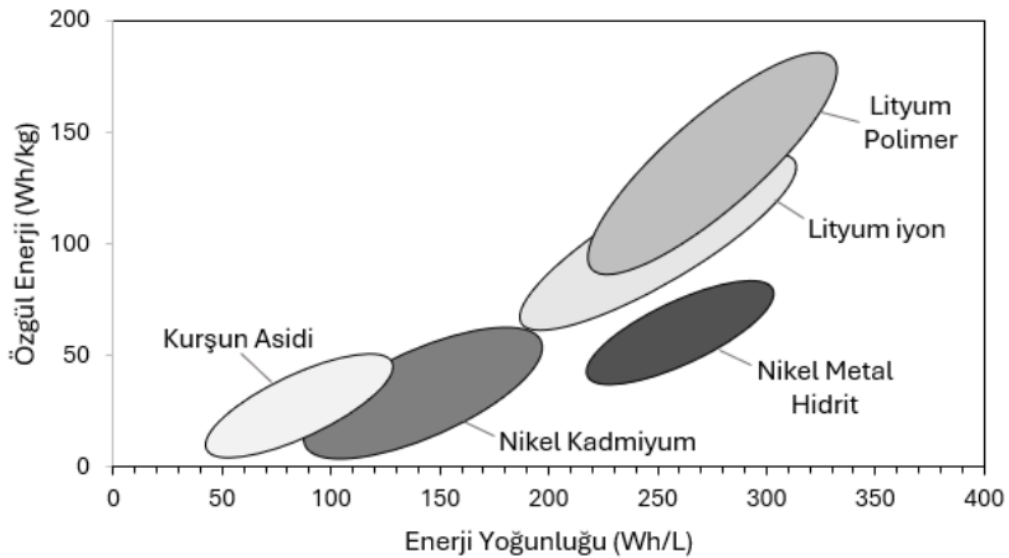


Şekil 1.1 Temel elektrikli aracın güç aktarma organı

Elektrikli araçlarda batarya, hareketi sağlayan elektrik motoruna güç veren taşınabilir bir enerji kaynağıdır. Bu enerji genellikle piller ya da yakıt hücreleri gibi sistemlerde kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilir. Araç sisteminin ihtiyaç duyduğu anda elektriksel olarak mekanik enerjiye çevrilen bu güç, alternatif bir taşınabilir enerji kaynağı olarak değerlendirilir.

Şekil 1.2'de, farklı batarya türlerinin Wh/kg ve Wh/L değerlerini karşılaştırmalı olarak gösteren bir grafik sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, özellikle NiMH ve Li-ion bataryaların diğerlerine kıyasla daha yüksek performans sergilediği görülmektedir. NiMH bataryalar, yüksek potansiyel enerji kapasitesine sahip olmalarına rağmen, üretim maliyetlerinin yüksek oluşu nedeniyle yaygın kullanım alanı sınırlı kalmaktadır.

Buna karşın, lityum-iyon bataryalar otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır, Bunun başlıca nedenleri arasında, Li-ion bataryaların NiMH teknolojisine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunmaları, daha hafif olmaları ve düşük kendiliğinden deşarj oranlarına sahip olmaları yer almaktadır. Ayrıca, Li-ion bataryaların daha kompakt yapıda olmaları ve hızlı şarj edilebilme yetenekleri, modern elektrikli araçların enerji gereksinimlerini karşılamada önemli avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 1.2 Farklı batarya tiplerinin özgül enerji ve enerji yoğunluğu [1]

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya tiplerinden lityum-iyon bataryalar, sıfır egzoz emisyonuna sahip olmaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrikle sarj

edilmeleri durumunda fosil yakıt talebini azaltmaları bakımından içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında avantajlı olmaktadır [2]. Pil sürüş menzili, maliyet, şarj altyapısı ve güvenilirlik dahil olmak üzere elektrikli araçların benimsenmesini engelleyen şartlar devam etmektedir [3]. Kullanıcılar, uzun mesafelerde seyahat ederken pil yangınlarından, şarj etmek için çok zaman harcamaktan ve yeterli şarj istasyonuna erişmekten endişe duymaktadırlar [4-5]. Elektrikli araçlar ve Li-ion teknolojilerinin sıfırın altındaki ve 45°C'nin üzerindeki sıcaklıklara olan duyarlılığı nedeniyle aşırı soğuk ve aşırı sıcak koşullarda tehlike arz etmektedirler.

Batarya termal yönetim sistemi (BTYS), pil hücrelerinin, modüllerinin ve paketlerinin güvenilirliğini korumak, hızlı şarj süreçlerini desteklemek ve yolcu güvenliğini sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler; aktif, pasif ya da her iki yöntemin birleşimi olan hibrit yapıda tasarlanabilmektedir [6-7]. Aktif BTYS, soğutucunun hücrelere doğrudan veya dolaylı olarak temas etmesiyle enerji tüketen, batarya grubundaki basınçlı hava konveksiyonu veya sıvı sirkülasyonunun avantajlarından yararlanmaktadır [8]. Cebri hava konveksiyonu basittir, bakımı kolaydır ve düşük maliyetlidir, ancak havanın zayıf termal iletkenliği ve termal kapasitesinin bir sonucu olarak verimliliği düşüktür ve bu nedenle aşırı koşullar altında batarya yığınının fazla ısıyı uzaklaştırmak için muhtemelen yetersiz olabilmektedir. Ayrıca, kabul edilebilir sınırların ötesinde düzensiz bir sıcaklık dağılımına da neden olabilmektedir. Hava soğutmaya kıyasla, sıvı soğutma daha yüksek ısı iletkenliği ve ısı kapasitesine sahip olması sayesinde daha verimli çalışmakta; gelişmiş termal performans ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. Ancak sıvı soğutma karmaşıktır, yer kaplar ve tüm sisteme ağırlık ve maliyet gibi dezavantaj oluşturmaktadır [9].

FDM, elektrikli araçlarda pasif soğutma yöntemi olarak sınıflandırılan ve lityum-iyon bataryaların soğutulmasında değerlendirilebilecek bir alternatiftir. Erime veya donma süreçlerinde, sabit sıcaklıkta yüksek miktarda gizli ısıyı absorbe edebilir ya da serbest bırakabilir. Bununla birlikte Li-ion pillerin sıcaklık düzenini koruyabilir ve maksimum pil sıcaklıklarını azaltabilmektedirler [10]. FDM'ler, silindirik veya dikdörtgen gibi çeşitli formlarda kapsüllenebilmektedir. Bu, FDM'lerin silindirik, kese veya prizmatik gibi çeşitli formlarda sahip pillere uyarlanabileceği anlamına gelmektedir. Ancak FDM'lerin tamamen faz değiştirmesi durumunda, lityum-iyon pillerin performansında belirgin bir düşüş gözlemlenebilmektedir. FDM'lerde ilave

ısı, duyulur ısı olarak emilmekte veya salınmaktadır ve bunun sonucunda FDM'de ve pil sıcaklığında problemler meydana gelebilmektedir [11].

Bu çalışma kapsamında, elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion pillerin soğutulması için pasif yöntem olan FDM'lerin kullanımı üzerinde çalışılmıştır. Farklı FDM'ler kullanılarak termal analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya soğutma için uygun FDM belirlenmesi hususunda değerlendirmeler yapılmıştır.



2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Li-Ion Bataryalar

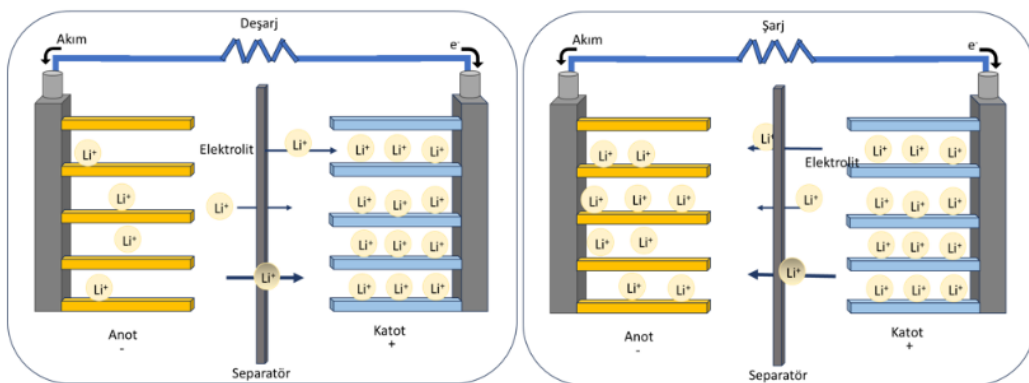
Çağımızda enerji krizleri ve çevre kirliliği gibi sorunlar, dünya genelinde artan bir hassasiyetle ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, lityum-iyon piller, geri dönüştürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Li-ion piller kablosuz, birbirine bağlı ve fosil yakıtsız bir toplumun temelini atarak günlük yaşamlarımızda devrim yaratmıştır. 1817'de Anfwedson ve Berzelius'un petaliti ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) analiz ederek lityumu keşfetmesiyle başlamıştır. 1960'ların sonlarına kadar sulu olmayan 3V Li-ion piller piyasada mevcut bulunmamaktadır [12]. Yüksek çıkış voltajı, yüksek güç yoğunluğu, yüksek enerji yoğunluğu ve iyi çevrim performansı gibi avantajlara sahip olan Li-ion piller ilk olarak 1991 yılında Sony şirketi tarafından ticarileştirilmiştir [13]. Li-ion pil uygulamaları artık cep telefonlarından dizüstü bilgisayarlara, elektrikli bisikletlerden elektrikli araçlara kadar hayatımızın çeşitli alanlarına yayılmıştır. Katot, anot, ayırıcı ve elektrolitten oluşan Li-ion pillerde, özellikle katot aktif malzemesi pilin hem performansını hem de maliyetini büyük ölçüde etkilemektedir.

Yüksek enerji yoğunluğu ve güçlü performans özellikleri sayesinde, Li-ion bataryalar elektrikli araçlar için ideal bir batarya çözümü olarak öne çıkmaktadır. Yüksek enerji ve güç yoğunlukları, hafif yapıları ve kompakt boyutları sayesinde diğer şarj edilebilir pil türlerine kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadırlar [14]. Ancak, Li-ion piller hem şarj hem de deşarj süreçlerinde ısı açığa çıkarmaktadır. Optimum pil performansı, güvenilirlik ve güvenlik için bu ısının etkin bir biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. Li-ion bataryalardaki ısı kaynakları ise entropik ve dirençli olmak üzere iki ana kategori altında sınıflandırılabilir. Entropik ısıtma, Li-ion pillerdeki interkalasyon ve deinterkalasyon süreçlerinde elektrot yapısında

meydana gelen düzen değişikliklerinden kaynaklanır ve bu durum, akım ile pilin iç sıcaklığı arasında bir bağ oluşturur [15]. Sarj durumu, sarj ve deşarj oranı, elektrot nano yapısı ve sıcaklık gibi birçok faktör Li-ion bataryaların içinde üretilen ısı miktarını etkilemektedirler [16]. Şarj durumu, genellikle pilin nominal kapasitesine göre yüzde cinsinden ifade edilen mevcut enerji çıkışı olarak tanımlanmaktadır [17]. Deşarjın sonlarına doğru ve şarj durumu azaldıkça, iç hücre direnci yaklaşık %75 oranında artmakta ve bu durum üretilen ısıda orantılı bir yükselişe yol açmaktadır [18]. Sarj ve deşarj oranı, bir pilin sarj edilme veya deşarj olma hızını ölçer ve daha hızlı sarj ve deşarj pil yeteneklerini göstermektedir [18].

Li-ion piller, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, dijital kameralar ve elektrikli aletler gibi yaygın kişisel elektronik cihazlarda enerji kaynağı olarak sıkça kullanılmaktadır [18]. Otomotiv sektöründe elektrikli araçlara geçişin hız kazanmasıyla birlikte, Li-ion pillere yönelik talep önemli ölçüde artmıştır. Elektrikli araçlardaki küresel Li-ion pil talebinin 2030 yılına kadar ABD, Avrupa ve Çin'de sırasıyla %77,78, %89,23 ve %92,57 oranlarında artması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, küresel Li-ion pil pazarının 2026 yılına kadar %55,55 oranında büyüme göstermesi beklenmektedir [19].

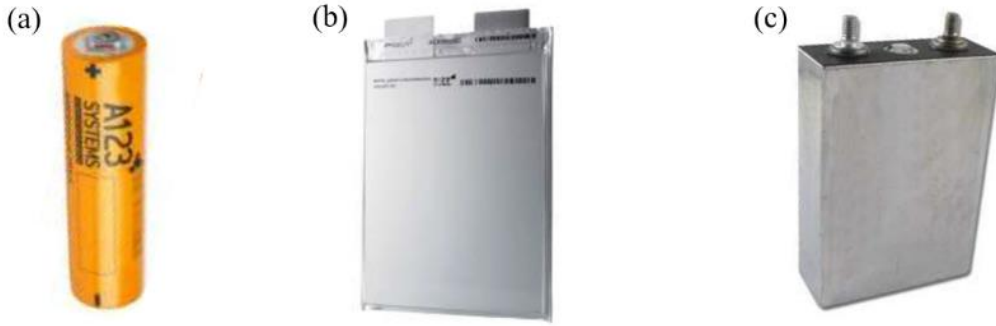
Bir pil, pozitif ve negatif elektrotlar, Li-ion difüzyonunu sağlayan elektrolit, elektrotları birbirinden ayıran bir ayırıcı ve akım toplayıcısından oluşmaktadır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, şarj sırasında elektronlar anoda doğru hareket ederken, Li-ionlar ayırıcıdan geçerek anotta birikir. Deşarj süreci ise bu hareketlerin tersine gerçekleşir.



Şekil 2.1 Pilin şarj edilmesi ve deşarj sırasında Li-ion taşınması [20]

Li-ion piller, Silindirik, prizmatik ve kese hücreleri gibi farklı geometrik yapılarda bulunabilmektedir. LIB hücreleri, Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, Li-ion piller

madeni para, silindirik, kese ve prizmatik gibi farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Her ne kadar konfigürasyon ve üretim süreçleri çeşitlilik gösterse de tüm bu piller anot, katot, ayırıcı, elektrolit ve pil muhafazası bileşenlerine sahiptir. Silindirik ve prizmatik hücreler genellikle tek katmanlı anot, katot ve ayırıcılardan oluşurken, kese hücreleri önceden kesilmiş elektrot ve ayırıcı tabakalarının üst üste yerleştirilmesiyle hazırlanır. Silindirik hücrelerin üretimi, bu tabakaların silindirik forma sarılmasıyla gerçekleşirken, prizmatik hücreler haddeleme ve presleme ile şekillendirilir; kese hücreler ise bileşenlerin istiflenmesiyle oluşturulur. Üç hücre tipinde de elektrotların birleştirilmesi tırnak kaynağı yöntemiyle yapılır. Kese hücrelerin muhafazası, polimer-alüminyum folyo kullanılması nedeniyle silindirik ve prizmatik hücrelerin alüminyum plaka muhafazalarından farklıdır. Ayrıca, elektrolit doldurma sırasında vakumlama işlemi gerektiği için kese hücreler ekstra özen ve bakım gerektirmektedir [20].



