

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN
BATARYA MODÜLÜNÜN ISIL PERFORMANSININ
SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Harun DURSUN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN BATARYA MODÜLÜNÜN ISIL
PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Harun DURSUN
511925003

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2024

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN BATARYA MODÜLÜNÜN ISIL PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Harun DURSUN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlarla kıyaslandığında, elektrikli araçlarda iyileştirilebilir noktaların en önemlileri aracın menzili ve şarj süresidir. Bu iki ana noktanın iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için dünya çapında çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Batarya performansını ve araç menzilini etkileyen en önemli parametrelerden biri, bataryanın ısı performansıdır.

Bataryalar, belirli sıcaklık aralıklarında daha verimli çalışmaktadır. Ancak bataryaların çalışma prensibi gereği ohmik dirençler ve entropik ısı değişimlerinden dolayı operasyon sırasında deşarj oranına bağlı olarak ısınma eğilimindedirler. Artan ısı ile beraber bataryaların çalışma sıcaklıklarının artması hem batarya kullanım verimini düşürmektedir hem de hücrelerin zarar görme olasılığını ortaya çıkarır. Bu yüzden, batarya sistemlerinde hava ya da sıvı temelli soğutma sistemlerinden faydalanılmaktadır. Ayrıca batarya sisteminde, batarya ve soğutma/ısıtma sistemine entegre halde çalışan ve bataryadan maksimum verimi elde etmeyi ve bataryanın zarar görmesini engellemeyi amaçlayan bir batarya ısı yönetim sistemi kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada, ilk aşama olarak Ansys – Fluent programında çalışmada kullanılacak olan Toshiba LTO 23 Ah tekil batarya hücresi için batarya hücre modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise oluşturulan batarya hücre modeli ile tekil hücrenin farklı deşarj oranlarında (1 C-4 C) ısı davranışları incelenmiştir. Üçüncü aşamada, bir batarya modülü olarak 2S2P şeklinde bağlanmış dörtlü hücrenin ısı davranışları hakkında simülasyonlar yürütülmüştür. Dördüncü aşamada, dörtlü hücreye uygulanan klasik bir serpantin soğutucu ve yeni tasarlanan bir soğutucu plakanın ısı davranışa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Son aşamada ise yapılan sayısal çalışmaların validasyonu için çeşitli deneyler yapılmış ve sayısal sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batarya termal yönetimi, elektrikli araç, soğutucu plaka, termal optimizasyon

2024, xi +105 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF BATTERY MODULE USED IN ELECTRIC VEHICLES

Harun DURSUN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied
Sciences Department of Automotive
Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Compared to vehicles with conventional internal combustion engines, the most important improvement points in electric vehicles are the vehicle's range and charging time. A wide variety of studies are carried out around the world to improve and develop these two main points. One of the most important parameters affecting the range of the vehicle is the thermal performance of the battery.

Batteries operate more efficiently in certain temperature ranges. However, due to the working principle of batteries, they tend to heat up in varying amounts depending on the discharge rate during operation due to ohmic resistances and entropic heat changes. The increase in the operating temperatures of the batteries together with the increasing temperature both decreases the battery usage efficiency and reveals the possibility of damage to the cells. Therefore, air or liquid-based cooling systems are used in battery systems. In addition, a battery thermal management system can be used in the battery system, which works in integration with the battery and the cooling/heating system and aims to obtain maximum efficiency from the battery and to prevent the battery from being damaged.

In this study, as a first step, a battery cell model was created for the Toshiba LTO 23 Ah single battery cell that will be used in the study in the Ansys – Fluent program. In the second step, the thermal behavior of the single cell at different discharge rates (1 C-4 C) was investigated with the battery cell model created. In the third step, simulations were carried out on the thermal behavior of the four cell connected as a 2S2P battery module. In the fourth step, the effects of a classical serpentine cooler and a newly designed cooling plate applied to the module on the thermal behavior were numerically investigated. In the last stage, various experiments were carried out for the validation of the numerical studies and compared with the numerical results.

Key words: Battery thermal management, electric vehicle, cold plate, thermal optimization

2024, xi + 105 pages.

TEŞEKKÜR

Lisans sürecimden doktora eğitim sürecimin sonuna kadar beni yönlendiren, bilgilendiren ve her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yeterlik sürecim ve tez sürecim boyunca bana rehberlik eden değerli hocalarım Prof. Dr. Rukiye ERTAN ve Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya teşekkürü borç bilirim.

219M475 nolu proje ile 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ve 22AG001 “Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu” (BATEG) kapsamında çalışmaların gerçekleşmesi konusunda verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Sabır ve anlayışıyla her zaman desteğini hissettiğim sevgili eşim Seher DURSUN'a, çalışmam boyunca sevgisinden güç aldığım oğlum Barış'a ve beni bugünlere gelmemi sağlayan annem Fatma DURSUN'a, babam Ramazan DURSUN'a, ablam Mevlide KARAMUS'a ve kardeşlerim Emirhan ve Eren'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Harun DURSUN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Kaynak Araştırması	4
2.2. Kuramsal Temeller	8
2.2.1. Araç teknolojileri.....	8
2.2.2. Bataryalar	13
2.2.3. Li-ion bataryalar ve özellikleri	16
2.2.4. Batarya termal yönetim sistemleri.....	24
2.2.5. Li-ion batarya karakteristikleri	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM	39
3.1. Batarya Modülü ve Deneysel Sistem	39
3.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Veri Alma Sistemi	47
3.3. Batarya Modülü İçin CAD Modeli ve Mesh Yapısı	48
3.4. Çözümlemelerde Kullanılan Batarya Modeli ve İlgili Denklemler	51
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	58
4.1. Tedarikçi Verilerinden Simülasyon Modeli Oluşturulması	58
4.2. Deney Sonuçları ve Sonuçların Validasyonu.....	63
4.3. Mesh Bağımsızlık Analizi	68
4.4. Soğutucu Blok İçeren Batarya Modülü Simülasyon Sonuçları.....	69
5. SONUÇ.....	99
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	106

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Amper
Ah	Amper-saat
C	Deşarj oranı
C _p	Akışkanın özgül ısısı
C _{ref}	PET hesabında kullanılan batarya kapasitesi
g	Gram
<i>g</i>	Yer çekimi ivmesi
h	saat
I	Akım
I _{bat}	Şarj/deşarj akımı
<i>k</i>	Isıl iletkenlik
K	Kelvin
kg	Kilogram
L	Litre
mm	Milimetre
Pa	Pascal
<i>pos</i>	Pozitif elektrot
<i>neg</i>	Negatif elektrot
q _{ech}	Elektrokimyasal reaksiyonlar ile oluşan ısı üretimi
S	Hacimsel ısı üretimini içeren kaynak terimi
sn	Saniye
t	Zaman
T	Sıcaklık
<i>u, v, w</i>	Sırasıyla x, y ve z yönündeki hız bileşenleri
V	Voltaj
<i>Vol</i>	Batarya hücresi aktif bölge hacmi
W	Watt
Wh	Watt-saat
∂p	Basınç düşüşü
°C	Santigrat derece
∇	Gradyan
Δ	Delta
ρ	Yoğunluk
σ	Elektrik iletkenliği
ν	Kinematik viskozite
Φ	Dağılım fonksiyonu
φ	Elektrik potansiyeli
Ω	Ohm