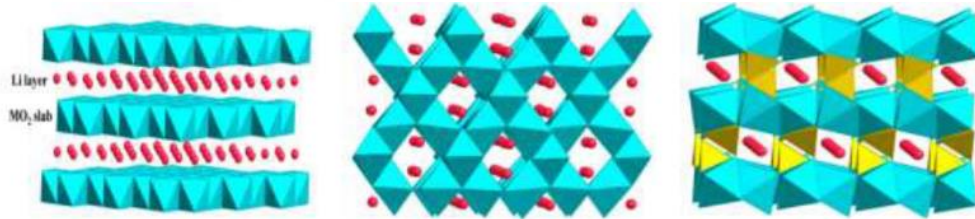
Şekil 2.2 Farklı Li-ion pil tasarımları: (a) silindirik, (b) kese ve (c) prizmatik hücreler [21]

Silindirik hücreler büyük ölçüde dizüstü bilgisayar pilleri ve Tesla elektrikli araç modellerinin çekiş pilleri olarak kullanılmaktadır. Silindirik pillerin başlıca avantajları yüksek üretim tutarlılığı, dayanıklı yapılar ve düşük maliyetler iken, dezavantajı ise silindirler arasındaki boşluk nedeniyle hacimsel enerji yoğunluğunun sınırlı olmasıdır. Modül ve paket seviyesindeki silindirik hücrelerde, tek bir hücrenin arızalanması durumunda tüm modülün değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bir hücrenin bozulması veya aşırı ısınması; kısa devre ve termal kaçak gibi sorunlara yol açarak tüm batarya sisteminin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, kullanım sürecinde tüm hücrelerin etkin bir şekilde izlenmesi ve yönetilmesi zorunludur. Yüksek enerji yoğunluğu ve düşük maliyetli paketlenme özellikleriyle kese hücreler, cep telefonlarında yaygın bir

şekilde tercih edilmektedir. Polimer malzemelerin ambalajda kullanılması, bu pillerin diğer türlere kıyasla daha hafif olmasına olanak tanımaktadır. Kесе piller, büyük boyutlarda üretilebilme özelliği sayesinde maliyet açısından avantajlı bir pil paketleme türü olarak kabul edilmektedir. Ancak, kесе hücrelerinin dezavantajı, muhafazalarının kırılğan yapıda olmasıdır; bu nedenle titreşim, ezilme ve bükülme gibi mekanik streslere maruz kalmaları engellenmelidir. Prizmatik hücreler ise, elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan pil tipi olarak öne çıkmaktadır. Dayanıklı kasaları ve yüksek enerji yoğunlukları, bu hücreleri piyasada tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir. Kullanılan katot ve anot malzemelerine bağlı olarak farklı Li-ion pil türleri geliştirilmiş olup, bu piller performans, maliyet ve güvenlik açısından çeşitli özellikler sergilemektedir.

2.1.1 Katot Malzemesi

Katot malzemesine göre farklı lityum iyon pil LIB türleri malzemenin kristal yapısına göre kategorize edilebilir. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, bunlar katmanlı bileşikler LiMO_2 , spinel bileşikler LiM_2O_4 ve olivin bileşikler LiMPO_4 olarak sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda, Li_2MSiO_4 silikatları, LiMBO_3 boratları ve LiMPO_4F tavoritleri gibi yeni yapıdaki aralıklama bileşikleri ilgi çekmektedir.



Şekil 2.3 Kristal yapı: katmanlı, spinel ve olivin [22]

Katmanlı bileşikler LiMO_2 yapısında, geçiş metal aralama oksitleri MO_2 ve lityum katmanları alternatif olarak üst üste dizilmiştir. Bu kategoriye dahil olan en yaygın Li-ion adayları aşağıda listelenmiştir [22-23]:

LiCoO_2 , LCO pilleri taşınabilir uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, malzemenin toksik yapısı, yüksek maliyeti ve yapısal kararsızlığı çeşitli güvenlik problemlerine yol açmaktadır. LCO pillerin teorik kapasitesi 160 mAh/g olmasına rağmen, pratikte yalnızca yaklaşık 140 mAh/g kapasite sunabilmektedir. Bu sebeple, HEV ve EV uygulamaları için ideal bir seçenek olmamaktadır.

Lityum nikel kobalt alüminyum oksit ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$, NCA), lityum kobalt oksit (LCO) malzemesinin termal stabilitesini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu yapıda, nikel kobaltın bir kısmını daha uygun maliyet avantajıyla ikame etmektedir. Ayrıca, alüminyum doping işlemi katot bölgesindeki şarj transfer empedansını stabilize ederek elektrolitin kararlılığını iyileştirmektedir. NCA'nın özgül kapasitesi yaklaşık 200 mAh/g civarında olup, döngü ömrü ise nispeten sınırlıdır.

Lityum nikel mangan kobalt oksit ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$, NMC) ise yaklaşık 180 mAh/g özgül kapasite sunar. Mangan içeriği, NMC'yi diğer katmanlı bileşiklere kıyasla daha ekonomik bir seçenek haline getirmektedir. Bu özellikleri doğrultusunda NMC teknolojisi, özellikle batarya elektrikli araçlar (BEV) için tercih edilen bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Spinel yapısına sahip bileşiklerde (LiM_2O_4), lityum iyonları geçiş metal katmanlarındaki tetrahedral konumları işgal etmektedir. Spinel yapıya sahip lityum mangan oksit (LiMn_2O_4 , LMO), yüksek çalışma voltajı (3,5–4,5 V), düşük maliyeti ve çevre dostu özellikleriyle umut vadeden bir katot malzemesi olarak dikkat çekmektedir. Nissan Leaf ve Chevrolet Volt gibi modern elektrikli araçlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Olivin yapısına sahip LiMPO_4 bileşikleri, katmanlı ve spinel yapılarla karşılaştırıldığında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu grup içinde, önceki katot malzemelerinin sınırlamalarını aşmayı amaçlayan lityum demir fosfat (LiFePO_4 , LFP) özellikle dikkat çekmektedir. LFP, üstün termal kararlılık, uzun döngü ömrü, düşük maliyet ve düşük toksisite gibi avantajlar sunarken, nispeten düşük çalışma voltajı (3,3 V) ve enerji yoğunluğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

2.1.2 Anot Malzemesi

Daha önce belirtildiği üzere, deşarj sürecinde Li iyonları anota interkale olmaktadır. En yaygın kullanılan anot malzemeleri aşağıda sıralanmıştır:

Grafit, yüksek özgül kapasitesi (372 mAh/g) nedeniyle en uygun anot malzemesi olarak değerlendirilmektedir [24]. Ancak, grafit bazlı anotlar düşük sıcaklıklarda zayıf performans sergilemekte ve üzerinde pasif bir SEI tabakasının oluşması gibi bazı sınırlamalara sahiptir [25]. Bir SEI tabakası, grafitteki lityum interkalasyon reaksiyonunun, organik çözücülerde çözülmüş LiPF_6 'tan oluşan organik elektrolitte o kadar düşük bir potansiyelde gerçekleşmesi nedeniyle oluşur [26]. Bu

tabaka, grafit elektroduyunun elektrolit parçalanmasına karşı daha az reaktif olmasını sağlar ve pilin şarjı sırasında elektroliti tüketen reaksiyonlar kısmen devam eder. Grafit anotun dezavantajlarından biri, düşük lityum yerleşme (interkalasyon) potansiyeline sahip olması nedeniyle elektrot yüzeyinde metalik lityum birikimine yol açabilmesidir. Bu geri dönüşümsüz reaksiyon, özellikle düşük sıcaklıklarda veya aşırı yüksek şarj hızlarında şarj sırasında ortaya çıkar. Yüksek reaktiviteye sahip metalik lityum, elektrolitin tüketilmesine yol açmakta ve dendrit oluşumuyla pilin iç kısa devre yapmasına sebep olabilmektedir.

LTO [27-28] yüksek lityum interkale potansiyeline (yaklaşık 1.55 V karşısında Li/Li+) sahip olduğundan, daha istikrarlı bir elektrolit ve metalik lityum oluşumu termodinamik olarak daha az tercih edilen bir ekleme malzemesidir. LTO'nun lityum interkale/de-interkale sırasında çok küçük boyut değişiklikleri olduğu için pil döngüsü sırasında mekanik stres düşüktür. SEI tabakası oluşmadığı ve boyut değişikliklerinin düşük olduğu için, LTO anotlu piller uzun döngü ömrü gösterir. Özgül kapasite yalnızca 175 mAh/g seviyesinde olup, bu durum pillerin enerji yoğunluğunu sınırlamaktadır. Yüksek anot potansiyeline bağlı olarak, LTO anotlu pillerin çalışma voltajları düşük olup, kurşun-asit pillerle benzerlik göstermektedir. Ayrıca, LTO'nun spinel yapısı, yüzey alanının karbon bazlı elektrotlara kıyasla genellikle çok daha geniş olmasını mümkün kılmaktadır [29]. Daha büyük yüzey alanı, elektrik yüklerini daha hızlı taşımaya olanak tanır. Bu nedenle, LTO yüksek akım hızlarından zarar görmez. Son dönemde, Toshiba, EIG Batteries ve Altairnano gibi firmalar, bu teknolojinin ticarileştirilmesi üzerine yoğunlaşarak çalışmalarını hızlandırmıştır.

2.1.3 Elektrolit Katot Malzemesi

LIB'de Li iyonları elektrotlar arasında elektrolit aracılığıyla göç eder. Elektrolitin sağlaması gereken başlıca gereklilikler arasında yüksek iyonik iletkenlik (10^{-3} S/cm'den fazla [25]), katı elektrolit arayüzü (SEI) tabakasının stabil evrimi ve üstün termal ile elektriksel kararlılık yer almaktadır [26]. Sıvı elektrolitlerde genellikle LiPF₆, LiBF₄, LiSO₃ CF₃ ve (LiC(SO₂ CF₃)₃)₃ gibi tuzlar kullanılmaktadır [26]. Yüksek iyonik iletkenlik özelliği nedeniyle LiPF₆, en yaygın tercih edilen tuz olup, genellikle karbonat bazlı aprotik çözücüler olan PC, etilen karbonat (EC), dietil karbonat (DEC), etil metil karbonat (EMC) ve dimetilen karbonat (DMC) içinde çözülür.

2.2 Batarya Termal Yönetim Sistemi

BTYS, ısı transfer ortamındaki farklılıklara bağlı olarak Li-ion pil termal yönetimini üç ana kategoriye ayırmaktadır: FDM ile soğutma, hava ile soğutma ve sıvı ile soğutma [30]. FDM ile soğutma, pasif termal yönetim sistemi olarak sınıflandırılırken, hava ve sıvı ile soğutma yöntemleri aktif termal yönetim sistemleri kapsamında değerlendirilmektedir. Paket sıcaklıklarını optimum aralıkta tutabilen BTYS, hücre, paket ve araç güvenliği açısından önemlidir [31]. Literatürde, büyük pil paketlerindeki yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık dalgalanmalarının olumsuz etkilerini minimize etmeye yönelik pasif ve aktif BTYS modelleri geliştirilmiştir.

Mohammadian ve Zhang [32], paket sıcaklığı homojenliğini artırmak için, 15 Ah kapasiteli sekiz prizmatik hücreden oluşan hava soğutmalı bir pil paketi üzerine basınca bağlı ikinci dereceden bir model geliştirmiştir. Çalışmanın hedefi, metal ve metal olmayan köpüklerin geçici etkilerini değerlendirmektir. Önerilen soğutma sistemi, hava akışını yönlendiren bir kanal ile bir ısı emicisinden meydana gelmektedir. Isı emici girişinin %60'ına seramik köpük ve soğutucu girişinin %40'ına alüminyum köpük uygulandığında hava akışı kanalı sayesinde sıcaklık homojenliği yaklaşık %61 oranında iyileştirildiği ve toplam paket sıcaklığının azaldığı görülmüştür.

Liang ve diğerleri [33], ısı borusu su soğutmalı BTYS'nin etkilerini değerlendirmek amacıyla seri bağlı bir modül içindeki her 6Ah Lityum demir fosfat hücresi için birden fazla elektrokimyasal bağlı termal modeli oluşturmuşlardır. Isı transfer modeli ile akış modelinin ayrıştırılması yoluyla hesaplama süresi azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar, soğutucu sıcaklığının yükselmesiyle paket içi sıcaklık dağılımının önemli ölçüde homojenleştiğini ortaya koymuştur. 5°C'lik bir deşarj oranında, soğutucu sıcaklığı sürekli olarak 10°C düştükçe tüm modülün voltajı ve kapasitesi de benzer şekilde azaldığı görülmüştür.

Gan ve ark. [34], 18650 silindirik hücre içeren bir paketin termal Elektrokimyasal ve eşdeğer devre modellerini oluşturmuştur. Modelde, ısı borusunun ısıl direnci değerleri çalışma sıcaklığına bağlı olarak değiştirilmiş ve tüm hücreler ısı borularına alüminyum bazlı iletken elemanlarla bağlanmıştır. Modelin etkinliğini belirlemek için soğutucu akış hızının, giriş soğutucu sıcaklığının ve tahliye oranı

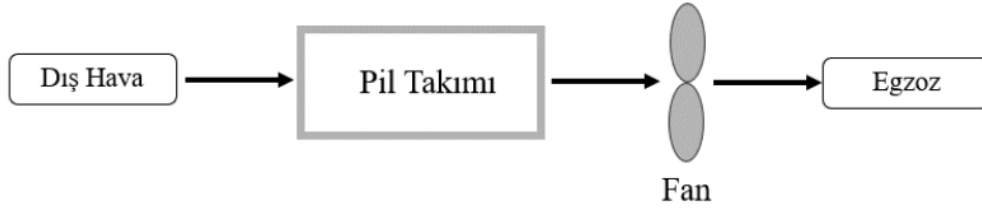
yapılan deneyler ile test edilmiştir. Deneyler sonucunda hücre sıcaklığı, doğal konveksiyon soğutmasıyla karşılaştırıldığında 14°C'lik bir düşüş olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang ve diğerleri. [35], giriş suyunun hızını ve sıcaklığını değiştirerek Li-ion prizmatik hücrelerden oluşan bir 6s4p paketi için soğuk plaka soğutma kanallarının etkilerini analiz etmek için çok ölçekli, çok alanlı bir metodoloji uygulamıştır. 5°C deşarj hızında, girişteki su hızı 0,1 m/s'den 2 m/s'ye çıktıkça paketin maksimum sıcaklığı 40°C'nin altına düşerken, hücreler arası sıcaklık farkının da arttığını belirtmiştir. Ayrıca giriş suyu sıcaklığının düşmesi durumunda paketin 15°C-35°C aralığında çalışabildiği ancak maksimum sıcaklık farkının arttığı sonucuna varmışlardır.

Basu ve ark. [36], Nikelkobalt- alüminyum oksit silindirik hücreleri için yeni bir sıvı soğutmalı BTYS'yi değerlendirmişlerdir. Modelde, temas direnci, deşarj hızı ve sıvı akış hızının pil paketi içerisindeki sıcaklık dağılımına etkileri incelenmiştir. Önerilen soğutma sistemi, paket içerisindeki her hücreyi birbirine bağlayan alüminyum iletken elemanlar ile su soğutucunun akışını sağlayan alüminyum kanallardan oluşmaktadır. Sistemin, yüksek deşarj oranları ve düşük su akış hızlarında çalışırken paketin maksimum sıcaklık artışını 7°C civarında tuttuğu tespit edilmiştir.