Kısaltmalar	Açıklama
BMS	Batarya Yönetim Sistemi
BTYS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
CAN	Denetleyici Alanı Ağı
DoD	Deşarj Derinliği
ECM	Eşdeğer Devre Modeli

EV	Tam Elektrikli Araç
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HVAC	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
HEV	Hibrit Elektrikli Araç
IR	Kızılötesi Kamera
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
Li-ion	Lityum İyon
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
MOR	Model Sırası Azaltma
MSMD	Çok Ölçekli Çok Alanlı
NCA	Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
Ni-Cd	Nikel Kadmiyum
NiMH	Nikel Metal Hidrür
NMC	Manganez Kobalt Oksit
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kim Modeli
OCV	Açık Devre Voltajı
PCM	Faz Değiştirici Malzeme
PET	Parametre Tahmin Aracı
SCIB	Süper Şarj İyon Pil
SEI	Katı Elektrolit İnterfaz
SoC	Batarya Şarj Durumu
SoH	Batarya Sağlık Durumu
SPEBM	Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli
USB	Evrensel Seri Veriyolu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Euro Emisyon Standartları ve geçerli olduğu yıllar (Deka vd. 2022).....	2
Şekil 1.2. Global plug-in elektrikli araç satışları (Lebrouhi vd. 2022)	3
Şekil 2.1. İçten yanmalı motorlu araçlar tahrik sistemi (Lu vd. 2012)	9
Şekil 2.2. Tam elektrikli araçlar tahrik sistemi (Mcculloch, Bishop, ve Doucette 2012)	9
Şekil 2.3. Hibrit araç tahrik sistemleri a) paralel, b) seri, c) power-split (seri/paralel) (Liu ve Peng 2008)	10
Şekil 2.4. Yakıt hücresi araçlar tahrik sistemi (Manoharan vd. 2019)	12
Şekil 2.5. Farklı batarya teknolojileri için hacimsel ve kütleli enerji yoğunluğu (Miao vd. 2019)	15
Şekil 2.6. Bir Li-ion bataryanın şematik çalışma prensibi (Hordé, Achard, ve Metkemeijer 2012).....	17
Şekil 2.7. Li-ion teknoloji karşılaştırması a) LTO, b) LCO, c) LMO, d) LFP, e) NMC, f) NCA (Saldaña vd. 2019)	20
Şekil 2.8. Tasarımlarına göre batarya hücreleri a) silindirik, b) pouch, c) prizmatik.....	23
Şekil 2.9. Farklı Li-ion batarya tasarımlarının karşılaştırılması.....	23
Şekil 2.10. Li-ion bataryalarının çalışma sıcaklık aralıkları ve etkileri (Wang vd. 2019)	25
Şekil 2.11. Hava bazlı ısı yönetim türleri: a) Pasif hava soğutma, b) Pasif hava soğutma ve ısıtma, c) aktif hava soğutma ve ısıtma.....	27
Şekil 2.12. Pasif ve aktif soğutma/ısıtma çevrimleri (Hong, Wang, ve Liu 2017).....	30
Şekil 2.13. Hava ve sıvı soğutma için genel değerlendirme (Chen vd. 2015; Yeow vd. 2012)	31
Şekil 2.14. Faz değişim malzemesinin sıcaklık-enerji depolama grafiği (Yang vd. 2019).....	33
Şekil 2.15. Farklı deşarj oranlarına bağlı voltaj – kapasite grafiği (Lu vd. 2015).....	34
Şekil 2.16. Deşarj derinliğine bağlı batarya çevrim sayısı.....	36
Şekil 2.17. Oda sıcaklığında açık devre voltajı ve SOC% karşılaştırılması (Plett 2004).....	37
Şekil 2.18. Farklı deşarj akımları ve SOC seviyeleri için iç direnç değerlerinin değişimi (Kim vd. 2013).....	38
Şekil 3.1. a) Li-ion batarya hücresinin ana bileşenleri, b) Tez çalışmasında belirlenen Li-ion bataryanın ana ölçüleri (mm)	39
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan batarya hücrelerinin 25 °C’deki deşarj oranı karakteristiği.....	41
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan batarya hücrelerinin çeşitli sıcaklıklardaki deşarj oranı karakteristiği.....	42
Şekil 3.4. (a) Çalışmada kullanılan deneysel sistemin şematik gösterimi (b) çalışma için geliştirilen batarya modülü, (c)	

	deşarj prosesi için elektrik yükü, (d) sıcaklık sensörleri, (e) LCD monitör.....	43
Şekil 3.5.	Tez çalışmasında kurulan 8S2P batarya modülünün elektriksel bağlantısı.....	45
Şekil 3.6.	İncelenecekdeşarj oranlarına göre yapılan hesaplamalar ve tercih edilen sistem koşulları.....	46
Şekil 3.7.	(a) Deneysel sistemde sıcaklık ölçümü alınan lokasyonlar, (b) deney verilerini toplama sistemi.....	48
Şekil 3.8.	Multizone yöntemi ile mesh işlemi yapılmış batarya hücresi	49
Şekil 3.9.	(a) çok kanallı soğutucu plaka ve batarya grubu CAD dosyası, (b) serpantin soğutucu plaka ve batarya grubu CAD dosyası, (c) alt soğutucu plaka ve batarya grubu CAD dosyası.....	49
Şekil 3.10.	Multizone yöntemi ile oluşturulan (a) çok kanallı soğutucu plaka mesh yapısı, (b) serpantin soğutucu plaka mesh yapısı, (c) alt soğutucu plaka mesh yapısı, (d) batarya modülü mesh yapısı.....	50
Şekil 3.11.	Batarya simülasyon modelinin ana girdi ve çıktıları.....	54
Şekil 3.12.	Tez çalışmasında yürütülen çalışmanın temel şeması.....	57
Şekil 4.1.	1 C ve 2 Cdeşarj oranı (23 A ve 46 A) için tedarikçi test sonuçları ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.2.	3 C ve 4 Cdeşarj oranı (69 A ve 92 A) için tedarikçi test sonuçları ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.3.	Tümdeşarj oranları için DOD – Voltaj grafikleri a) Tedarikçi verileri, b) Simülasyon sonucu elde edilen veriler.....	60
Şekil 4.4.	Tümdeşarj oranları için sayısal model sıcaklık (K) sonuçları	61
Şekil 4.5.	1 Cdeşarj oranları (23 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları.....	61
Şekil 4.6.	2 Cdeşarj oranları (46 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları.....	62
Şekil 4.7.	3 Cdeşarj oranları (69 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları.....	62
Şekil 4.8.	4 Cdeşarj oranları (92 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları.....	63
Şekil 4.9.	Batarya modülü için sayısal olarak elde edilen sıcaklık (K) dağılımı.....	64
Şekil 4.10.	Üç farklıdeşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının voltaj – zaman grafiği karşılaştırması.....	65
Şekil 4.11.	Üç farklıdeşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının voltaj – DOD grafiği karşılaştırması.....	66
Şekil 4.12.	Üç farklıdeşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının ortalama sıcaklık – zaman grafiği karşılaştırması.....	67
Şekil 4.13.	Mesh bağımsızlık analizinin sayısal sonuçları.....	68
Şekil 4.14.	Serpantin kanallı batarya modülü için CAD modeli.....	69

Şekil 4.15.	Serpantin kanallı batarya modülü için 4 C deşarj akımında $t=900$ sn için elde edilen sıcaklık (K) dağılımı.....	70
Şekil 4.16.	Çok kanallı soğutucu blok için oluşturulan CAD modeli.....	71
Şekil 4.17.	Batarya paketi için geliştirilen çok kanallı soğutucu blok CAD modeli detayı.....	72
Şekil 4.18.	çok kanallı soğutucu blok kullanılarak batarya modülü için 4 C deşarj akımında $t=900$ sn için elde edilen sıcaklık (K) dağılımı.....	73
Şekil 4.19.	Serpantin soğutucu blok ve çok kanallı soğutucu blok kullanılarak bataryalar için elde edilen ortalama sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği.....	74
Şekil 4.20.	Çok kanallı soğutucu blok kullanımının sıcaklık dağılımına etkisi.....	75
Şekil 4.21.	Sekiz adet batarya hücresi için tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilen çok kanallı soğutucu blok.....	76
Şekil 4.22.	Her iki blok için sayısal olarak elde edilen toplam basınç düşümünün karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.23.	Test, çok kanallı soğutucu plaka, serpantin ve alt soğutucu ile voltaj – zaman grafiği.....	78
Şekil 4.24.	Çok kanallı soğutucu plaka ile meydana gelen sıcaklık dağılımları a) 1 C deşarj oranında, b) 3,50 C deşarj oranında, c) 4,25 C deşarj oranında.....	79
Şekil 4.25.	Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği.....	80
Şekil 4.26.	Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	81
Şekil 4.27.	Soğutmasız ve Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği.....	82
Şekil 4.28.	Soğutmasız ve soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	83
Şekil 4.29.	Serpantin plakalı batarya modülü yüzey sıcaklığı ve akış çizgileri.....	84
Şekil 4.30.	Serpantin plaka ile sıcaklık dağılımları a) 1 C deşarj oranında, b) 3,50 C deşarj oranında, c) 4,25 C deşarj oranında	85
Şekil 4.31.	Serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği.....	86
Şekil 4.32.	Serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	87
Şekil 4.33.	Soğutmasız ve serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği.....	88
Şekil 4.34.	Soğutmasız ve serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	89
Şekil 4.35.	Altan soğutmalı batarya modülü mesh yapısı ve soğutucu akış çizgileri.....	90
Şekil 4.36.	Altan soğutma ile meydana gelen sıcaklık dağılımları a) 1 C deşarj oranında, b) 3,50 C deşarj oranında, c) 4,25 C deşarj oranında.....	91

Şekil 4.37.	Alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık – zaman grafiği.....	92
Şekil 4.38.	Alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	93
Şekil 4.39.	Soğutmasız ve alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği.....	94
Şekil 4.40.	Soğutmasız ve alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği.....	95
Şekil 4.41.	Soğutma gruplarının tüm deşarj değerlerinde oluşan sıcaklık dağılımı.....	96



ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Elektrikli araçların bazı avantaj ve dezavantajları.....	12
Çizelge 2.2.	Lityum batarya modellerinin bazı avantajları ve dezavantajları (Hannan ve ark. 2018, Oliveira ve ark. 2021)..	18
Çizelge 2.3.	Endüstriyel uygulamalarda BTYS için kullanılan hava soğutma sistemlerinin özeti.....	28
Çizelge 2.4.	Deşarj oranlarına bağlı batarya çalışma değerleri.....	35
Çizelge 3.1.	Tez çalışmasında kullanılan batarya hücrelerinin özellikleri	40
Çizelge 3.2.	Batarya modülü deney bileşenleri.....	44
Çizelge 3.3.	Tezin deneysel çalışmalarında kullanılan batarya modülünün karakteristiği.....	47
Çizelge 3.4.	Deneysel sistemde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri	47
Çizelge 3.5.	Nümerik simülasyonlarda kullanılan sınır şartları.....	53
Çizelge 3.6.	MSMD model için malzeme özellikler.....	56
Çizelge 4.1.	Sayısal simülasyonlarda kullanılan başlangıç ve sınır şartları	73
Çizelge 4.2.	Teorik ve HAD ile toplam basınç düşümü değerlerinin karşılaştırılması.....	77
Çizelge 4.3.	Soğutmasız ve soğutmalı simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	96

1. GİRİŞ

Elektrikli otomobil, bataryalardan ve diğer enerji depolama cihazlarından aldığı elektriği elektrik motorları vasıtası ile kullanan ve hareketini elektrik enerjisinden sağlayan otomobillerdir (Helmers & Marx, 2012). Elektrik motorları ani tork ve güç almaya olanak sağlar.

18. yüzyılın sonlarında sanayi devriminin gerçekleşmesi ile tarım ve üretim alanında endüstrileşme hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Ulaşım sektörü de bu endüstrileşmeye ayak uydurmuş ve çeşitli enerji kaynaklarını tekerlekli araçları hareket ettirmek için kullanmıştır. 19. Yüzyılın sonlarında elektrik ve manyetizma alanlarında ortaya çıkan keşiflerle birlikte ilk elektrik ile çalışan araçlar üretilmiştir. Fosil yakıtlar ile çalışan araçların ilk ortaya çıkışı da yine yakın bir döneme denk gelmiştir. Elektrikli otomobiller, 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında konforu, kullanım kolaylığı ve gürültüsüz çalışması göz önüne alındığında içten yanmalı motorlardan daha geçerli bir taşıt olarak görülüyordu. Ancak petrol bulmanın kolaylaşması, deponun kısa bir sürede doldurulabilmesi ve içten yanmalı motor teknolojisindeki hızlı gelişmeler elektrikli araçların o dönem için kullanımını verimsiz hale getirdi. Fosil yakıtlı araçların uzun bir süre boyunca yaygın olarak kullanımı atmosfere büyük miktarlarda emisyon salınmasına sebep olmuştur.

Artan dünya nüfusu da düşünüldüğünde kaçınılmaz olarak artan emisyonlar, günümüz dünyasında iklimi küresel ölçekte tehdit etmektedir. İklim değişikliği tehlikesinin hissedilebilir seviyelere gelmesi ile emisyonların azaltılması için pek çok alanda adımlar atılmaktadır. Bunlardan biri 2007 yılının şubat ayında imzalanan hükümetler arası iklim değişikliği panelidir. Bu panelde yayınlanan ortak metinde, ısı artışlarındaki ana faktörün insan olduğu belirtilmiştir (Quadrelli & Peterson, 2007).