2.2.1 Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemi

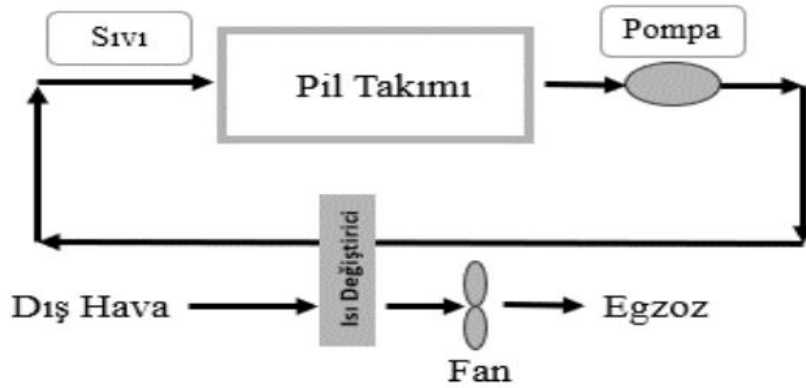
Hava ile soğutmalı sistemlerde ortamdaki hava, pil takımının iç kanalına girmektedir. Akünün yüzeyinde oluşan ısı, hava ile konvektif ısı transferi yoluyla dışarı atılarak soğutma sağlanır. Hava akışına bağlı olarak, serbest konvektif ve zorlamalı konvektif hava soğutması olmak üzere iki ana kategori vardır. Serbest konvektif hava soğutması, aracın hareketiyle oluşan doğal konveksiyonla gerçekleşirken, zorlamalı konvektif hava soğutması ise hava akışını sağlayan fan desteğiyle sağlanır. Hava kanalı tasarımında maliyetler yüksek olmakla birlikte, akış alanındaki düzensizlikler nedeniyle hücrelerin sıcaklık homojenliği yeterince optimal düzeyde değildir. Serbest konvektif hava soğutma sistemine ait şematik gösterim Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2.4 Serbest konvektif hava soğutma sistem şeması

2.2.2 Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemi

Bir batarya grubunda dolaşan ısı transfer ortamının sıvı olması, sıvının ısı transfer katsayısının çoğunlukla havadan büyük olması ve daha ince bir sıvı sınır tabakasının olması, ısı iletkenliğini havaya göre daha yüksek hale getirmektedir. Bu bağlamda, sıvı doğrudan batarya yüzeyi ile temas ettirilir. Sıvı soğutma yöntemleri ise doğrudan temaslı ve dolaylı temaslı olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Doğrudan temaslı soğutmada ısı transfer ortamı olarak yalıtkan mineral yağ kullanılırken, dolaylı temaslı soğutmada genellikle su ve etilen glikol tercih edilmektedir. Dolaylı temaslı soğutma sistemlerinde, sıvı boru hattının yüksek sızdırmazlık performansına sahip olması ve etkin sıcaklık kontrolü sağlamak amacıyla boru hattının yönlendirilmesinin uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, dolaylı temaslı sıvı soğutma uygulamaları, akü kutusu tasarımı ve işlenmesini zorunlu kılmaktadır. Doğrudan temas tipi sıvı soğutmada yüksek viskoz mineral yağ kullanılmakta ve bunun sonucunda çalışma için daha büyük bir pompa gücüne ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.5 Doğrudan temaslı veya dolaylı temaslı sıvı soğutma

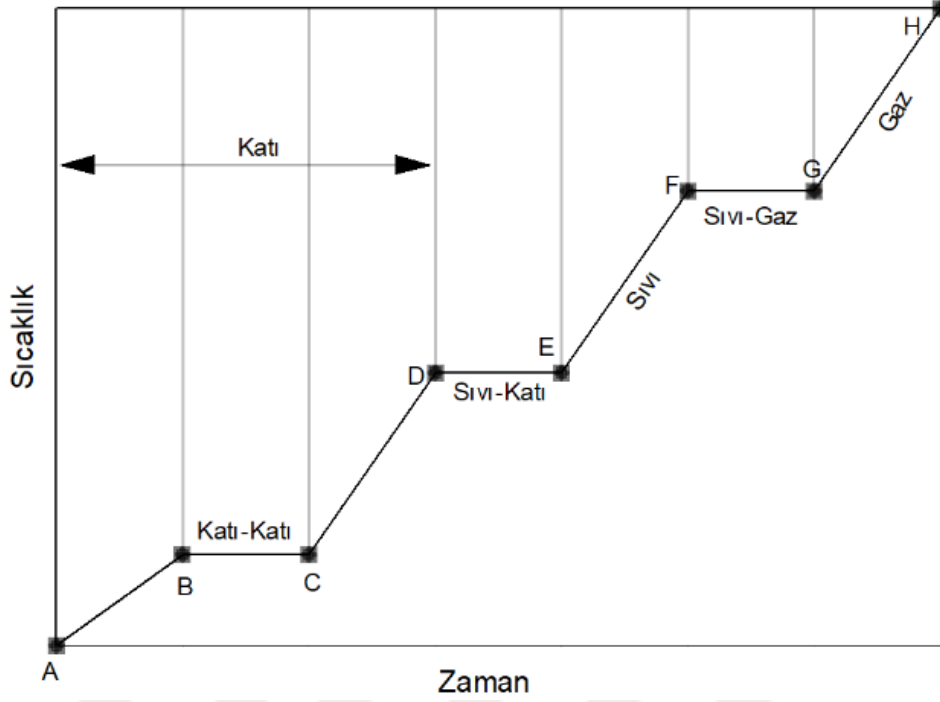
Sıvı soğutmalı ve hava soğutmalı sistemler kompleks geniş yer kaplamaktadır ve çalıştırmak için ek mekanik güce ihtiyaç olmaktadır.

2.2.3 Faz Değiştiren Malzeme ile Batarya Termal Yönetim Sistemi

FDM, sıcaklık nispeten sabit kaldığında, maddelerin faz değişimi süreçleri aracılığıyla ısı emilimi veya salınımına dayanır. Gizli ısı ya da erime entalpisi, belirli bir malzeme kütesinin faz dönüşümü sırasında ihtiyaç duyduğu termal enerjiyi ifade eder ve genellikle J/g birimiyle ölçülür. Gizli ısı depolama malzemeleri, katı-katı, katı-sıvı veya sıvı-gaz gibi farklı faz değişim süreçlerini kapsayabilir.

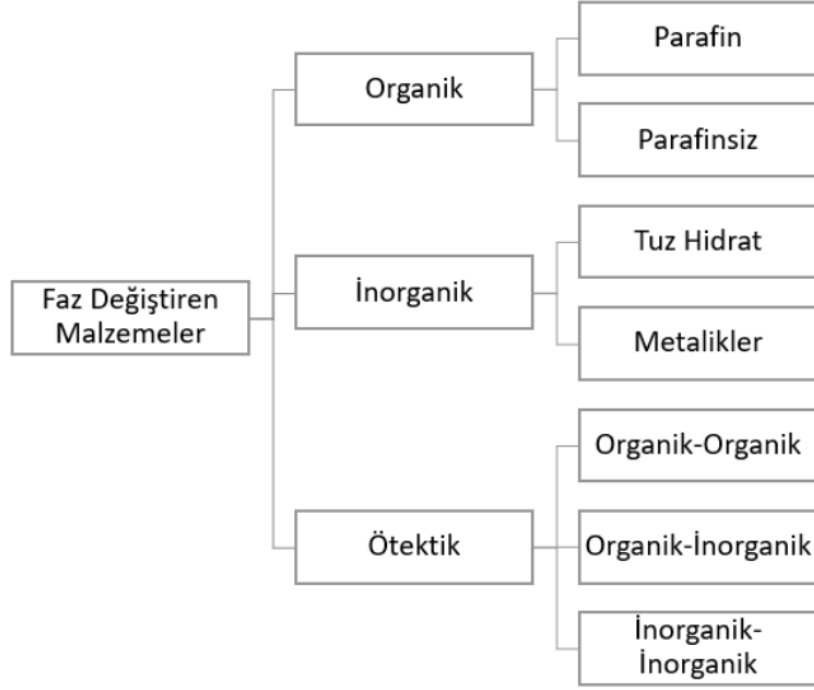
FDM soğutmalı termal yönetim sistemi, pilin ısınısını faz değiştirme işlemiyle FDM'nin gizli ısıyla absorbe etmek ve pil sıcaklığının çok hızlı yükselmesini önlemektedir. FDM'ler enerji torajı yutucuları olarak hareket edebilirler [37]. Monomerler arasındaki sıcaklık farkını azaltarak soğuk ortamda enerjinin depolanmasına yardımcı olur, aynı zamanda enerjiyi aküye ileterek ısı yalıtım etkisi sağlar ve ortam soğukken pil performansını artırmaktadır. Enerji tasarrufuna ilişkin bakış açısıyla, Li-ion pilin FDM tabanlı termal yönetim sistemi, daha iyi soğutma etkisi ve termal yalıtım etkisi sağlamaktadır. Pilin pasif termal yönetimi, ticari kimyasal pillerde akımın termal stabilitesini koruyarak maliyetli yeni ürün geliştirme ihtiyacını azaltabildiğini göstermektedir.

BTYS, pil içindeki sıcaklık artışını minimize ederek malzeme bozulmalarını önlemek amacıyla ısı transferi prensiplerine dayanır. Aktif termal yönetim sistemleri, ısıyı pil yüzeyinden etkili şekilde uzaklaştırmakla birlikte, genellikle büyük hacim kaplar. Buna karşın, FDM tabanlı pasif termal yönetim sistemleri, mekanik bileşen ihtiyacını azaltarak ek güç gereksinimi olmadan daha kompakt bir çözüm sunar. Pilin hacmi başına gizli ısı ve pil yüzeyinden havanın taşınımı yoluyla ısıyı etkili bir şekilde uzaklaştırma yeteneği sağlayan FDM'lerin kullanılması Li-ion pillerin sıcaklık kontrolü açısından yeni bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 2.6 FDM'ler için sıcaklık profili [38]

FDM'ler inorganik bileşikler, organik kompleksler veya ötektik kompleksler olarak kullanılabilir [39]. Sıcaklık FDM'lerin faz değişim sıcaklığına yükseldiğinde malzemenin başka bir faza geçirilmesinden yararlanılarak termal enerji emilir, buna göre sabit bir sıcaklık koşulu altında sıcaklık (Şekil 2.6) nispeten sabit bir aralıkta tutulmalıdır. İnorganik FDM'ler, özellikle tuz hidratlar, yüksek füzyon entalpi ve üstün termal iletkenlik özellikleriyle dikkat çeker; ancak, sınırlı erime/donma döngüsü sayısı, aşındırıcı yapısı, elektriksel iletkenlik göstermesi ve aşırı soğuma (supercooling) riskleri önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır. Organik olan FDM'ler (parafin mumları gibi), proseste ciddi bir bozulma olmadan 1000'den fazla erime/donma döngüsünü kolayca gerçekleştirmek amacıyla batarya sistemleri için daha uygundur. Mevcut ticari piller için uygulanan boşaltma/şarj döngülerinin önemli talebi açısından parafin mumları faydalı olarak değerlendirilmiştir [40]. FDM'lerin makul güç ve faydalarını gösterdiği ve mevcut Li-ion pillerle yüksek deşarj oranı sırasında pilin çekirdeğindeki sıcaklık artışını azaltabildiği gösterilmiştir [41]. FDM'lerin geniş bir sıcaklık aralığında bulunmasına karşın organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç farklı gruba gruba ayrılabilir. Şekil 2.7'de bulunan FDM'nin ana sınıflandırma kategorileri Sharma ve diğerleri tarafından sağlanmıştır [42].

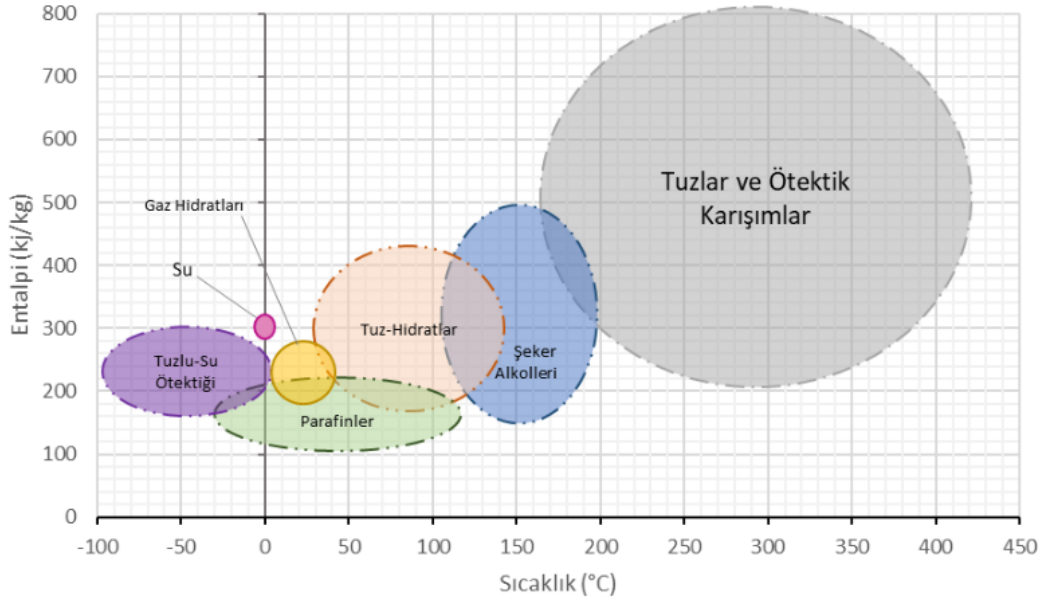


Şekil 2.7 FDM'lerin sınıflandırması [42]

Literatürde en yaygın FDM türü parafin, yağ asitleri ve polietilen glikol gibi organik FDM'lerdir. Kullanılabilirliği, karşılanabilirliği ve fizibilitesinin bir sonucu olarak parafin, termal yönetim uygulamalarında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yüksek gizli ısı kapasiteleri sayesinde, organik FDM'ler küçük kütlelerde büyük enerji depolama olanağı sunar. Geniş malzeme çeşitliliği ile bozulmaya karşı dirençli olup, performans kaybı olmadan çoklu döngülerde tutarlı tekrarlanabilirlik sergilerler. Ayrıca, yüksek fiziksel ve kimyasal stabiliteye sahiptirler. Ancak, düşük ısı iletkenliği nedeniyle termal etkinlikleri sınırlanabilir.

İnorganik FDM'ler tuz hidratlardan ve metalik bileşiklerden oluşur. Yüksek erime sıcaklıkları gerektiren uygulamalarda, tekrarlanan çevrimler boyunca termal stabiliteleri nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar. İnorganik maddelerden yapılmış FDM'ler, organik maddelerden yapılmış FDM'lere göre daha yüksek ısı iletkenliğine sahiptir ve bunların faz değişimleri, organik maddelerden yapılmış olanlardan daha hızlı gerçekleşir. İnorganikler, karıştırma veya kimyasal ekleme gerektiren geri dönüşü olmayan faz değişimleri nedeniyle kısıtlanır. Ayrıca çevreye maruz kaldıklarında veya mahfazanın malzemesi ile etkileşime girdiklerinde korozyona uğrayabilmektedir [43].

Ötektik bileşikler, organik, inorganik ya da her ikisinin karışımından oluşan ve tek bir erime noktasına sahip iki veya daha fazla FDM türünden meydana gelir. Bu FDM'ler, bileşenlerin ağırlık oranları değiştirilerek erime sıcaklığının ayarlanabilmesi gibi bir avantaja sahiptir. Katılma ve erime süreçleri, faz ayrımı ya da aşırı soğuma olmadan gerçekleşir. Şekil 2.8, farklı FDM gruplarının erime sıcaklığı ve entalpi aralıklarını sunmaktadır [44].



Şekil 2.8 Farklı FDM grupları için erime sıcaklıkları [44]

2.3 Li-Ion Bataryaların Performans Parametreleri

Batarya performansı ve maliyeti, batarya ve hibrit elektrikli araçların geliştirilmesinde dikkate alınması gereken temel unsurlardır. Batarya performansı, elektrikli ve hibrit araçların enerji verimliliğini, menzilini, güvenliğini ve ekonomik sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen temel bir göstergedir. Bu nedenle, Li-ion bataryaların performansını belirleyen parametrelerin anlaşılması, batarya teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygun termal yönetim sistemlerinin tasarlanması açısından kritik öneme sahiptir [45]. Bu doğrultuda, sonraki bölümlerde incelenen batarya cihazının güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymak amacıyla kritik öneme sahip faktörler ayrıntılı biçimde ele alınmış ve açıklanmıştır.

2.3.1 Amper-Saat (Ah) Kapasitesi

Ah kapasitesi, belirli çalışma koşulları altında tam şarj edilmiş bir bataryadan deşarj edilebilecek toplam elektrik yükünü ifade etmektedir. Özellikle, dereceli Ah

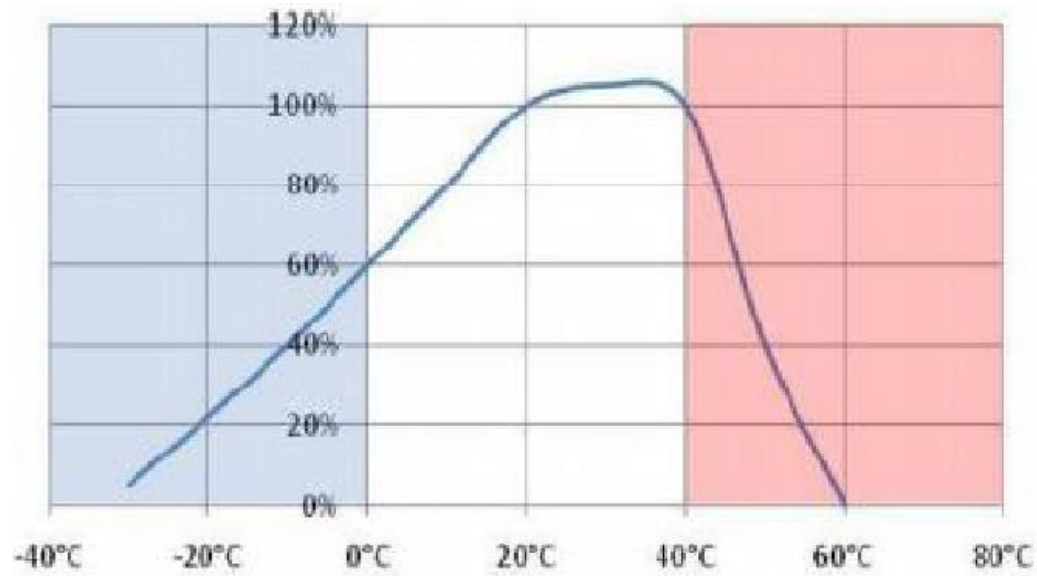
kapasitesi, üretici tarafından önceden belirlenen koşullar altında tamamen şarj edilmiş yeni bir bataryanın nominal kapasitesidir; tipik bir nominal koşul, örneğin, 20 °C sıcaklıkta ve 1/20 C-deşarj oranında tanımlanabilir [46]. Batarya kapasitesinin ifadesinde Wh birimi kullanılır; bu değer, Ah kapasitesinin hücre voltajı ile çarpımı sonucu elde edilir. Teorik kapasite ise, aktif malzeme miktarına bağlı olarak elektrokimyasal reaksiyon sırasında açığa çıkan toplam elektrik miktarını ifade eder [47].