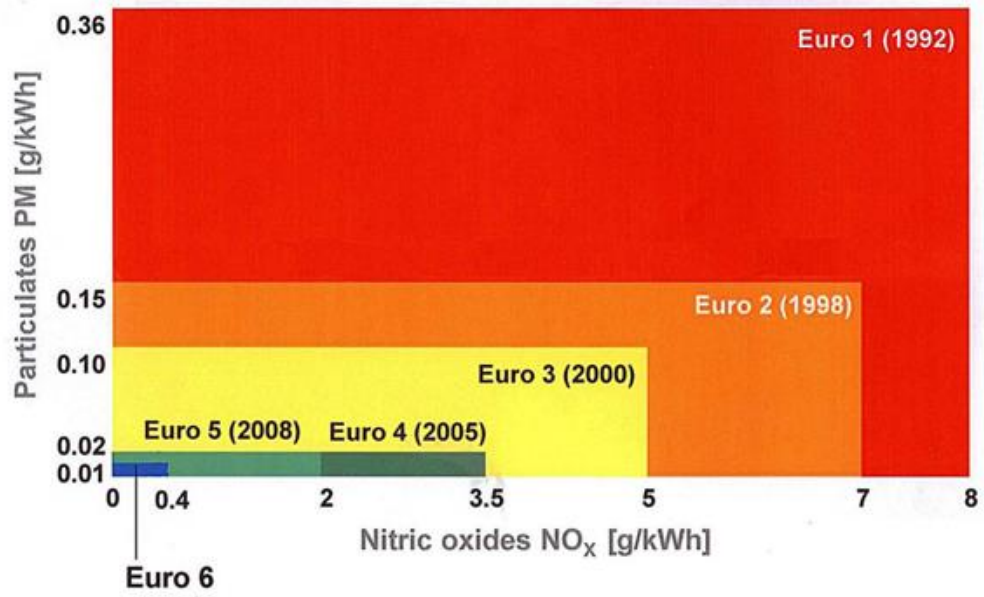
Fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve nitrojen oksit gibi emisyon gazlarının, dünya atmosferinde sera gazı etkisi yaptığı ve iklim üzerinde ciddi değişikliklere sebep olduğu anlatılmıştır. Emisyon gazlarının insan sağlığına olumsuz etkiler, küresel iklim değişikliğine etkileri, dönem dönem yaşanan enerji krizleri ve fosil

yakıt kaynaklarının sınırlı olması sebebi ile temiz enerji arayışına girilmiştir.

Emisyon atıklarını oluşturan ana etkenlerden biri olan otomotiv alanında gerçekleşmektedir. Dünya genelinde artan emisyon hassasiyeti, emisyon standartlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

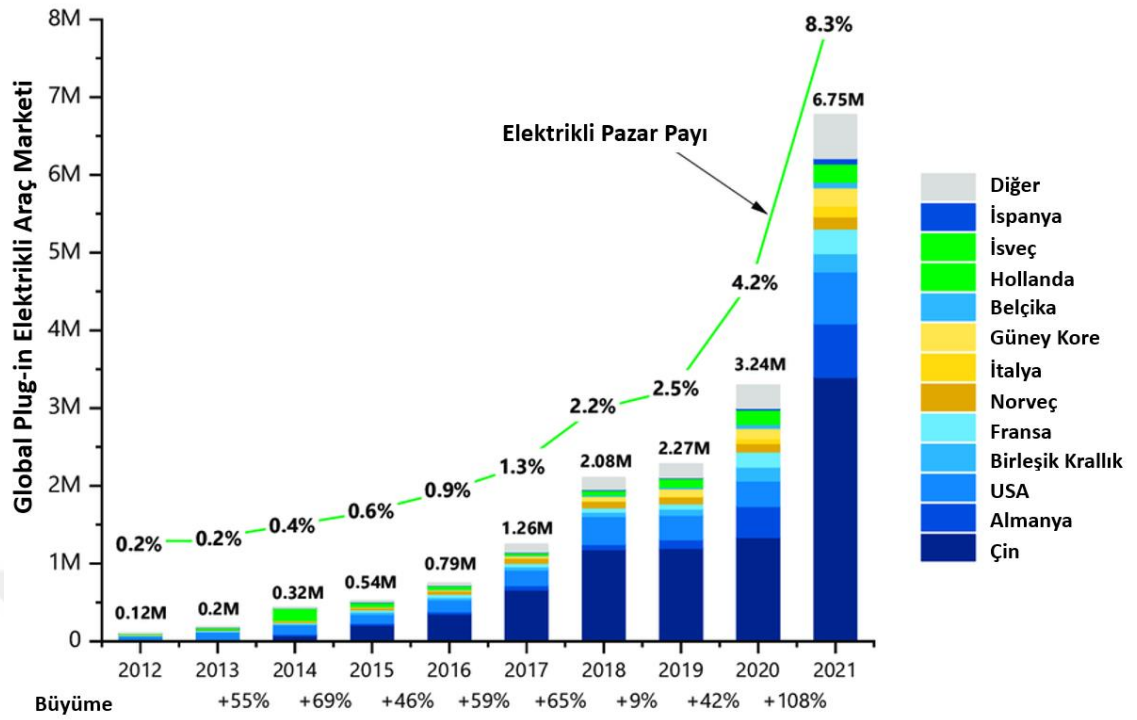
EU Emisyon Standartları

Egzoz Emisyonları 1-6



Şekil 1. 1. Euro Emisyon Standartları ve geçerli olduğu yıllar (Deka vd., 2022)

Ancak emisyon standartlarındaki bu gelişmeler aynı zamanda temiz enerjili araçların tekrar tercih edilmesine de ön ayak olmuş ve tüketicilerin elektrikli, hibrit, yakıt hücreli gibi alternatif tahrik sistemine sahip araçlara yönelmesine sebep olmuştur. Sera gazı etkisini azaltma gereksinimi ve aynı zamanda 21. yüzyıl ile beraber batarya ve şarj teknolojisinde yaşanan gelişmeler, elektrikli araçların tekrar gündeme gelmesi için yeterli zemini oluşturmuştur (Kök & Alkaya, 2020). Bunun bir sonucu olarak, son yıllarda elektrikli araç satışları ciddi miktarlarda artış göstererek global araç market satışlarının 8%'inden fazlasına sahip olmuştur ve önümüzdeki yıllarda bu oranın ciddi miktarda artacağı öngörülmektedir (Wellings vd., 2021).



Şekil 1. 2. Global plug-in elektrikli araç satışları (Lebrouhi vd., 2022)

Bu tez kapsamında, Ansys – Fluent programından faydalanılarak testlerde kullanılacak olan Toshiba LTO 23 Ah tekil batarya hücresi için batarya hücre modeli oluşturulmuştur ve oluşturulan batarya hücre modeli ile tekil ve çoklu hücrelerin farklı deşarj oranlarında (1 C - 4 C) ısıl davranışları incelenmiştir. Ardından elde edilen simülasyon sonuçları deneysel verilerle valide edilmiştir. Ayrıca, dörtlü hücreye uygulanan klasik bir serpantin soğutucu ve yeni tasarlanan bir soğutucu plakanın ısıl davranışa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Son aşamada ise tasarımı yapılan soğutucu plakanın deneysel sonuçları ile sayısal sonuçları arasında karşılaştırma yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kaynak Araştırması

Sabbah, Kizilel, Selman ve Al-Hallaj (2008), yaptıkları çalışmada bir Li-ion bataryanın ısı davranışı, faz değiştirici malzeme (FDM) ile pasif soğutması ve aktif soğutma (hava ile soğutma) ile farklı deşarj oranlarında, farklı uygulama sıcaklıklarında ve çevre sıcaklıklarında karşılaştırmıştır.