2.3.2 Sıcaklık Etkisi

Li-ion hücrelerin performansı, sıcaklığa ve çalışma gerilim (voltaj) değerlerine bağlıdır. Li-ion hücreler, voltaj ve sıcaklığın limit (minimum ve maksimum) değerlerinde güvenli bir şekilde çalışmaktadır. Aksi takdirde, hücrelerde hasar meydana gelmekte ve geri dönüşü olmamaktadır.

Aşırı voltaj durumlarında, şarj voltajı dayanılabilir hücre voltajını (maksimum değeri) aştığında aşırı elektrik akımlarına neden olur ve sonunda bu durum elektrot malzemelerin bozulmasına sebep olarak elektrotlar arasında kısa devreye neden olabilmektedir.

Aşırı voltajda olduğu gibi, düşük voltaj da elektrot malzemelerinin bozulmasına neden olan sorunları beraberinde getirmektedir. Bu sorunlar bataryada kısa devreye ve/veya kapasite kayıplarına neden olmaktadır. Sıcaklığın batarya performansına olan etkisinin ne derece önemli olduğu Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Batarya sıcaklık-performans eğrisi [34]

Bataryaların verimliliği, dayanıklılığı, güvenilirliği ve maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olan faktörlerden biri, çalışma sıcaklığıdır. Li-ion bataryaların en uygun çalışma sıcaklığı, genellikle 15°C ile 40°C arasında olduğu bulunmuştur [9]. Pesaran [48], kurşun-asit, NiMH ve Li-ion pillerin çalışma sıcaklıklarını karşılaştırmış ve modüller arasında en fazla 5 °C fark olacak şekilde, ideal sıcaklık aralığının 25 °C ile 40 °C arasında olması gerektiğini vurgulamıştır (Tablo 2.1).

Daha sonra [49], Li-ion pillerinin yaşam, güvenlik ve performans üzerindeki sıcaklık etkisini göstermiştir ve istenilen çalışma sıcaklığı olarak 15-35 °C aralığını önermiştir. Ladrech [50], Li-ion piller için sıcaklık bandını tedarikçi verileriyle belirlemiş ve aralığı dört bölüme ayırmıştır: kapasite ve darbe performansında azalma (0-10 °C), optimal aralık (20-30 °C), artan kendiliğinden boşalma (30-40 °C) ve geri dönüşümsüz reaksiyonlar ile kısa devre riski (40-60 °C). Sato [51] ise, batarya sıcaklığı 50 °C'yi aşarsa şarj verimliliği ve döngü ömrünün ciddi şekilde düştüğünü belirtmiştir. Khateeb ve arkadaşları [53], Li-ion hücrelerin termal kaçınmanın 70-100 °C aralığında batarya güvenliğini tehlikeye attığını göstermiştir.

Tablo 2.1 Farklı kaynaklara göre Li-ion ve diğer batarya türleri için önerilen optimal sıcaklık aralıkları

Referans	Optimal performans için önerilen sıcaklık aralığı (°C)	Batarya tipi
Sato[51]	<50	Li-ion
Pesaran[48]	25-40	Kurşun asit, NiMH ve Li-ion
Panasonic[52]	şarj için 0-45 deşarj için -10 - 60	Li-ion

Tablo 2.1 Farklı kaynaklara göre Li-ion ve diğer batarya türleri için önerilen optimal sıcaklık aralıkları (devamı)

Ladrech[50]	20-30	Li-ion
Pesaran ve diğerleri [49]	15-35	Li-ion

Bu çalışmalar, Li-ion piller için maksimum çalışma sıcaklığının 40 °C'nin altında tutulması gerektiğini ve minimumunun 15 °C'nin üzerinde olması gerektiğini göstermektedir.

Sıcaklık limitlerinin aşılması durumunda ortaya çıkan etkiler, Tablo 2.2'de özetlenmiştir [47]. Pil davranışları, kimya, tasarım ve üreticiye bağlı olarak değişir. Düşük sıcaklık, kimyasal aktivitenin azalmasıyla kapasite düşüşü ve iç direnç artışı yaratır; bu da daha fazla ısı üretimine yol açar. Yüksek sıcaklık ise iç direnci artırır, kendiliğinden deşarjı tetikler ve termal kaçak riskini yükseltir. Bu durumlar pil performansını ve ömrünü olumsuz etkiler [54].

Pil şarj/deşarj hızı "C oranı" ile ifade edilir. 1C, 1Ah kapasiteli bir pilin, 1A akım kullanılarak 1 saatlik sürede şarj edilmesi anlamına gelir. 2C ise aynı pili 2A ile 0,5 saatte şarj etmek anlamına gelir. Daha yüksek C oranı (örneğin 3C) pilin daha hızlı şarj edilmesini sağlar ancak ısı oluşumu da önemli ölçüde artar.

Tablo 2.2 Pillerin çalışma prensibinde sıcaklığın etkisi [47]

Düşük Sıcaklık (<0°C)	Kapasite düşüşü İç direnç artışı
Yüksek Sıcaklık (>40°C)	İç direnç azalır Hızlandırılmış yaşlanma olayları Daha yüksek kendiliğinden deşarj

Tablo 2.2 Pillerin çalışma prensibinde sıcaklığın etkisi (devamı) [47]

Yüksek Sıcaklık (>40°C)	Elektrolitin parçalanması Termal kaçış, güvenlik düşünceleri Azalan ömür döngüsü
-------------------------	--

2.3.3 C-Oranı

Li-ion bataryaların performansını değerlendirmede kullanılan en önemli parametrelerden biri de C oranı (C-rate) olarak adlandırılan şarj veya deşarj hızıdır. C oranı, bataryanın tam kapasitesinin bir saat içinde şarj edilmesi veya deşarj edilmesi durumunda uygulanan akım büyüklüğünü temsil eder. Bu parametre, farklı uygulamalardaki enerji ihtiyacını karşılamak üzere bataryaların uygun hızlarda kullanılmasını sağlamaktadır. C oranı, bir saatte tamamen şarj veya deşarj edilebilecek batarya kapasitesine eşit olan şarj veya deşarj hızını ifade eder. Örneğin, 1.6 Ah batarya için, C, hücrenin 1.6 A'de şarj veya deşarj edilmesine karşılık gelir; benzer şekilde, 0.1C, 0.16 A hızına ve 2C, 3.2 A akımına eşittir [47].

2.3.4 Özgül Enerji

Gravimetrik enerji yoğunluğu, bir bataryanın birim kütlesi başına depolayabildiği enerji miktarını ifade eder. Kilogram başına Watt-saat cinsinden ifade edilir ve bir aracın bir şarj tüketme modunda ne kadar yol gidebileceğini ve batarya paketinin kütlesini doğrudan belirlediğinden dolayı çok önemli bir parametredir [49].

2.3.5 Enerji ve Güç Yoğunluğu

Li-ion bataryaların tasarımında ve performans değerlendirmesinde, enerji ve güç yoğunluğu kavramları belirleyici mühendislik parametreleri olarak ön plana çıkmaktadır. Bu parametreler sırasıyla, bir bataryanın birim hacimde ne kadar enerji depolayabildiğini (hacimsel enerji yoğunluğu) ve birim hacimde ne kadar güç sağlayabildiğini (hacimsel güç yoğunluğu) ifade etmektedir. Bu yoğunluklar sırasıyla Wh/L ve W/L birimleri ile tanımlanır ve batarya sistemlerinin enerji ve güç sağlama kapasitelerinin yoğunlukla ilişkisini ortaya koymaktadır.

Hacimsel enerji yoğunluğu, bataryanın nominal enerji kapasitesinin (Wh) toplam hacmine (L) oranlanmasıyla elde edilir. Bu parametre, özellikle elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi sınırlı hacme sahip uygulamalarda kritik önem taşımaktadır. Yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip bataryalar, daha az yer

kaplayarak daha uzun kullanım süresi veya sürüş menzili sağlayabilir. Bu doğrultuda, enerji yoğunluğu batarya sistemlerinin özgül enerji kapasitesinin artırılması hedefiyle yürütülen araştırmaların odak noktası haline gelmiştir [55].

Hacimsel güç yoğunluğu ise bataryanın kısa süreli enerji taleplerine yanıt verme kabiliyetini temsil eder. Bu değer, bataryanın birim hacim başına ne kadar güç çıkışı sağlayabileceğini gösterir. Özellikle hibrit elektrikli araçlar gibi ani hızlanma veya rejeneratif frenleme gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda, bu parametre kritik rol oynar. Ancak, güç yoğunluğu yüksek batarya kimyalarının genellikle daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olması, bu iki parametre arasında mühendislik açısından denge kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır [47].

Tablo 2.3'teki verilerde yer alan Li-ion bataryalar (özellikle NMC ve LFP), günümüzde en yüksek enerji ve güç yoğunluklarını sunan batarya teknolojileridir. LFP (Lityum Demir Fosfat) bataryalar, NMC'ye göre daha düşük enerji yoğunluğu sunmasına rağmen güç yoğunluğu açısından rekabetçidir ve termal güvenliği yüksektir. Kurşun-asit bataryalar hem enerji hem güç yoğunluğu bakımından oldukça geride kalmaktadır.

Tablo 2.3 Batarya tiplerine göre enerji ve güç yoğunlukları [22]

Batarya Kimyası	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Güç Yoğunluğu (W/L)
Li-ion (NMC)	500–700	1500–3000
Li-ion (LFP)	350–500	1000–2500
Lityum-Polimer	300–600	1000–2000
Kurşun-Asit	60–100	180–400
Nikel-Metal Hidrit (NiMH)	140–300	300–1000

Enerji ve güç yoğunluğu, yalnızca batarya performansını belirleyen faktörler olarak değil, aynı zamanda batarya modül tasarımında; özellikle hacimsel yerleşim, ağırlık

dengesi, paketleme verimliliği ve termal yönetim stratejilerinin planlanmasında da belirleyici rol oynamaktadır. Yüksek yoğunluklu batarya sistemleri, daha yoğun ısı üretimine neden olabileceğinden, bu durum etkin bir soğutma sistemi gereksinimini beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, enerji ve güç yoğunluğunun artırılmasına yönelik mühendislik çözümleri, termal güvenlik, hücre dizilimi ve sistem düzeyinde entegrasyon ile birlikte çok boyutlu olarak değerlendirilmelidir.

2.3.6 Şarj Durumu

Bir pilin başlangıçtaki şarj durumuna kıyasla kalan kapasitesi olarak tanımlanır ve yük akımı ile sıcaklık gibi çalışma koşullarından etkilenir [50]. Batarya veya hibrit elektrikli araçtaki batarya paketi için bir yakıt göstergesi gibi düşünülebilir. Matematiksel ifadesi Denklem 2.1’de verilmiştir.

$$SOC = \frac{Q_{kalan}}{Q_{nominal}} \quad (2.1)$$

Q_{kalan} ; Bataryada mevcut olan gerçek şarj miktarı amper-saat (Ah) cinsinden ifade edilirken, Q ise bataryanın nominal kapasitesini (amper-saat olarak) temsil etmektedir. Şarj durumu, batarya yönetimi için kritik bir durum parametresini temsil eder; SOC'nin doğru ölçülmesi çok zor olsa da aynı zamanda bataryaların sağlıklı ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için gereklidir.

2.3.7 Çevrim Ömrü

Çevrim ömrü, bir bataryanın genellikle %80 deşarj derinliğinde performans gereksinimlerini karşılamayı sonlandıran kadar gerçekleştirebildiği şarj/deşarj döngüsü sayısını belirtir. Bataryanın gerçek işletme ömrü ise yalnızca deşarj derinliğiyle değil; aynı zamanda şarj ve deşarj hızları ile çalışma ortamındaki sıcaklık gibi çeşitli çevresel ve işletme koşulları tarafından da etkilenmektedir. Genel olarak, deşarj derinliği arttıkça döngü ömrü kısalmaktadır. Bu nedenle, daha uzun bir döngü ömrü elde edebilmek adına, normal işletme koşullarında daha düşük deşarj derinliğiyle çalışan daha büyük kapasiteli bataryaların tercih edilmesi önerilmektedir.

2.3.8 Verimlilik

Batarya verimliliği, şarj işlemi sırasında bataryaya sağlanan elektrik enerjisi ile deşarj işlemi sırasında batarya tarafından geri sağlanan elektrik enerjisi arasındaki

oranın bir ölçüsüdür [56]. Gerçekte, bir batarya şarj sırasında depoladığı tüm enerjiyi deşarj sırasında geri veremez; zira enerjinin bir kısmı ısıya dönüşerek kaybolur veya hücre içi sızıntı akımları gibi içsel kayıplar sonucu sistemden yitirilir. Pratikte, bataryalar şarj esnasında aldıkları enerjinin tamamını deşarj sırasında geri veremezler; çünkü enerji kayıpları çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler nedeniyle meydana gelmektedir.

2.4 Lityum- İyon Bataryaların Enerji Tüketimi

Bataryaların elektrik tüketimi, genellikle ilgili batarya akımı ve gerilim değerlerinin ölçülmesiyle hesaplanmakta olup, bu tüketim sıklıkla kilometre başına watt-saat (Wh/km) cinsinden ifade edilmektedir. Bir yolculuk sırasında BEV'ler tarafından tüketilen elektrik enerjisinin watt-saat (Wh) biriminde belirlenmesi, aşağıdaki gibi batarya bilgileri ile ilgili araç içi sensör verilerinden analiz edilebilir [57]:

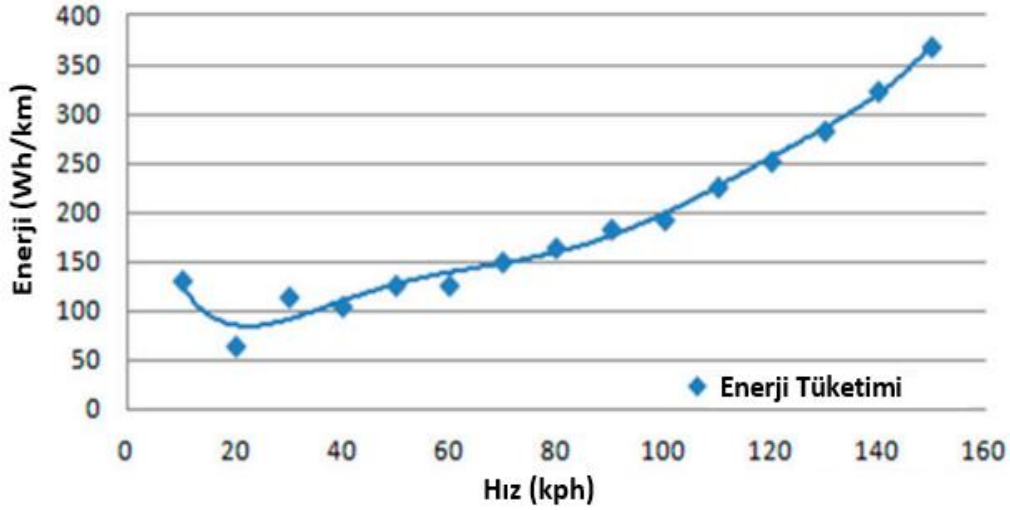
$$E_{yolculuk} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^n V_i \times I_i \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad (2.2)$$

Burada V_i ve I_i , i saniyede ölçülen batarya gerilimi ve akımını belirtir, n ise bir yolculuğun son saniyesini belirtir. Sonrasında, Elektrikli araçların Wh/km birimindeki enerji tüketimi(EC) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$EC = \frac{E_{yolculuk}}{d_{trip}} \quad (2.3)$$

Burada d_{trip} , kilometre birimi cinsinden seyahat edilen toplam mesafeyi belirtmektedir.

Elektrikli araçların (EV'lerin) batarya soğutması için tüketilen enerji yüzdesi, aracın tasarımı, çevresel koşullar, sürüş alışkanlıkları ve soğutma sisteminin verimliliği gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Ancak, yapılan çalışmalar, batarya soğutmasının EV'lerde genel enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturabileceğini göstermiştir. Bu oran, özel koşullara bağlı olarak toplam enerji kullanımının yaklaşık %5 ila %20 veya daha fazlası arasında değişmektedir.



Şekil 2.10 Araç hızına göre enerji tüketimi [58]

Grafiğe bakıldığında, elektrikli araç yüksek hızlarda seyir halinde olduğunda enerji tüketiminin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, aracın karşılaştığı aerodinamik direnç kuvvetinin hızla birlikte katlanarak artmasından kaynaklanmaktadır. Aerodinamik direnç, hızın karesiyle orantılı olarak yükseldiği için, aracın daha yüksek hızlarda hareket etmesi, enerji tüketiminde lineer olmayan bir artışa yol açmaktadır.

2.5 FDM Seçimi

Piyasada farklı termo-fiziksel özelliklere sahip çok sayıda FDM bulunmaktadır ve bu malzemelerin doğru seçimi, batarya sistemlerinden elde edilecek performans üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. En uygun FDM'in belirlenmesi, batarya termal yönetiminin verimliliği açısından kritik bir adımdır. FDM'lerin temel termo-fiziksel özellikleri; özgül ısı kapasitesi, gizli ısı, erime sıcaklığı, yoğunluk ve termal iletkenlik olarak öne çıkmaktadır. Yüksek özgül ısı kapasitesi, daha fazla duyulur ısı depolanmasına olanak tanıyarak bataryadan gelen ısının daha etkin bir şekilde absorbe edilmesini sağlar. Aynı şekilde, yüksek latent ısı değeri, malzemenin küçük sıcaklık değişimleriyle daha fazla ısıyı absorbe edebilmesine imkân tanıyarak termal stabilitenin korunmasına katkıda bulunur. FDM'in yoğunluğu ise, özellikle elektrikli araçlarda ağırlık optimizasyonu açısından dikkate alınmalı; bu değer, batarya paketinin toplam kütesini önemli ölçüde artırmayacak seviyede olmalıdır. Termal iletkenliğin yüksek olması, ısının pil hücrelerinden daha hızlı

uzaklaştırılmasını sağlayarak termal yönetimin etkinliğini artırır. Bununla birlikte, FDM'in erime sıcaklığına ilişkin ideal değer, net bir şekilde tanımlanmış değildir; çünkü bu parametre, aracın kullanım profiline ve çalışma ortamına bağlı olarak optimize edilmelidir.

FDM'in pil termal yönetimindeki performansı büyük ölçüde seçilen FDM türüne bağlıdır. Azizi ve arkadaşları [59], pil termal yönetimi için FDM'in erime sıcaklığının 40-50 °C arasında olmasının uygun olduğunu belirtmiştir. Düşük erime noktalı FDM'lerde latent ısı erken kullanılır. Bais ve diğerleri [60], 18650 pil hücrelerinde RT47 adlı FDM'yi 4 mm kalınlığında hücre etrafına sararak pilin çalışma süresinin iki katına çıktığını göstermiştir. Ni ve ekibi [61], erime noktası, termal iletkenlik, latent ısı ve kalınlığın termal kaçış oluşumunu azaltmada önemli olduğunu bulmuştur. Sudhakaran ve diğerleri [62], FDM kalınlığı (%35,13), ısı transfer katsayısı (%13,98) ve eklenen miktarın (%5,09) pil termal yönetimindeki etkisini analiz etmiş; FDM kalınlığının ısı depolama kapasitesini artırdığını ancak aşırı kalınlığın pil içi ısı dağılımını bozup, enerji yoğunluğunu düşürebileceğini ve pil paketinde yer kaplayabileceğini belirtmiştir.

Li-ion bataryalar için ideal çalışma sıcaklığı 15-40 °C aralığındadır ve bu aralıkta en uygun FDM seçilmelidir. FDM'ler genellikle organik, inorganik veya ötektik olarak sınıflandırılır. Organik FDM'ler karbon temellidir; en yaygın örneği parafindir. Parafinler, C_nH_{2n+2} formülünde alkanlardır ve karbon zincirinin uzamasıyla erime sıcaklığı ve latent ısı değerleri artar. Parafinler, uzun süre kararlı, inert ve korozyona dayanıklı olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilir [63].

Organik FDM'ler, parafin mumu ve parafin dışı karışımlar olarak iki gruba ayrılır. Parafin mumu genellikle düz zincirli alkilerden oluşur ve kristalleşme sırasında yüksek latent ısı salar. Zincir uzunluğunun artmasıyla birlikte erime noktası ve gizli ısı değeri de yükselmektedir. Parafin mumları güvenli, ucuz, toksik olmayan, kimyasal olarak stabil ve geniş erime noktası aralığına sahiptir. Erime sırasında hacim değişimi azdır ve düşük buhar basıncı nedeniyle uçuculuğu neredeyse yoktur. Alkil zincir uzunluğuna göre erime noktası ayarlanabilir, bu da parafin mumunu pil uygulamaları için ideal bir FDM yapar. Isı depolama kapasitesi, kimyasal stabilitesi, ekonomikliği ve diğer teknik özellikler dikkate alındığında, parafin bazlı malzemeler batarya uygulamaları için en uygun faz değişim malzemeleri arasında değerlendirilmektedir.

Bais ve ark. [64], batarya sıcaklığını kontrol etmek için RT-42 parafin mumunu kullanarak sayısal bir çalışma yapmış ve FDM kalınlığının 1-7 mm arasında etkisini incelemiştir. Sonuçlar, optimum FDM kalınlığının 4 mm olduğunu, daha kalın tabakaların ise performans artışına pek katkı sağlamadığını göstermiştir. Bununla birlikte, saf RT-42 parafinin düşük termal iletkenlik özelliği, ısı transferi süreçlerinin verimliliğini kısıtlamaktadır.

Lee vd. [65], erime sıcaklıkları sırasıyla 27,7 °C, 36,1 °C ve 44 °C olan üç farklı FDM tipi BTYS olan n-oktadekan, n-oktakozen ve n-dokozanı kullanarak bir çalışma yürütmüştür. 3C şarj koşullarında, n-dokozan ile yapılan uygulamada hücre sıcaklığı 45,6 °C'ye ulaşarak önerilen optimum sınırı aşmıştır. n-oktadekan hızlı faz geçişi nedeniyle zayıf termal yönetim sağlarken, n-oktakozen (36,1 °C) BTYS için uygun bulunmuştur.

Wang ve ark. [66], farklı erime noktalarına sahip parafin mumu ve genleştirilmiş grafitten oluşan FDM kullanarak, farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip CFDM'nin batarya termal yönetimi üzerindeki etkileri araştırılmış olup, çalışma bulguları doğrultusunda 48 °C faz değişim sıcaklığına sahip parafinin en uygun malzeme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 4,4 mm hücre aralığı, 0,8 W/(m·K) konvektif ısı transfer katsayısı ve %10,9 kütle oranı gibi parametrelerin kullanılması, yalnızca sıcaklık kontrol gereksinimlerini karşılamakla kalmamış, aynı zamanda faz değişim malzemesinin hacim oranında %18,4'lük bir azalma sağlamıştır.

Xin ve ark. [67], 5000 mAh kapasiteli silindirik Li-ion bataryanın pasif BTYS performansını parafin-genleştirilmiş grafit FDM ile sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar, 4 mm kalınlığındaki FDM ile bataryanın maksimum sıcaklığının 2C deşarj oranında 48,26 °C'de kontrol edilebildiğini göstermiştir.

Malik vd. [68], batarya paketlerinin soğutulmasına yönelik olarak grafen içeren CFDM tabanlı soğutma sistemi geliştirmiş ve bu sistemi deneysel yöntemlerle incelemiştir. Grafenin eklenmesi, FDM'nin termal performansını artırmış ve CFDM'nin termal genişleme katsayısının saf FDM'den daha yüksek olduğu bulunmuştur. 6 mm kalınlığındaki CFDM, 4C deşarj oranında batarya sıcaklığını 56,5 °C'den 36,5 °C'ye düşürmüştür.

Hussain vd. [69], 3,14 Ah kapasiteli Li-ion 18650 tipi hücrede nikel köpük-parafin esaslı CFDM kullanarak termal yönetim performansını değerlendirmiştir. Sonuçlar,

CFDM'nin 2C deşarj oranında batarya yüzey sıcaklığını doğal hava konveksiyonuna göre %31, saf FDM'ye göre ise %24 oranında azalttığını göstermiştir.

Li ve çalışma arkadaşları [70], çift katmanlı FDM içeren yenilikçi bir yaprak tipi BTYS tasarlamıştır. Gerçekleştirilen deneysel analizler sonucunda, çift katmanlı FDM ile yapılandırılmış BTYS'nin, farklı tipik ortam sıcaklıklarında tek katmanlı FDM kullanılan geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksek termal performans ve çevresel adaptasyon sağladığı ortaya konmuştur. Ayrıca, bu BTYS, ısı transferini artırmak için kanatçık destekli teknolojiyle optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, 30 °C ve 40 °C ortam sıcaklıklarında, asimetrik kanatçık düzenine sahip sistem, kanatçıksız BTYS ile karşılaştırıldığında maksimum sıcaklık farkını sırasıyla %5,53 ve %29,19, maksimum sıcaklık artışını ise sırasıyla %36,15 ve %42,76 oranında azaltmıştır.

Du ve ark. [71], ilk kez mekanik titreşimin yüksek ortam sıcaklıklarında Li-ion piller için FDM termal yönetim modülü üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. FDM kalınlığı, titreşim genliği ve frekansı gibi parametrelerin termal yönetim performansı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.. Elde edilen sonuçlar, mekanik titreşim koşullarında FDM kalınlıkları 3 mm, 7 mm, 9 mm ve 12 mm olduğunda maksimum sıcaklık artışının sırasıyla %31, %45, %48 ve %24 oranında azaldığını göstermiştir. Yapılan analizler, titreşim genliği ve frekansındaki artışın batarya modülünün termal yönetim verimliliğini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

2.5.1 Maliyet Karşılaştırması

FDM seçiminde erime sıcaklığı ve maliyet, dikkate alınması gereken başlıca belirleyici etkenler arasında yer almaktadır. Özellikle lityum-iyon bataryalar için önerilen ideal çalışma sıcaklık aralığının genellikle 15–35 °C arasında olması, bu sınırları karşılayan FDM'lerin tercih edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, uygun erime sıcaklığına sahip FDM'ler, batarya sisteminin termal stabilitesi açısından daha etkin bir kontrol imkânı sunar. Bu çalışmada, Avrupa merkezli Rubitherm firmasının piyasaya sunduğu çeşitli FDM türlerine ait erime sıcaklıkları ile 100 kg başına maliyet verileri Tablo 2.4'te detaylı şekilde verilmiştir. Bu veriler,

performans-maliyet dengesi açısından FDM seçimine yönelik karşılaştırmalı bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Tablo 2.4 Farklı paraffin türlerinin fiyat karşılaştırılması ve erime sıcaklıkları

FDM TÜRÜ	AVRUPA-(Rubitherm)			
	1 kg fiyat- EUR	100 kg fiyat - EUR	Erime Sıcaklığı	Gizli Isı (kJ/kg)
Paraffin RT44HC	16,4	1640	44°C	218
Paraffin RT31	11,94	1194	31°C	220
Paraffin RT35	10,97	1097	35°C	240
Paraffin RT42	6,1	610	42°C	165
Paraffin RT24 HC	14,74	1474	24°C	200
Paraffin RT50	7,3	730	50°C	200

Belirlenen 15–35 °C çalışma sıcaklığı aralığı dikkate alındığında, bu kriterleri karşılayan yalnızca üç FDM türü uygun bulunmuştur (Tablo 2.5): RT24HC (24 °C), RT31HC (31 °C) ve RT35HC (35 °C). Bu üç uygun seçenek arasında performans ve maliyet açısından karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla VMO metriği kullanılmıştır. VMO, birim maliyet başına sağlanan gizli ısı miktarını ifade etmekte olup, seçim sürecinde hem ekonomik hem de termal etkinliği birlikte değerlendiren bütüncül bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Söz konusu metrik, aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır [63]:

$$Verimlilik - Maliyet Oranı (VMO) = \frac{Gizli\ Isı\ (kJ/kg)}{Fiyat\ (\frac{EUR}{kg})} \quad (2.3)$$

Tablo 2.5 Rubitherm firmasına ait FDM türlerinin termofiziksel özellikleri ve maliyet karşılaştırması

FDM Türü	Erime Sıcaklığı (°C)	VMO (kJ/EUR)
RT24HC	24	13.57
RT31HC	31	18.43
RT35HC	35	21.88

Tablo 2.5’te yer alan değerlere göre:

- RT24HC türü en düşük VMO değerine (13.57 kJ/EUR) sahiptir. Bu, düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi açısından avantaj sağlasa da ekonomik açıdan en az verimlidir.
- RT31HC türü 18.43 kJ/EUR ile daha iyi bir maliyet-verimlilik dengesi sunar.
- RT35HC ise 21.88 kJ/EUR ile en yüksek verimlilik oranına sahiptir ve maliyet açısından en avantajlı seçenektir.

Bu verilere dayanarak, eğer sistemin çalışabileceği sıcaklık aralığı 35 °C’ye kadar çıkabiliyorsa, RT35HC en uygun FDM türü olarak öne çıkmaktadır. Ancak sistemin daha düşük sıcaklıklarda çalışması gerekiyorsa, RT31HC tercih edilebilir; zira bu durumda hem uygun sıcaklık aralığı sağlanmış olur hem de ekonomik verimlilik dengesi korunur.

2.6 Elektrikli Aracın Enerji Tüketimi

Elektrikli aracın bataryasında biriken enerjinin ana amacı, elektrik motorunu beslemek ve farklı çalışma koşullarında elektrikli aracın hareketini sağlamaktır. Ek olarak, batarya aynı zamanda güvenliği (ışıklar, korna, cam temizleyici vb.) ve konforu (iklim kontrolü, medya vb.) sağlayan yardımcı sistemlere de enerji sağlamalıdır. Seyahat sırasında, özgül enerji tüketimi değeri (Wh/km veya kWh/100km cinsinden) farklı olabilmektedir.

Soğutma Gücü (Q), Soğutma sistemi tarafından belirli bir süre içinde (genellikle birim zaman) bataryadan alınan ısı miktarıdır. Soğutma gücü, genellikle ısı transfer denklemleri ile hesaplanır:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Burada; m: soğutucu akışkanın debisi (kg/s), Cp: soğutucu akışkanın özgül ısısı (J/kg·K) ve ΔT: Soğutucu akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, yani sıcaklık değişimi (K)' dir. Batarya soğutma sistemi tarafından harcanan toplam enerji (E), soğutma gücünün zamanla çarpılması ile hesaplanabilir:

$$E = Q \cdot t \quad (2.6)$$

Zaman (t) aracın çalışma süresine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Soğutma gücünün hesaplanmasında, sistemin genel verimliliği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kısmi yük altında elektrikli aracın batarya soğutma için harcadığı enerji;

$$\text{Soğutma Enerji Yüzdesi} = \frac{E_{\text{soğutma}}}{E_{\text{toplam}}} \times 100 \quad (2.7)$$

Batarya soğutma sistemleri, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %1 ila %5'lik bir bölümünü oluşturmakta olup, bu oran araç tasarımı ve soğutma sisteminin yapısal özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Soğutma gereksinimi; aracın seyir hızı, çevresel sıcaklık koşulları, bataryanın deşarj süreci ve kullanım senaryoları gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu unsurların artan talepleri, daha yüksek düzeyde soğutma ihtiyacına ve dolayısıyla enerji tüketiminde artışa neden olabilmektedir.

3

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada elektrikli araç bataryalarında ANSYS Fluent kullanılarak farklı hücre düzenlemeleri ve faz değişim materyali etkisiyle sıcaklık dağılımı ve soğutma verimliliği incelenecektir.

3.1 Matematiksel Model

Matematiksel modeller, aşağıdaki temel varsayımlar ışığında geliştirilmiştir:

- BTYS modülünün üst, alt ve çevre yüzeylerinin adyabatik olduğu kabul edilmiştir.
- FDM'nin termofiziksel özelliklerinin homojen ve izotropik olduğu kabul edilmiştir.
- Isı üretiminin modül içinde eşit dağılım gösterdiği kabul edilmiştir.