Guo ve diğerleri (2010), Li-ion bataryaların farklı koşullardaki sıcaklık dağılımını analiz etmek için bir 3D termal model geliştirmiştir. Model sonuçları ile test sonuçları birbiriyle kıyaslamıştır.

Jarrett ve Kim (2011), yaptıkları araştırmada serpantin kanal kullanarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi ile soğutma performansı basınç düşümü, ortalama sıcaklık ve uniform sıcaklık açısından irdelemiştir. Sonuç olarak, tasarım değişkenlerinin farklı kombinasyonunun sonuçlara olan etkisi incelenerek en düşük sıcaklık değerinin makul basınç düşümü ile düşük sıcaklıklar elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Chen (2013), yaptığı tez çalışmasında sabit sıcaklıktaki bir termal banyoda bir su-etilen glikol solüsyonu kullanarak, batarya hücresi çalışma sıcaklıklarının hassas kontrolü yoluyla batarya hücresi çalışma sıcaklığının deşarj özellikleri üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde ölçmek için bir deneysel araç geliştirmiştir. Ardından da kontrol edilebilir bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak prizmatik bir batarya hücresinin ısı üretim oranlarını ölçebilen bir kalorimetre geliştirmiş ve doğrulamıştır.

Yi, Kim, Shin, Han ve Park (2013a), Li-ion batarya hücresinin akım toplama ucu ile hücreyi harici bir döngüleyiciye bağlayan kurşun tel arasındaki termal ve elektriksel temas dirençlerinin birleşik etkilerini, batarya hücresinin elektrot bölgesindeki elektrokimyasal reaksiyonlar ve ohmik ısıtma sonucunda üretilen ısıya ek olarak düşünmüştür. Akım toplama ucu ısınmasını hesaplarken elektriksel temas direncinin etkisi dikkate alınmıştır ve termal temas direncinin etkisi, akım toplama ucu ile kurşun tel

arasındaki temas alanındaki ısı akısı sınır koşuluna dahil edilmiştir. Üç boyutlu termal modelleme sonuçlarını, bir Li-ion batarya hücresinde deşarj sırasında IR görüntülerinden elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları ile modelleme sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Yi, Kim, Shin, Han ve Park (2013b), 20 °C, 10 °C ve 0 °C gibi düşük ortam sıcaklıklarında 0,5 C ile 5 C arasında değişen deşarj hızları için modellemekten elde edilen deşarj eğrileri, potansiyel ve akım yoğunluk dağılımlarının iki boyutlu modellemesini doğrulamak için deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Elektrokimyasal reaksiyonlar ve ohmik ısıtmanın bir sonucu olarak ısı üretim oranlarını ve deşarj süresinin bir fonksiyonu olarak Li-ion bataryanın sıcaklık değişimlerini tahmin etmek için hesaplamışlardır ve deneysel ölçümlerle kıyaslamışlardır.

Huo, Rao, Liu ve Zhao (2015), 5 C deşarj akımı uygulanarak kanal sayısı, akış yönü ve kütleli debi gibi farklı parametrelerin maksimum sıcaklığa olan etkisi irdelemiştir. Artan kanal sayısı ile maksimum sıcaklık değerinin azaldığını, akış yönünün değişmesi ile elde edilen sıcaklık değişiminin kütleli debinin etkisine kıyasla daha az olduğu ve artan ortam sıcaklığının bataryalar için risk teşkil ettiğini ifade etmişlerdir.

Vyroubal, Kazda, Maxa ve Vondrak (2015), Li-ion batarya hücresinin deşarjıyla sıcaklık profilinin sayısal simülasyonu olasılığını ele almıştır. Sayısal modeli SolidWorks ve ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak hazırlamış ve elektrik empedans spektroskopisi ve termokamera görüntüleme kullanılarak gerçek ölçüm ile karşılaştırmıştır. Simülasyonu, geçici gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmiştir.

Fan ve diğerleri (2017), yaptıkları çalışmada geniş formatlı bir Li-ion batarya hücresinin yüzeyi boyunca termal ve elektrokimyasal özelliklerin 2D dağılımının doğru ve hızlı simülasyonunu elde etmek için bir MSMD model geliştirmiştir. Önerilen model, uzun vadeli simülasyon, sanal tasarım ve optimizasyon çalışmalarını desteklemeyi amaçlamaktadır ve Galerkin projeksiyon yöntemine dayalı analitik Model Sırası Azaltma (MOR) ile hesaplama karmaşıklığının en aza indirilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Model daha sonra çeşitli giriş akımı koşullarında deneysel verilere ve yüksek kaliteli sayısal modele karşı doğrulanmıştır. MSMD modelinin hesaplama karmaşıklığının,

elektrokimyasal ve termal özelliklerin dağılımını karakterize etme doğruluğundan ödün vermeden önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca, uygulanan akım ve termal sınır koşullarının enine akım yoğunluğunun dağılımı üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir.

Gümüüşu, Ekici ve Köksal (2017), yaptıkları çalışmada, Bernardi ve diğer formüller kullanılarak Li-ion batarya hücresinin ısı davranışları 3D HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modeli ile incelemiştir. Modelde deşarj sırasında sıcaklığın hesaplanması için batarya hücresinin elektriksel performans parametreleri kullanmıştır. Bu model ile birlikte makro ölçekli termofiziksel özelliklerin etkileri ve batarya hücresinin ısı üretim modeli ayrıntılı olarak incelemiştir. İncelemenin sonucunda, bataryanın deşarj sırasında doğal taşınım sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları incelemiş ve 2 °C'lik bir hata payıyla öngöründe bulunmuşlardır. Ayrıca, özgül ısı değerlerinin ve termal iletkenliğin sonuçlara etkisini göstermişlerdir.

Wang, Fan ve Liu (2017), yaptıkları çalışmada bir 3D batarya paketi modeli inşa etmiştir. Batarya paketi çıkışının konumu ve miktarı, hücrelerin düzenleme modu ve hücreler ile duvar arasındaki mesafenin seçimi de dahil olmak üzere, ısı yayılımını etkileyen çeşitli yapısal faktörler, sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak simüle etmiş ve tartışmıştır. Simülasyon sonucuna göre batarya hücresi sıcaklık alanını etkileyen faktörler ve etki yasasını özetlemiştir.

Kvasha ve diğerleri (2018), 3 farklı Li-ion hücresinin (A: NCA/Grafit, B: LFP/Grafit, C: NCA/LTO) farklı doluluk oranlarında (state of charge: SOC), 0%, 50%, 100% ısı davranışları irdelenmiştir. Çalışmada LiFePO₄/grafitin, termal stabilite anlamında en güvenli batarya hücresi olduğu gözlemlenmiştir.