Yukarıdaki varsayımlar altında, erime ve donma modeli, FDM'nin faz değişim süreçlerini modellemek için aşağıdaki (3.2) ve (3.6) numaralı denklemlere göre kullanılmıştır.

Faz değişim bölgesindeki doğal konveksiyon ihmal edilmiştir, çünkü bakır köpüğün gözenekleri tarafından sağlanan sınırlama [72] bu ihmalin geçerli olduğunu göstermektedir.

FDM'deki faz değişimini modellemek için [73] entalpi formülasyonu kullanılmıştır.

$$H = h + \Delta H \quad (3.1)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.2)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (3.3)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{pcm} \leq T_s \\ \frac{T_{pcm} - T_s}{T_i - T_s} & \text{if } T_s \leq T_{pcm} \leq T_i \\ 1 & \text{if } T_{pcm} \geq T_i \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada, H , duyulur entalpi (h) ve gizli entalpi (ΔH) toplamı olarak tanımlanan FDM'nin özgül entalpisidir. h_{ref} : Referans entalpi, T_{ref} : Referans sıcaklık, C_p : FDM'nin sabit basınç altındaki özgül ısı, L : Gizli ısı, β : Sıvı faz oranı, T_{FDM} : FDM'nin sıcaklığı, T_s : FDM'nin donma sıcaklığı, T_l : FDM'nin erime sıcaklığıdır. Kaynak terimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$S = \frac{\partial(\rho_{pcm}\Delta H)}{\partial t} \quad (3.5)$$

Burada, FDM'nin hızı ihmal edilmiştir ve ρ_{fdm} : FDM'nin yoğunluğunu ifade etmektedir. Kütle dengesi denklemi [73, 74] aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

X yönündeki momentum dengesi denklemi [73,74] aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (3.7)$$

Y yönü

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (3.8)$$

Z yönü

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (3.9)$$

Enerji korunumu denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial(\rho C_{p,f} T_f)}{\partial t} + \nabla(\rho_f C_{p,f} \vec{v}_f T_f) = -\nabla(k_f \nabla T_f) \quad (3.10)$$

Burada: ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), P : Basınç (Pa), μ : Dinamik viskozite ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), C_p : Özgül ısı ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$), \vec{v}_f : Akışkan hız vektörü (bileşenleri: u, v, w), k_f : Isı iletkenliğidir ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

Momentum kaybı terimleri (S_x, S_y, S_w) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$S_i = \alpha u_i \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \gamma}, \quad i = (x, y, z) \quad (3.11)$$

Burada: α : Mushy zone (yarı erimiş bölge) etkisini yansıtan bir sabittir ve bu çalışmada 10^5 olarak alınmıştır. γ : Bölme sıfıra hatasını önlemek için kullanılan küçük bir sabittir.

Yukarıdaki denklemler çözülmeden önce, metal köpük/parafin kompozitine ait bazı parametreler değerlendirilmiş ve aşağıda özetlenmiştir. Bu denklemler içerisinde: k , ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Alt indisler: FDM, m_e , metal köpüğü ve ε , metal köpüğün gözenekliliğini ifade etmektedir.

Öncelikle, metal köpük ve FDM'nin etkin ısı iletkenlikleri (k_{me} ve k_{pcm}), üç boyutlu bir model kullanılarak hesaplanmıştır [75].

$$k_{pcm} = k_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2(R_A + R_B + R_B + R_D)} \Big|_{k_{me} = 0} \quad (3.12)$$

$$k_{me} = k_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2(R_A + R_B + R_B + R_D)} \Big|_{k_{pcm} = 0} \quad (3.13)$$

$$R_A = \frac{4\sigma}{(2e^2 + \pi\sigma(1 - e))k_{me} + (4 - 2e^2 - \pi\sigma(1 - e))k_{pcm}} \quad (3.14)$$

$$R_B = \frac{(e - 2\sigma)^2}{(e - 2\sigma)e^2 k_{me} + (2e - 4\sigma - (e - 2\sigma)e^2)k_{pcm}} \quad (3.15)$$

$$R_C = \frac{(\sqrt{2} - 2e)^2}{2\pi\sigma^2(1 - 2e\sqrt{2})k_{me} + 2(\sqrt{2} - 2e - \pi\sigma^2(1 - 2e\sqrt{2}))k_{pcm}} \quad (3.16)$$

$$R_D = \frac{2e}{e^2 k_{me} + (4 - e^2) k_{pcm}} \quad (3.17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(2 - \left(\frac{5}{8}\right) e^3 \sqrt{2} - 2\varepsilon}{\pi(3 - 4e\sqrt{2} - e)}}} \quad (3.18)$$

$$e = 0.339 \quad (3.19)$$

İkinci olarak, metal köpüğün yapısal özellikleri, geçirgenlik: A , atıl katsayısı: C_i , gözeneklilik: ε , gözenek yoğunluğu: ω , bağ çapı : d_f ilişkisi dikkate alınmıştır. Bu parametreler aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenebilir [76].

$$\frac{A}{d_p^2} = 0.00073(1 - \varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.11} \quad (3.20)$$

$$C_i = 0.00212(1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.63} \quad (3.21)$$

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{3\pi} \left(\frac{1}{1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04}}\right)} \quad (3.22)$$

$$d_p = \frac{0.0254}{\omega} \quad (3.23)$$

Yerel ısı transfer katsayısı (h_{sf}) ve ara yüzey alanı (h_{sf}), Zhukauskas modeli ile Calmidi ve Mahajan modeli kullanılarak belirlenmiştir [75, 76].

$$h_{sf} = \begin{cases} \frac{0.76Re_d^{0.4} Pr^{0.73} k_{pcm}}{d_f} & 1 \leq Re_d \leq 40 \\ \frac{0.76Re_d^{0.4} Pr^{0.73} k_{pcm}}{d_f} & 40 \leq Re_d \leq 10^3 \\ \frac{0.76Re_d^{0.4} Pr^{0.73} k_{pcm}}{d_f} & 10^3 \leq Re_d \leq 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$Re_d = \rho \sqrt{u^2 + v^2} \frac{d_f}{\varepsilon \mu} \quad (3.25)$$

$$A_{sf} = \frac{3\pi d_f (1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04})}{(0.59d_p)^2} \quad (3.26)$$

Bu çalışmada, HTF olarak hava kullanılmıştır. HTF bölgesi için denklemler (3.7), (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) uygulanmıştır. Modelleme bölgesinin ağ (mesh) yapısı, ANSYS Meshing fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Bu ağ boyutu, hesaplama kaynaklarını aşırı tüketmeden ızgara bağımsızlığını elde etmeyi mümkün kılmıştır.

Başlangıç koşulları olarak, tüm hesaplama bölgesi başlangıçta sıcaklığına (deneysel değer ile aynı) ve sıfır hıza ayarlanmıştır. Giriş sınır koşulu olarak hız giriş (velocity inlet) tanımlanmış ve HTF'nin hızı ile sıcaklığı sabit tutulmuştur. Çıkış sınır koşulu olarak tam gelişmiş akış çıkışı (fully developed outflow) uygulanmıştır.

Batarya ve FDM modülü arasındaki birleşik duvarda ısı akısı sınır koşulu tanımlanmıştır. Akışkan borusu ile FDM arasındaki arayüz ile FDM ve batarya hücreleri arasındaki arayüz, ısı transferi açısından birleşik duvar sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. Modelleme bölgesinin dış yüzeyleri için ise adyabatik sınır koşulları kabul edilmiştir.

Modelleme sürecinde, ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. UDF yorumlanarak, HTF'nin termofiziksel özellikleri ve FDM-metal köpük ara yüzey ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Momentum ve enerji denklemlerinin çözümünde, ikinci dereceden yukarı rüzgar şeması (Second-Order Upwind) yöntemi uygulanmıştır. Basınç düzeltmeleri için Basınç Basamaklandırma Opsiyonu yöntemi tercih edilmiştir. Alt gevşeme (under-relaxation) faktörleri Hız: 0.5, Enerji: 1, Basınç düzeltme: 0.3, Sıvı faz oranı: 0.9 şeklinde alınmıştır. Zaman adımının hesaplamalar üzerindeki etkisi titizlikle incelenmiş ve her zaman adımında hesaplama yakınsaması değerlendirilmiştir. Tüm hesaplama koşullarında kalıntı (residual) değerleri 10^{-4} , 10^{-4} 'ün altında, enerji denklemi için ise 10^{-6} , 10^{-6} 'nın altında olacak şekilde yakınsama sağlanmıştır.

3.2 Model Geliştirme

Bu çalışmada, bir BTYS için termal performans analizleri ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, her biri 65 mm yüksekliğe ve 18 mm çapa sahip olan toplam 17 adet silindirik Li-ion batarya (SONY 18650 modeli)

kullanılmıştır [38]. Bataryalar, elektrikli araçlardaki tipik batarya modülü koşullarını taklit edecek şekilde kompakt bir düzende yerleştirilmiştir.

3.2.1 Modülün Yapısı, Geometrisi, Bileşenleri ve Yapılandırması

Çalışmada iki farklı soğutma stratejisi ayrı ayrı analiz edilmiştir: Hava Soğutma: İlk senaryoda, zorlamalı (forced) hava soğutma sistemi uygulanmıştır. Ortam havası sabit bir hız ve sıcaklıkta batarya modülüne yönlendirilmiştir. Giriş havasının hızı, sıcaklığı ve sınır koşulları, gerçek bir araç içi soğutma ortamını taklit edecek şekilde belirlenmiştir. Bu senaryoda, bataryalar üzerinde hava akışının oluşturduğu konvektif ısı transferi incelenmiştir. FDM Soğutma: İkinci senaryoda ise, FDM kullanılarak pasif bir soğutma sistemi modellenmiştir. FDM, batarya hücrelerinin arasına ve çevresine yerleştirilmiştir. Bu yapı sayesinde, bataryaların çalışma sırasında ürettiği fazla ısı, FDM tarafından absorbe edilerek hücrelerin sıcaklık artışı sınırlandırılmıştır. FDM'nin erime sıcaklığı, gizli ısı kapasitesi (latent heat) ve termal iletkenlik gibi ısıl özellikleri, literatür verileri ve deneysel bulgular temel alınarak tanımlanmıştır.

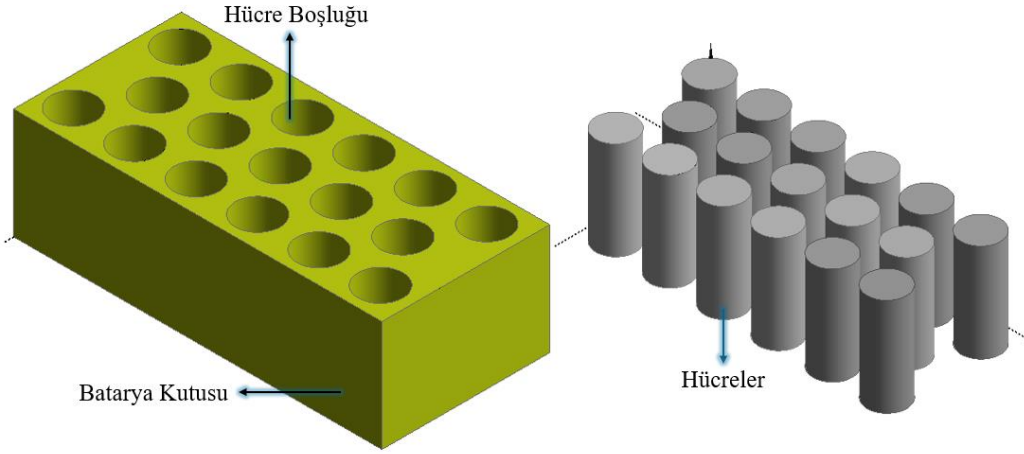
Simülasyonlar, zamana bağlı (transient) termal koşullarda gerçekleştirilmiştir. Batarya hücrelerinin iç ısı üretimi, tipik bir deşarj profiline göre tanımlanmıştır. Her iki soğutma yöntemine ait sonuçlar, batarya modülündeki sıcaklık dağılımı, maksimum hücre sıcaklığı ve sıcaklık homojenliği açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, doğruluk sağlamak amacıyla ağ (mesh) kalitesi ve yakınsama (convergence) kriterleri kontrol edilmiştir.

3.2.2 Batarya Tasarımının Oluşturulması

Tasarım sürecinde, batarya hücrelerinin düzeni ve paket geometrisi, FDM'nin etkili bir şekilde entegre edilebilmesini sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Literatürde yer alan standart hücre paketleme yaklaşımları dikkate alınarak belirlenen boyutlar 216 mm, 65 mm, 98,35 mm dir. Bu ölçüler, hem hücrelerin termal etkileşimini minimize edecek şekilde yerleştirilmesini hem de FDM ile temas yüzeyinin maksimize edilmesini amaçlamaktadır.

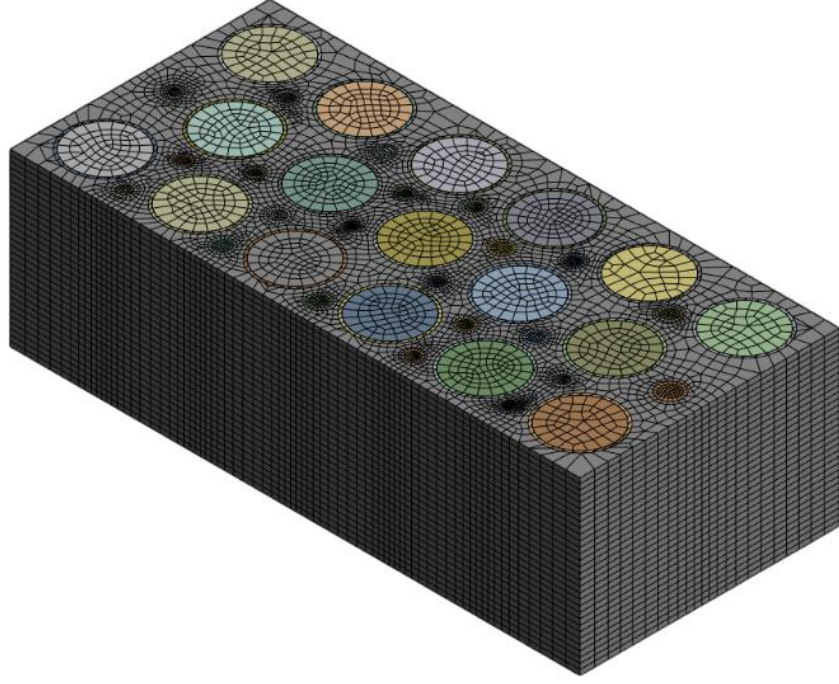
Tasarımda batarya paketi yüzeysel değil, üç boyutlu kompakt bir yapıdadır. Bu yapı, FDM'nin batarya hücreleriyle daha fazla temas ederek ısının etkin bir şekilde emilmesine ve daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlanmasına olanak tanımıştır.



Şekil 3.1 Batarya modülü katı modeli

3.2.3 Batarya Modülü Mesh Yapısı

17 hücreli silindirik Li-ion bataryalardan oluşan modülün ANSYS Fluent yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu mesh yapısını göstermektedir. Hücrelerin dış yüzeylerinde daha yoğun (fined) bir mesh kullanılarak, sıcaklık gradyanlarının daha hassas çözümlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, batarya hücreleri ile FDM veya hava arasındaki etkileşim bölgelerinde çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla yerel mesh iyileştirmeleri yapılmıştır.



Şekil 3.2 Batarya modülünün üç boyutlu mesh yapısı

Modelde çoğunlukla hegzagonal (hexahedral) elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlar hem ısı transferi hem de akış analizlerinde daha az sayıda elemanla daha yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamaktadır. Mesh yapısının kalitesi, aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilmiştir: Aspect ratio (boy/en oranı) < 5 , Skewness (şekil bozulması) < 0.25 , Orthogonal quality (dikeylik kalitesi) > 0.85 olması gerekmektedir. Bu kriterler doğrultusunda oluşturulan ağ yapısı hem çözüm kararlılığı hem de yakınsama süresi açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir. Şekil 3.2’de analizlerde kullanılan sayısal ağ yapısı sunulmuştur.

3.2.4 Batarya Modülü Sınır Şartları

Bu çalışmada, Li-ion bataryaların FDM ile pasif soğutulmasını incelemek amacıyla ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde gerçekleşen ısı transferi, doğal taşınım ve FDM’nin faz değişimi dikkate alınarak modelleme yapılmıştır.

Kullanılan fiziksel model ayarları şekil 3.3 ile gösterilmiştir.

Models
Multiphase - Off
Energy - On
Viscous - Standard k-ε, Enhanced Wall Fn
Radiation - Off
Heat Exchanger - Off
Species - Off
Discrete Phase - Off
Solidification & Melting - On
Virtual Blade Model - Off
Acoustics - Off
Structure - Off
Eulerian Wall Film - Off
Potential/Electrochemistry - Off
Battery Model - Off
Ablation - Off

Şekil 3.3 Batarya model özellikleri

Burada;

- Enerji denklemi aktif hale getirilmiş olup, ısı iletimi ve taşınımı analize dahil edilmiştir. Bu sayede batarya hücrelerinden yayılan ısının FDM tarafından absorbe edilerek sistemin soğutulma süreci modellenmiştir.
- Türbülans (Viskoz), Standart k-ε Modeli, Geliştirilmiş Duvar Fonksiyonu: Türbülans modeli olarak standart k-ε modeli seçilmiştir. Duvar fonksiyonları ise “Enhanced Wall Treatment” ile detaylandırılmıştır. Bu sayede, sınır tabakalarda daha hassas bir akış çözümü sağlanmış, FDM çevresindeki doğal taşınım daha doğru şekilde temsil edilmiştir.
- Donma ve Erime (Katılaşma ve Erime) Modeli: Modelin aktif hale getirilmesiyle, FDM'nin katıdan sıvıya ve sıvıdan katıya geçişleri (erime ve donma süreçleri) analiz kapsamına alınmıştır. Böylece, FDM'nin gizli ısı

absorpsiyon kapasitesi simülasyona entegre edilerek batarya sisteminin pasif soğutma performansı gerçekçi şekilde değerlendirilebilmiştir. FDM'nin termofiziksel özellikleri, literatürde yer alan Rubitherm verilerine göre tanımlanmıştır.

- Çok Fazlı Akış: Çalışmanın amacı doğrultusunda çok fazlı akış, radyasyon, tür bileşimi ve elektro-kimyasal modeller devre dışı bırakılmıştır. Bu, analiz kapsamını yalnızca ısı transferi ve faz değişim süreçlerine odaklayarak çözüm süresini optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Bu modelleme yaklaşımı sayesinde, batarya hücreleri ile FDM arasındaki etkileşimlerin termal etkileri detaylı biçimde incelenmiş ve pasif soğutma stratejisinin etkinliği sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Analizde kullanılan tüm malzemelerin fiziksel ve termal özellikleri, hem literatür hem de üretici verileri dikkate alınarak belirlenmiş ve Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Modülde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (ρ) [kg/m ³]	Isı İletkenliği (k) [W/m·K]	Özgül Isı (cp) [J/kg·K]	Erime Noktası [°C]	Gizli Isı (L) [kJ/kg]	Isı Akısı [W/m ³]
Batarya Hücresi	2700 (yaklaşık)	1.6 (yaklaşık)	900	-	-	104017
FDM (RT35HC)	880	0.2	2000	35-36	160	-
Alüminyum Kutu	2700	237	900	-	-	-
Hava (Doğal taşınım)	1.225	0.026	1005	-	-	-

Sayısal analizlerde kullanılan tüm malzemeler ve bu malzemelere ait termofiziksel özellikler ANSYS Fluent ortamına tanımlanmıştır. FDM olarak Rubitherm RT35HC seçilmiştir. RT35HC, 35 °C civarında erime noktası ve yüksek gizli ısı kapasitesi sayesinde batarya termal yönetiminde oldukça uygun bir malzemedir. Parafin bazlı yapısı ile kimyasal kararlılığı yüksektir ve faz geçişleri sırasında önemli miktarda ısı absorbe edebilir.

Batarya hücresi, yüksek yoğunluk ve ısı iletkenliği dikkate alınarak yaklaşık değerlerle temsil edilmiştir. 2C deşarj koşullarında batarya hücresinden yayılan ısı miktarı, Tablo 3.1’de verildiği gibi literatür verilerine uygun şekilde Tablo 3.1’de malzeme özellikleri tablosundaki gibi 104017 W/m^3 olarak belirlenmiş ve analizlerde ısı akısı girdisi olarak kullanılmıştır [77]. Ayrıca, batarya hücrelerini çevreleyen muhafaza kutusu için alüminyum kullanılmış ve ortamda doğal taşınımın sağlanabilmesi amacıyla hava, akışkan olarak modellenmiştir. . FDM etkisini değerlendirmek amacıyla, muhafaza kutusunun hacminin yaklaşık %10’una karşılık gelecek şekilde FDM rastgele dağıtılmıştır. Bu yaklaşım ile FDM’nin termal performans üzerindeki etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır.

4

BULGULAR VE TARTIŞMA

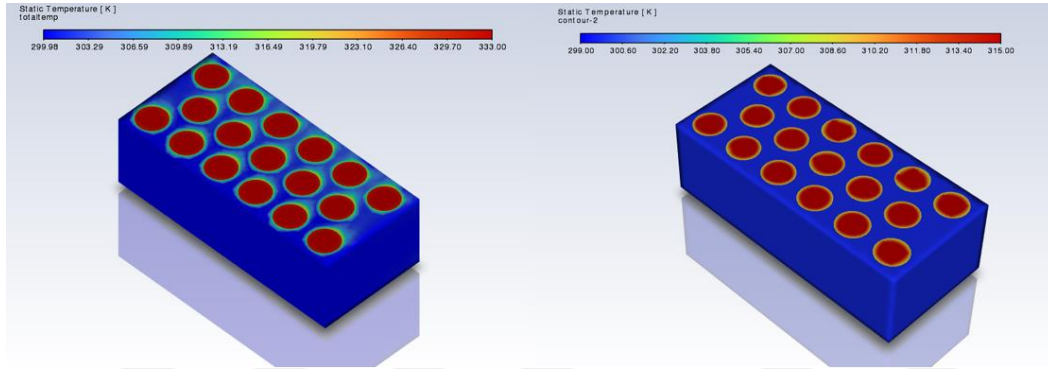
Bu çalışmada, Li-ion batarya hücrelerinin aralarına yerleştirilen FDM ısı iletim destekli katmanlar yardımıyla soğutulması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda hem ağ yapısı hem de akış, türbülans ve yakınsama davranışları detaylı olarak incelenmiştir.

İlk olarak analiz için oluşturulan mesh yapısı Şekil 3.2 ile gösterilmektedir. Hücreler silindirik yapıda modellenmiş olup, her biri FDM ile çevrelenmiştir. Hücreler arasına FDM ısı iletim levhaları yerleştirilmiş ve bu bölgelerdeki mesh yoğunluğu daha da artırılmıştır. Bu sayede hem FDM'nin ısı transferine etkisi detaylı şekilde analiz edilebilmiş, hem de analiz doğruluğu artırılmıştır. FDM bölgesi ve modül dış çeperlerinde daha büyük boyutlu elemanlar kullanılarak çözüm süresi optimize edilmiştir.

FDM'nin bulunduğu bölgelerde akışın yön değiştirdiği ve türbülansın belirli noktalarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle batarya hücrelerinin üst kısımlarında eddy viskozite değerleri 10 Pa·s seviyelerine kadar çıkmakta, alt kısımlarda ise bu değerler 1–3 Pa·s aralığında kalmaktadır. Bu durum, doğal konveksiyonla birlikte FDM'nin de etkisiyle akışın yönlendirildiğini ve ısının hücrelerden etkin şekilde uzaklaştırıldığını göstermektedir.

Analiz sürecindeki yakınsama durumu Şekil ile sunulmuştur. 150 iterasyon boyunca takip edilen çözümde özellikle enerji denkleminde hızlı ve kararlı bir yakınsama görülmüştür. Energy kalıntısı $1e^{-12}$ seviyelerine düşerek sabitlenmiştir. x, y ve z yönündeki momentum kalıntıları da $1e^{-03} - 1e^{-04}$ aralığında salınım göstererek çözümün stabilitesini ortaya koymuştur. Özellikle FDM'nin etkisiyle oluşan ısı dağılımı ve akış düzeni, çözüm sürecine olumlu katkı sağlamış, continuity ve epsilon kalıntılarının da düşük seviyede sabitlenmesini desteklemiştir.

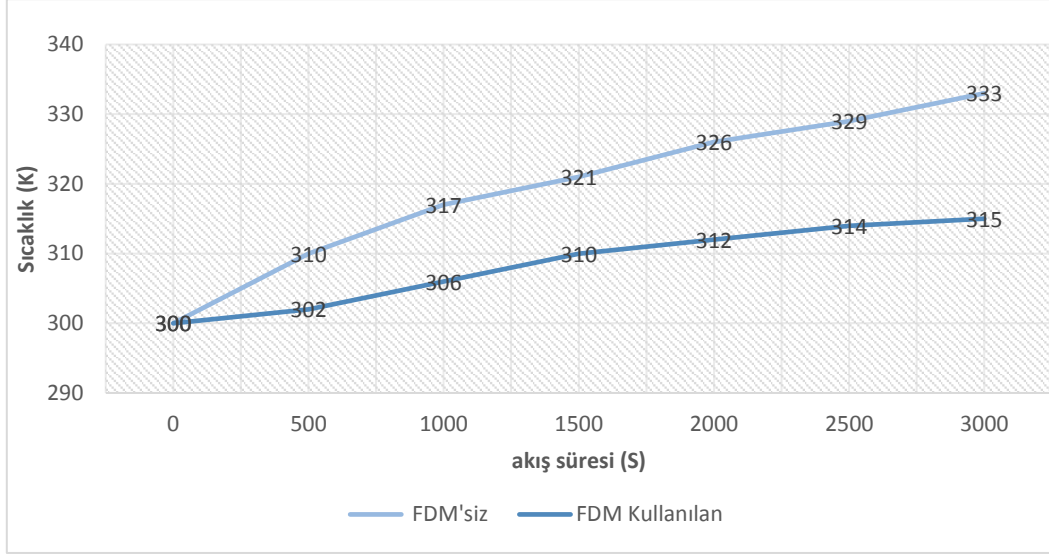
FDM'nin erime sıcaklığına ulaşılmasıyla birlikte bir faz değişimi gerçekleşmiş ve bu süreçte çevreden ısı absorbe edilmiştir. Bu ısı emilimi, sıcaklık artış hızını yavaşlatarak bataryanın daha güvenli bir termal aralıkta çalışmasına olanak tanımıştır. Bu mekanizma, termal kaçak riskini azaltmakta ve batarya hücrelerinin ömrünü uzatmaktadır. Elde edilen sonuçlar, FDM'nin batarya termal yönetim sistemlerine entegrasyonunun etkili bir pasif soğutma çözümü sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yöntem, termal güvenliği artırmakta, çalışma kararlılığını sağlamakta ve elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion batarya paketlerinin uzun vadeli performansına ve güvenilirliğine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 4.1 FDM kullanılan ve kullanılmayan batarya sistemlerinin sıcaklık profilleri

Şekil 4.1'de de gösterildiği üzere, FDM entegrasyonlu ve entegrasyonsuz batarya hücrelerinin sıcaklık değişimi, termal performanstaki farkı açık bir şekilde ortaya koymaktadır. FDM bulunmayan durumda, batarya hücresinin sıcaklığı sürekli olarak artmakta ve 3600 saniyelik simülasyon süresinin sonunda yaklaşık 333 K'e ulaşmaktadır. Buna karşılık, FDM'nin kullanıldığı durumda sıcaklık artışı belirgin şekilde bastırılmakta ve sıcaklık 315 K civarında sabitlenmektedir. Bu davranış, faz değişim malzemesinin erime sürecinde gösterdiği gizli ısı absorpsiyonu kapasitesine bağlanmakta ve sıcaklık artışını etkin bir şekilde geciktirmektedir.

Batarya termal yönetiminde FDM'lerin etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında, FDM'nin batarya sıcaklık profiline olan etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Şekil 4.2'de, FDM kullanılan ve kullanılmayan durumlar için pilin sıcaklık değişimi, zamanla (akış süresiyle) karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.2 FDM'li/FDM'siz pilin termal tepki grafiği

Şekil 4.2'de de gösterildiği üzere, FDM'siz sistemde sıcaklık zamanla düzenli bir artış göstermekte olup, 3000 saniyelik akış süresinin sonunda yaklaşık 333 K seviyelerine ulaşmaktadır. Bu durum, bataryanın yüksek sıcaklıklara maruz kaldığını ve termal kaçak riskinin arttığını göstermektedir. Grafik oluşturulurken her bir durumda batarya yüzeylerinden ve modül ortalamasından elde edilen sıcaklık değerleri esas alınmıştır.

Öte yandan, FDM entegre edilen batarya sisteminde, sıcaklık artışı belirgin şekilde bastırılmış ve sıcaklık değerleri yaklaşık 315 K seviyelerinde sabitlenmiştir. Bu iyileşme, FDM'nin erime sürecinde çevreden gizli ısı absorbe etmesi sayesinde gerçekleşmiştir. FDM, faz değişimi sırasında çevresinden önemli miktarda ısı çekerek sıcaklık artışını geciktirmekte ve böylece sistemin daha uzun süre güvenli bir sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamaktadır.

5

SONUÇ

Bu çalışmada, Li-ion batarya modülünün FDM kullanılarak pasif soğutulmasına yönelik gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, sistemin termal davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, FDM'nin ısı yönetimi üzerindeki etkilerini ortaya koymakta ve bu sonuçlar literatürde yer alan aktif soğutma sistemleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Sayısal analizler sonucunda, FDM entegre edilmiş sistemde batarya hücresinin 3000 saniyelik akış süresi boyunca maksimum sıcaklık değeri 315 K, minimum sıcaklık değeri ise 300 K olarak belirlenmiştir. Bu da yalnızca 15 K'lik bir sıcaklık farkı ile sistemin oldukça dengeli ve güvenli bir termal aralıkta çalıştığını göstermektedir. Hız vektörü analizine göre, FDM'nin katı-hâl özellikleri gereği herhangi bir akışkan hareketi gözlenmemiş ve maksimum hız değeri yaklaşık 1.19×10^{-21} m/s ile ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Bu bulgular, ısı transferinin yalnızca iletim (conduction) ve gizli ısı alma (latent heat absorption) mekanizmaları yoluyla gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Literatürde, hava soğutmalı sistemlerde sıcaklık farkının genellikle 20 K'nin üzerinde olduğu ve bu sistemlerin fan gibi ek donanımlarla enerji tüketimini artırdığı belirtilmektedir [78]. Sıvı soğutmalı sistemler ise yüksek soğutma kapasitesine sahip olmakla birlikte, karmaşık borulama, pompa ve bakım gereklilikleri gibi dezavantajlar barındırmaktadır [79]. Bu kapsamda, Tablo 5.1'de, bu çalışmada elde edilen termal performans verileri ile literatürde yer alan hava ve sıvı soğutmalı sistemlere ait temel performans parametreleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 5.1 Farklı soğutma yöntemlerinin termal performanslarının karşılaştırılması

[79]

Soğutma Yöntemi	Maks. Sıcaklık (K)	Min. Sıcaklık (K)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Ort. Hız (m/s)	Yorumlar
Faz Değişim Malzemesi	315	300	15	$\sim 1.19 \times 10^{-21}$	Düşük sıcaklık farkı, pasif ve sessiz soğutma
Hava Soğutmalı Sistem	333	300	33	$\sim 1.2 - 3.5$	Yüksek ΔT , fan ihtiyacı, düşük verim
Sıvı Soğutmalı Sistem	330	300	30	$\sim 0.01 - 0.05$	Yüksek soğutma verimi, karmaşık altyapı

Bu sonuçlar doğrultusunda, FDM'in sistemde bir termal tampon görevi gördüğü, aşırı ısıyı absorbe ederek bataryayı daha güvenli sıcaklık aralıklarında tuttuğu söylenebilir. Bu durum, yalnızca termal kararlılığı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda termal kaçak riskini azaltmakta ve potansiyel olarak batarya ömrünü uzatmaktadır. Sıcaklık değişim eğilimleri, FDM'in Li-ion batarya sistemleri için etkili bir pasif termal yönetim stratejisi sunduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Elde edilen bulgular, FDM tabanlı pasif soğutma sistemlerinin, özellikle aktif hava ve sıvı soğutmalı sistemlere kıyasla dikkat çekici avantajlar sunduğunu göstermektedir. FDM ile sağlanan 15 K'lik düşük sıcaklık farkı, sıvı soğutmalı sistemlerle benzer düzeyde bir termal performans elde edilmesini sağlarken; ek enerji tüketimine ihtiyaç duyulmaması, hareketsiz (sessiz) çalışma ve yapısal sadelik gibi önemli üstünlükler kazandırmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, FDM kullanımının batarya termal yönetim sistemlerinde etkili bir pasif soğutma stratejisi sunduğunu göstermektedir. Ancak,

bu konudaki araştırmaların derinleştirilmesi ve sistemin daha geniş koşullarda değerlendirilmesi için aşağıdaki geliştirme ve araştırma nerileri sunulmaktadır:

- Pasif soğutmanın yanı sıra düşük güçlü fan ya da sıvı sirkülasyonu gibi aktif sistemlerle hibrit bir yapı oluşturularak performans ve enerji verimliliği artırılabilir.
- Batarya hücrelerinin birden fazla şarj-deşarj döngüsünde maruz kaldığı termal yükler altında FDM'nin uzun vadeli etkisi araştırılabilir.
- Akıllı sensörler yardımıyla sıcaklık kontrolü sağlanan bir sistemde, FDM davranışı izlenebilir ve geri bildirimli kontrol algoritmaları geliştirilebilir.
- Hücrelerin geometrik dizilimi (rneğin prizmatik veya pouch hücreler) ile FDM performansı arasındaki ilişki araştırılabilir.