Smith, Singh, Hinterberger ve Mochizuki (2018), sekiz prizmatik hücreli yüksek güçlü batarya hücresi için ısı borusu tabanlı termal yönetim sistemi önermiş, tasarlamış ve 400 W'a kadar ısı yükü için test etmişlerdir. Sahte bir batarya modülü kullanılarak yapılan kontrollü deneylere dayanarak, önerilen sistemin 25 °C giriş sıcaklığına ve 1 litre/dakika akış hızına sahip su soğutma sıvısı kullanarak sıcaklıklarını verilen 55 °C sınırının altında

tutarken her hücreden 50 W ısı yükünü başarılı bir şekilde dağıtabildiği hesaplamışlardır.

Li ve diğerleri (2019), yaptıkları çalışmada LiFePO₄/Graphene (LFP/G) bataryasının sıcaklık dağılımının, çalışma voltajının, akım yoğunluğunun ve toplam ısı üretiminin karakteristik düzenlemesini yakalamak için, LFP/G batarya hücresi için yeni bir modelleme yöntemiyle elektrokimyasal-termal birleştirilmiş bir modeli ANSYS FLUENT ile geliştirmiştir. Deneysel sonuçların simülasyon sonuçlarıyla uyuştuğunu ve hücredeki en sıcak bölgeleri doğru tahmin ettiğini göstermişlerdir.

Liu, Liao ve Lai (2019), yaptıkları çalışmada seri bağlı dört lityum-iyon polimer batarya hücresinden oluşan bir batarya modülündeki geçici sıcaklık dağılımlarını, çeşitli şarj ve deşarj akımları altında ölçmüşlerdir. ANSYS/Fluent platformunda modül düzeyinde deneysel verilerle ilişkilendirilen bir batarya termal modeli oluşturmuşlardır. Doğrulanmış modül termal modeli daha sonra paralel bağlı dört modül içeren bir termal paket modeline genişletilmiş ve batarya paketi modelindeki sıcaklık dağılımlarını, 40 A, 60 A ve 80 A sabit deşarj akımları altında simüle etmişlerdir. Optimum aralıkta çalışma sıcaklığı ve sıcaklık gradyanını sağlamak için batarya paketi modeline hava soğutmalı bir termal yönetim sistemi entegre etmişlerdir.

Miao, Hynan, Jouanne ve Yokochi (2019), Li-ion bataryaların temel bileşenleri hakkında bilgiler vermiştir ve ilgili batarya yönetim sistemlerinin yanı sıra genel batarya verimliliğini, kapasitesini ve ömrünü iyileştirmeye yönelik yaklaşımları açıklamıştır. Malzeme ve termal özellikler, batarya performansı için kritik olarak tanımlanmıştır. Pozitif ve negatif elektrot malzemeleri, elektrolitler ve Li-ion bataryaların fiziksel uygulaması tartışılmıştır.

Paccha-Herrera, Calderon-Munoz, Orchard, Jaramillo ve Medjaher (2020), yaptıkları çalışmada bir bataryanın termal davranışını incelemek için uygun bir model belirlemek adına bir LiCoO₂ 26650 lityum-iyon batarya kullanarak termal modelleme yaklaşımları üzerine karşılaştırmalı bir çalışmayı rapor etmişlerdir ve elektrotermal olayları karakterize etmek için bir metodoloji sunmuşlardır. Sayısal olarak üç yaklaşım modeli olan termal yığın modeli, 3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ve Newman,

Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) formülasyonuna dayalı bir elektrokimyasal model kullanmışlardır. Simülasyonları, sabit akım deşarjında ve bir otoyol sürüş çevrimi altında hücre yüzey sıcaklığının deneysel ölçümlerle doğrulamışlardır ve üç modelin gerçek sıcaklık ölçümleriyle tutarlı olduğunu göstermişlerdir.

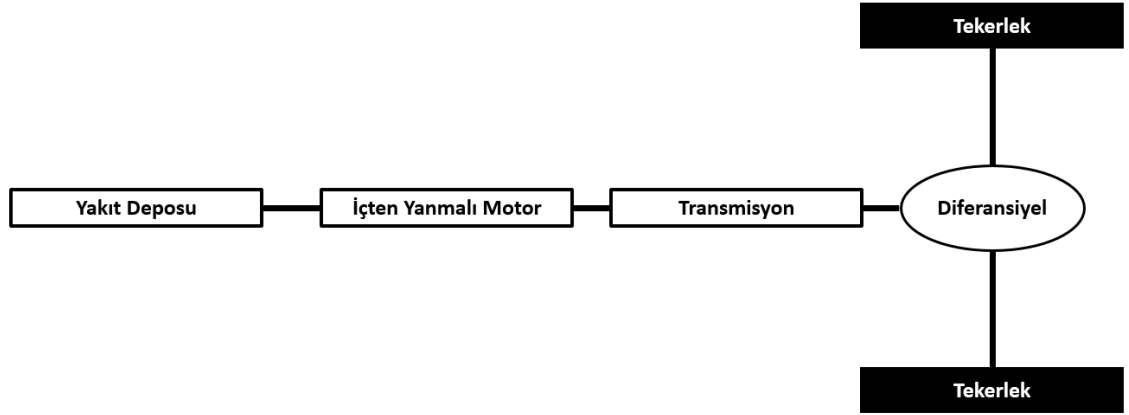
Amini, Özdemir, Ekici, Başlamışlı ve Köksal (2021), farklı çalışma sıcaklıkları (20 °C, 35 °C, 50 °C) altında değişen şarj ve deşarj oranları (0,5 C, 1 C, 1,5 C) için bir Li-ion batarya hücresinin termal davranışını tahmin etmek için yeni bir prosedür kullanılarak batarya modeli geliştirmişlerdir. Çeşitli galvanostatik şarj ve deşarj oranlarında temel termal ve elektriksel çalışma davranışını belirleme için bir batarya test düzeneği kullanmışlardır. Ayrıca, dinamik koşulları simüle etmek için prototip bir araç modeline dayalı iki farklı sürüş döngüsü yükü için batarya testleri gerçekleştirmişlerdir. İlk deney grubunda 3 farklı şarj ve deşarj oranı için 3 farklı çevre sıcaklığı için testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar tersinir ısı üretimini tahmin edebilecek bir model kurmak için kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda, galvanostatik şarj-deşarj için deneysel veriler ile model sonucu arasındaki farkın 2 °C'den düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik koşullar söz konusu olduğunda, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki maksimum sıcaklık farkının, iki farklı ortam sıcaklığında test edilen otoyol sürüş döngüsü için 2,5 °C'den ve test edilen şehir içi sürüş döngüsü için 1 °C'den az olduğu bulmuşlardır.