KAYNAKÇA

- [1] “Advanced Thin Film Sodium Sulfur Battery,” Trans Ionics Corporation, The Woodlands, Texas, United States of America, Technical Report, 2005.
- [2] IEA, “Global EV Outlook 2022,” Global EV Outlook 2022, 2022. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/executive-summary> (accessed Jun. 01, 2022).
- [3] O. Egbue and S. Long, “Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions,” *Energy Policy*, vol. 48, no. 2012, pp. 717–729, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.009.
- [4] M. A. Melliger, O. P. R. van Vliet, and H. Liimatainen, “Anxiety vs reality – Sufficiency of battery electric vehicle range in Switzerland and Finland,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 65, no. August, pp. 101–115, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.08.011.
- [5] P. Z. Lévy, Y. Drossinos, and C. Thiel, “The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership,” *Energy Policy*, vol. 105, no. March, pp. 524–533, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.02.054.
- [6] A.A. Pesaran, Battery thermal models for hybrid vehicle simulations, *J. Power Sources* 110 (2) (2002) 377–382.
- [7] T.M. Bandhauer, S. Garimella, T.F. Fuller, A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries, *J. Electrochem. Soc.* 158 (3) (2011) R1.
- [8] H. Behi, D. Karimi, M. Behi, M. Ghanbarpour, J. Jaguemont, M.A. Sokkeh, F. H. Gandoman, M. Berecibar, J. Van Mierlo, A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 174 (2020), 115280.
- [9] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, Y. Yan, A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64 (2016) 106–128.
- [10] A. Palomino and M. Parvania, “Advanced charging infrastructure for enabling electrified transportation,” *Electr. J.*, vol. 32, no. 4, pp. 21–26, 2019, doi: 10.1016/j.tej.2019.03.003.
- [11] M. Baumhefner, R. Hwang, and P. Bull, “DRIVING OUT POLLUTION: How Utilities Can Accelerate the Market for Electric Vehicles,” 2016.
- [12] M. v. Reddy, A. Mauger, C. M. Julien, A. Paoletta, and K. Zaghbi, “Brief History of rly Lithium-Battery Development,” *Materials*, vol. 13, no. 8, p. 1884, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13081884.
- [13] Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419-2430.

- [14] M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg, and G. Gereffi, "Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain," 2010. [Online]. Available: <https://gvcc.duke.edu/cggclisting/lithium-ion-batteries-for-electric-vehicles-the-u-s-valuechain/>.
- [15] R. Kantharaj and A. M. Marconnet, "Heat Generation and Thermal Transport in Lithium-Ion Batteries: A Scale-Bridging Perspective," *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 128–156, 2019, doi: 10.1080/15567265.2019.1572679.
- [16] D. Galatro, M. Al-Zareer, C. Da Silva, D. A. Romero, and C. H. Amon, "Thermal behavior of Lithium-ion batteries: Aging, heat generation, thermal management and failure," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 14, pp. 1–18, 2020, doi: 10.5098/hmt.14.17.
- [17] E. Dickinson, "Batteries Partial-State-Of-Charge," *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. pp. 452–458, 2009, doi: 10.1016/B978-044452745-5.00877-7.
- [18] A. Masias, J. Marcicki, and W. A. Paxton, "Opportunities and Challenges of Lithium Ion Batteries in Automotive Applications," *ACS Energy Lett*, vol. 6, no. 2, pp. 621–630, Feb. 2021, doi: 10.1021/acseenergylett.0c02584.
- [19] S. O'Dea, "Lithium-ion batteries- statistics & facts Statista," <https://www.statista.com/topics/2049/lithium-ion-batteryindustry/#topicOverview>.
- [20] Inseok Seo, Steve W. Martin. *New Developments in Solid Electrolytes for Thin-Film Lithium Batteries*. INTECH Open Access Publisher; 2012.
- [21] A. SYSTEMS, "<http://www.a123systems.com>."
- [22] B. Xu, D. Qian, Z. Wang, and Y. S. Meng, "Recent progress in cathode materials research for advanced lithium ion batteries," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 73, no. 5–6, pp. 51–65, May 2012.
- [23] J. Salminen, T. Kallio, N. Omar, P. Van den Bossche, J. Van Mierlo, and H. Gualous, *Future Energy*. Elsevier, 2014, pp. 291–309.
- [24] C. de las Casas and W. Li, "A review of application of carbon nanotubes for lithium ion battery anode material," *J. Power Sources*, vol. 208, pp. 74–85, Jun. 2012.
- [25] J. B. Goodenough and Y. Kim, "Challenges for rechargeable batteries," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 16, pp. 6688–6694, Aug. 2011.
- [26] K. Zaghbi, J. Dubé, A. Dallaire, K. Galoustov, A. Guerfi, M. Ramanathan, A. Benmayza, J. Prakash, A. Mauger, and C. M. Julien, *Lithium-Ion Batteries*. Elsevier, 2014, pp. 437–460.
- [27] T. F. Yi, L. J. Jiang, J. Shu, C. B. Yue, R.-S. Zhu, and H.-B. Qiao, "Recent development and application of Li₄Ti₅O₁₂ as anode material of lithium ion battery," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 71, no. 9, pp. 1236–1242, Sep. 2010.
- [28] P. Kubiak, J. Geserick, N. Hüsing, and M. Wohlfahrt-Mehrens, "Electrochemical performance of mesoporous TiO₂ anatase," *J. Power Sources*, vol. 175, no. 1, pp. 510–516, Jan. 2008.
- [29] K. Sawai, R. Yamato, and T. Ohzuku, "Impedance measurements on lithium-ion battery consisting of Li[Li_{1/3}Ti_{5/3}]O₄ and LiCo_{1/2}Ni_{1/2}O₂," *Electrochim. Acta*, vol. 51, no. 8–9, pp. 1651–1655, Jan. 2006.
- [30] Pesaran, A. A. (2001). Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. *Battery Man*, 43(5), 34-49.

- [31] Z. Y. Jiang, Z. G. Qu, J. F. Zhang, and Z. H. Rao, "Rapid prediction method for thermal runaway propagation in battery pack based on lumped thermal resistance network and electric circuit analogy," *Appl. Energy*, vol. 268, no. March, p. 115007, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115007
- [32] S. K. Mohammadian and Y. Zhang, "Temperature uniformity improvement of an aircooled high-power lithium ion battery using metal and nonmetal foams," *J. Heat Transfer*, vol. 138, no. 11, pp. 2–5, 2016, doi: 10.1115/1.4033811.
- [33] J. Liang, Y. Gan, Y. Li, M. Tan, and J. Wang, "Thermal and electrochemical performance of a serially connected battery module using a heat pipe-based thermal management system under different coolant temperatures," *Energy*, vol. 189, p. 116233, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116233.
- [34] Y. Gan, J. Wang, J. Liang, Z. Huang, and M. Hu, "Development of thermal equivalent circuit model of heat pipe-based thermal management system for a battery module with cylindrical cells," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 164, no. October 2019, p. 114523, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114523.
- [35] H. Zhang, C. Li, R. Zhang, Y. Lin, and H. Fang, "Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 173, no. December 2019, p. 115216, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115216.
- [36] S. Basu, K. S. Hariharan, S. M. Kolake, T. Song, D. K. Sohn, and T. Yeo, "Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system," *Appl. Energy*, vol. 181, pp. 1–13, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.049.
- [37] Lane, G. A. (1986). *Solar heat storage: Latent heat materials. Volume II. Technology.* Dow Chemical Co., Midland, MI.
- [38] Agbossou, A., Zhang, Q., Sebald, G., & Guyomar, D. (2010). Solar micro-energy Harvesting based on thermoelectric and latent heat effects. Part I: Theoretical analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1), 277-283.
- [39] Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458.
- [40] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). 'Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,' *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 31-345.
- [41] Sadasuke, I., Naokatsu, M. (1991). Heat transfer enhancement by fin in latent heat Thermal energy storage devices. *ASME-JSME International Solar Energy Conference*, 223-228.
- [42] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 318-45.
- [43] S. Askar. Transient experimental study of a latent heat thermal energy storage in a phase change material-air-liquid heat exchanger. University of Windsor 2022.
- [44] Atinafu D. G., Dong W., Huang X., et. al. (2018). "Introduction of organic-organic eutectic PCM in mesoporous N-doped carbons for enhanced thermal conductivity and energy storage capacity", *Applied Energy*, 211:1203-1215, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.025>.

- [45] Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5(4), 329–332. <https://doi.org/10.1038/nclimate2564>
- [46] K. Young¹, C. Wang², L. Wang², “Electric Vehicle Battery Technologies,” Ovonic Battery Company¹, Rochester Hills, Michigan, United States of America and Wayne State University², Detroit, Michigan, United States of America, 2013.
- [47] D. Linden, T. Reddy, “Handbook of Batteries: Third Edition,” McGraw-Hill, 2002.
- [48] Pesaran AA. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *J Power Sources* 2002; 110:337–82.
- [49] Pesaran AA, Keyser M, Kim GH, Santhanagopalan S, and Smith K. Tools for designing thermal management of batteries in electric drive vehicles. In: Proceedings of the large lithium-ion battery technology & application symposia advanced automotive battery conference. Pasadena, CA;2013.
- [50] Ladrech F. Battery thermal management for HEV & EV – Technology overview. In: Proceedings of the Automotive Summit. 2010.
- [51] Sato N. Thermal Behaviour analysis of lithium-ion batteries for electric and Hybrid vehicles. *J Power Sources* 2001; 99:70–7.
- [52] Panasonic overview: Lithium ion batteries. 2007. Available (<http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf/ACA4000/ACA4000PE3.pdf>).
- [53] Khateeb SA, Amiruddin S, Farid M, Sleman JR, Al-Hallaj S. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooter: Experiment validation. *J Power Sources* 2005; 142:345–53.
- [54] N. Omar, M. A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, and J. Van Mierlo, “Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, Jan. 2014.
- [55] Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
- [56] P. Crovetto, “Electric and Electronic Systems for Vehicles: Electric Systems in Vehicles,” Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2012.
- [57] Al-Wreikat, Y.; Serrano, C.; Sodr , J.R. Driving behaviour and trip condition effects on the energy consumption of an electric vehicle under real-world driving. *Appl. Energy* 2021, 297, 117096.
- [58] Younsun Kim, Ingeol Lee and Sungho Kang, Eco Assist Techniques through Real-time Monitoring of BEV Energy Usage Efficiency, 2015.
- [59] Azizi Y, Sadrameli SM. Thermal management of a LiFePO₄ battery pack at high temperature environment using a composite of phase change materials and aluminum wire mesh plates. *Energy Convers Manag* 2016; 128:294–302. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.081>.
- [60] Bais A, Subhedar D, Panchal S. Experimental investigation of longevity and temperature of a lithium-ion battery cell using phase change material based battery thermal management system. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.103>.
- [61] Ni R, Zhang D, Wang R, Xie Z, Wang Y. Prevention and suppression effects of phase change material on thermal runaway in batteries. *Case Stud Therm Eng* 2023;48: 103160. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103160>.

- [62] Sudhakaran S, Terese M, Mohan Y, Thampi AD, Rani S. Influence of various parameters on the cooling performance of battery thermal management systems based on phase change materials. *Appl Therm Eng* 2023; 222:119936. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119936>.
- [63] Rubitherm GmbH, (n.d.). <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt> (accessed August 10, 2021).
- [64] Bais, A.R.; Subhedar, D.G.; Panchal, S. Critical thickness of nano-enhanced RT-42 paraffin based battery thermal management system for electric vehicles: A numerical study. *J. Energy Storage* 2022, 52, 104757.
- [65] Lee, S.; Han, U.; Lee, H. Development of a hybrid battery thermal management system coupled with phase change material under fast charging conditions. *Energy Convers. Manag.* 2022, 268, 116015.
- [66] Wang, S.; Zhang, D.; Li, C.; Wang, J.; Zhang, J.; Cheng, Y.; Mei, W.; Cheng, S.; Qin, P.; Duan, Q.; et al. Numerical optimization for a phase change material based lithium-ion battery thermal management system. *Appl. Therm. Eng.* 2023, 222, 119839.
- [67] Xin, Q.; Yang, T.; Zhang, H.; Yang, J.; Zeng, J.; Xiao, J. Experimental and numerical study of lithium-ion battery thermal management system using composite phase change material and liquid cooling. *J. Energy Storage* 2023, 71, 108003.
- [68] Malik, M.; Dincer, I.; Rosen, M.; Fowler, M. Experimental Investigation of a New Passive Thermal Management System for a Li-Ion Battery Pack Using Phase Change Composite Material. *Electrochim. Acta* 2017, 257, 345–355.
- [69] Hussain, A.; Tso, C.Y.; Chao, C.Y.H. Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite. *Energy* 2016, 115, 209–218.
- [70] Li, Y.; Chen, Z.; Feng, Y.; Liu, M.; Kang, C.; Yang, K.; Yuan, J.; Qiu, C.; Shi, H.; Jiang, Y. A novel petal-type battery thermal management system with dual phase change materials. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2023, 207, 123989.
- [71] Du, W.; Chen, S. Effect of mechanical vibration on phase change material based thermal management module of a lithium-ion battery at high ambient temperature. *J. Energy Storage* 2023, 59, 106465.
- [72] B.o. Zhao, C. Li, Y.i. Jin, C. Yang, G. Leng, H. Cao, Y. Li, Y. Ding, Heat transfer performance of thermal energy storage components containing composite phase change materials, *IET Renew. Power Gener.* 10 (10) (2016) 1515–1522.
- [73] Z. Liu, Y. Yao, H. Wu, Numerical modeling for solid–liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage, *Appl. Energy.* 112 (2013) 1222–1232.
- [74] P. Wang, X. Wang, Y. Huang, C. Li, Z. Peng, Y. Ding, Thermal energy charging behaviour of a heat exchange device with a zigzag plate configuration containing multi-phase-change-materials (m-PCMs), *Appl. Energy.* 142 (2015) 328–336.
- [75] C.Y. Zhao, W. Lu, Y. Tian, Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs), *Sol. Energy.* 84 (8) (2010) 1402–1412.
- [76] M. Esapour, A. Hamzehnezhad, A.A.R. Darzi, M. Jourabian, Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system, *Energy Convers. Manag.* 171 (2018) 398–410.

- [77] C. Qiu, C. Wu, X. Yuan, L. Wu, J. Yang, and H. Shi, “Multi-objective optimization of PCM-fin structure for staggered Li-ion battery packs,” *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 71, no. 4, Art. no. e145677, 2023, doi: 10.24425/bpasts.2023.145677.
- [78] Pesaran, A. A. (2001). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377–382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)
- [79] Kim, G. H., Smith, K., Ireland, J., & Pesaran, A. (2007). Modeling and Simulation of a Battery Pack Thermal Management System for Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 158(1), 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.045>



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

M. Sandıkçı ve Ş. Pusat, “Passive Cooling Of L1-Ion Batteries Using Phase Change Materials” ICES 2025 – International Conference on Energy Systems, Istanbul, May 2025, pp. 166-169. ISBN: 978-625-00-6886-1