2.2. Kuramsal Temeller

2.2.1. Araç teknolojileri

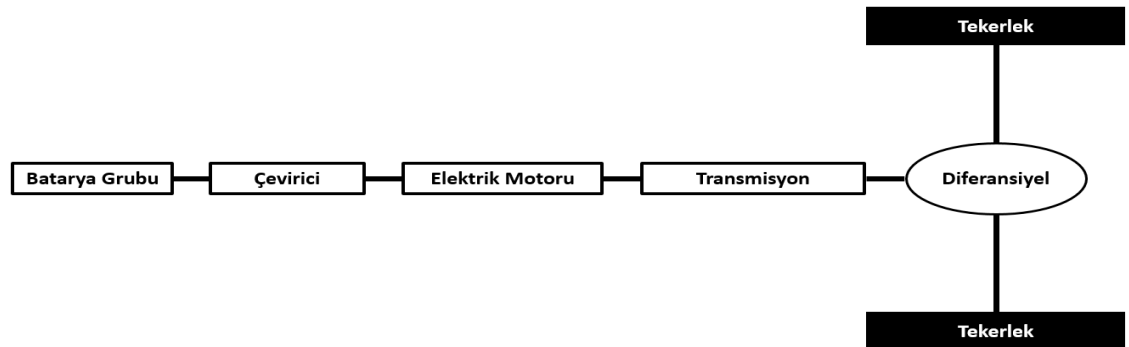
Günümüzde elektrikli araçlar, gelişen batarya ve şarj teknoloji ile birlikte içten yanmalı motorlarla rekabet edebilecek durumdadır. Araç teknolojileri tahrik sistemi bakımından İçten Yanmalı Motorlu Araçlar, Tam Elektrikli Araçlar (EV), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ve Yakıt Hücresel Araçlar olarak dört ana gruba ayrılmaktadır.

İçten yanmalı motorlu araçlarda Şekil 2.1'de görüleceği gibi motor tahriki sadece yakıt deposundan elde edilen yakıt enerjisi ile sağlanmaktadır. Bu tür tahrik sistemine sahip araçlarda yakıt enerjisi olarak benzin, dizel gibi yakıtlar kullanılmaktadır.



Şekil 2. 1. İçten yanmalı motorlu araçlar tahrik sistemi (T. Lu vd., 2012)

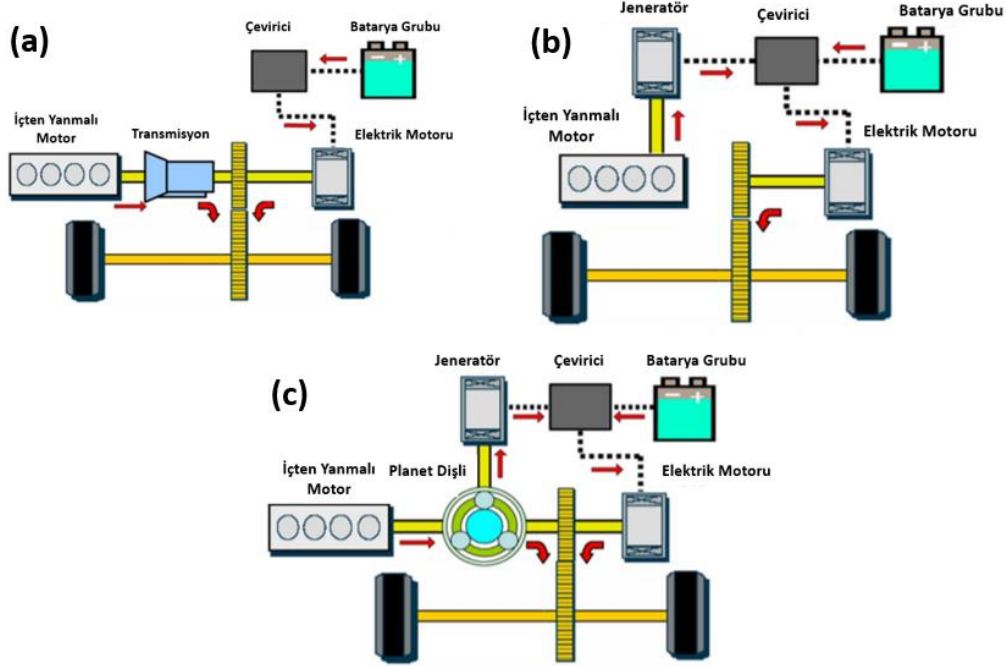
Elektrikli araçlar, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere bataryalardan ve diğer enerji depolama cihazlarından aldığı elektriği elektrik motoru ya da elektrik motorları aracılığıyla mekanik enerjiye çeviren ve çevrilen mekanik enerjiyi aracı tahrik etmek için kullanan otomobillerdir. Elektrikli araçlar, hareket için gerekli olan tüm gücü yapısında bulunan elektrik motorlarından alır. Elektrikli araçlarda tahrik motoru dışında, yarı-iletken güç anahtarlama elemanlarından oluşan bir çevirici devresi de yer alır. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlarda gücün tekerleklere iletilirken yaşadığı birçok kayıptan muaf olduğu için daha verimli çalışmaktadır ve ani tork, güç ihtiyacını karşılayabilmektedir.



Şekil 2. 2. Tam elektrikli araçlar tahrik sistemi (Mcculloch vd., 2012)

Hibrit araçlar motor tahrikini hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru ile

sağlamaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlar ile elektrikli araçların kombine edilmiş hali olup her iki tahrik türünün de bazı avantajlarını bünyesinde barındırır. Hibrit araçların çeşitli karakteristik kombinasyonları olup Şekil 2.3'teki gibi üzere seri, paralel, seri-paralel olmak üzere temelde üç çeşit hibrit araç mevcuttur.



Şekil 2. 3. Hibrit araç tahrik sistemleri **a)** paralel, **b)** seri, **c)** power-split (seri/paralel) (J. Liu & Peng, 2008)

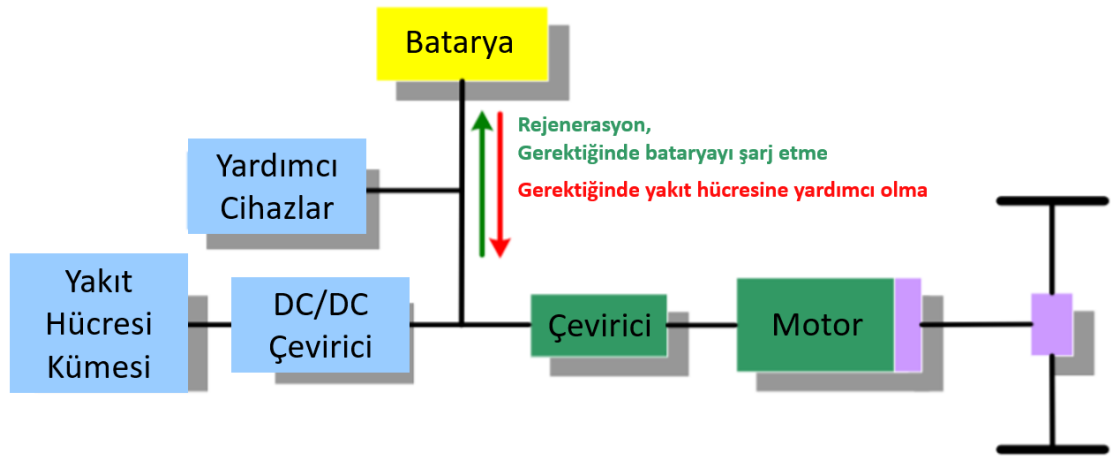
Seri hibrit elektrikli araçlarda içten yanmalı motor elektrik enerjisi üreterek bataryaların şarj olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında herhangi bir mekanik bağ bulunmamaktadır ve araç sürüşü tamamen elektrik motoruyla sağlanmaktadır. Ayrıca, içten yanmalı motor yol yükünden bağımsız olup yol yüklerinin karşılanmasında herhangi bir direkt katkısı bulunmamaktadır. Yol yüklerinden bağımsız çalışması, içten yanmalı motorun maksimum verim alabileceği şartlarda çalışmasına olanak tanımaktadır.

Paralel hibrit elektrikli araçların tahrik sistemi seri hibrit araçlara göre farklılık göstermektedir. Paralel hibrit araçlarda içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında mutlaka mekanik bir bağlantı bulunmaktadır (Pisu vd., 2004). Paralel hibrit elektrikli

araçlarda, içten yanmalı motor ve elektrik motoru yol yükünü karşılama görevini beraber üstlenmektedirler. Hem içten yanmalı motor hem de elektrikli motor beraber çalışabileceği gibi ayrı ayrı da çalışabilmektedir. Genellikle beraber ya da ayrı çalışma durumları yol yüküne göre değişmektedir. Düşük hızlarda elektrik motoru aktiften, yüksek hızlara çıkıldığında tahrik kuvveti içten yanmalı motordan alınmaktadır. Ek olarak, ani güç gereksinimi durumunda iki motor da bu gereksinimi karşılamak için beraber çalışmaktadır. Böylece, düşük güç ihtiyacı durumunda zararlı emisyonlar ve yakıt tüketimi azaltılmaktadır.

Seri-paralel konfigürasyonda ise hem seri hem de paralel konfigürasyonların avantajları birleştirilmeye çalışılmıştır. Böylece, içten yanmalı motor ve elektrik motorunda alınacak enerjileri yönetmek adına daha fazla seçenek ortaya çıkmıştır. Bu konfigürasyonda; sadece içten yanmalı motor, sadece elektrik motoru, paralel ve seri konfigürasyonda sürüş gibi seçenekler mevcuttur. Dolayısıyla, her iki konfigürasyonun da avantajlarından faydalanılabilmektedir.

Yakıt hücreli araçlar, tekerleklerle güç sağlamak için içten yanmalı motor yerine bir elektrik motoru kullanmaları bakımından elektrikli araçlarla benzeşmektedirler. Temel olarak çalışma prensibi, aracın yakıt deposundan gelen hidrojen gazı ile havadaki oksijeni birleştirerek çıktı olarak yalnızca su ve elektrik üretmesidir. Dolayısıyla, saf hidrojen kullanıldığında elektrik ve su üretildiğinden tüm emisyonlar önlenmektedir. Yakıt hücreleri, elektrotlar ve elektrotların arasında yer alan iletken bir elektrolit ile birlikte hidrojen ve oksijen gazlarının elektro-kimyasal birleşimini sağlamaktadır. Hidrojen, anot ucunda katalizör yardımıyla proton ve elektronlarına ayrılır. Protonlar elektrolitin içerisinden geçerken, elektron ayrı bir akım meydana getirerek yakıt pilini çalıştırır.



Şekil 2. 4. Yakıt hücreli araçlar tahrik sistemi (Manoharan vd., 2019)

Elektrikli araçlar bazı avantaj ve dezavantajlarının incelemesi Çizelge 2.1’de görülmektedir (Gelmanova vd., 2018; Omariba vd., 2018)

Çizelge 2. 1. Elektrikli araçların bazı avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek verim	Batarya maliyeti
Çevreye duyarlı (düşük emisyon)	Batarya şarj süresi
Yüksek performans ve düşük bakım	Batarya malzemeleri için birincil kaynak tüketimi
Çok daha iyi tork	Araç menzili problemi
Sessiz ve konforlu çalışma	Batarya bozulma maliyeti
Daha çok dijital bağlantı	Şarj istasyonu altyapı yetersizliği
Daha az tahrik sistemi bileşeni	Dolaylı çevre kirliliği
Düşük elektrik harcama	Ekstra ağırlık
İyi hızlanma	
Düşük maliyetle şarj etme	

Elektrikli araçlar içten yanmalı araçları göre daha verimli çalışmaktadır (Albatayneh vd., 2020). Ayrıca, emisyon değerleri dolaylı emisyonlar da hesaba katıldığında çevreye daha duyarlı olduğu ve emisyon miktarlarının içten yanmalı motorlara göre daha düşük kaldığı görülmektedir (Sobol & Dyjakon, 2020). Ayrıca, gerekli güç ihtiyacının karşılanması ve

konforlu sürüş anlamında da elektrikli araçlar öne çıkmaktadır (El Baghdadi vd., 2013).

Elektrikli araçların dezavantajları incelendiğinde, geliştirilebilir en önemli noktalar araç menzili, batarya maliyeti ve batarya şarj süresi olarak göze çarpmaktadır (Hidruue vd., 2011). Bu noktalar için dünya çapında birçok ülke ve şirkette çalışmalar tüm hızıyla devam etmekte ve yakın dönemde bu problemlerin çözülmesi ile birlikte elektrikli araçların marketi yıllar geçtikçe domine edeceği düşünülmektedir.

2.2.2. Bataryalar

Elektrikli taşıtlarda batarya sistemleri batarya modüllerini içeren batarya paketlerinden oluşmaktadır. Her bir batarya paketi ise belirli sayıda seri/paralel olacak şekilde farklı bağlantı konfigürasyonlarına sahip batarya hücresinden oluşur. Konfigürasyon belirlenirken elektrikli taşıt güç gereksinimleri, batarya yönetim sistemi, soğutma ihtiyacı, güvenlik, uluslararası standartlar ve imalat kısıtları gibi faktörler dikkate alınır. Batarya, aktif materyalinde bulunan kimyasal enerjiyi elektrokimyasal oksidasyon-indirgeme (redoks) reaksiyonu yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır (Linden & Reddy, 2002).

Yeniden şarj edilebilir bir sistem durumunda, işlemin tersine çevrilmesiyle bir batarya yeniden şarj edilir. Bir bataryanın içindeki elektrokimyasal depolama elemanına "hücre" denir. Bir batarya oluşturmak için bir veya daha fazla hücre bir araya getirilir. Hücreler, istenen voltaj veya akımı elde etmek için seri veya paralel olarak bağlanabilir. Bir hücre temel olarak anot ve katot olarak iki elektrot ve elektrolit bileşenlerini içerir.

Anotta, elektrokimyasal reaksiyon ve oksidasyon meydana gelir. Reaksiyon, harici bir devre yoluyla katoda akan elektronları serbest bırakır. Anotun malzemesi, verimliliğine, yüksek özgül kapasitesine, iletkenliğine, kararlılığına, üretim kolaylığına ve maliyetine göre seçilir.

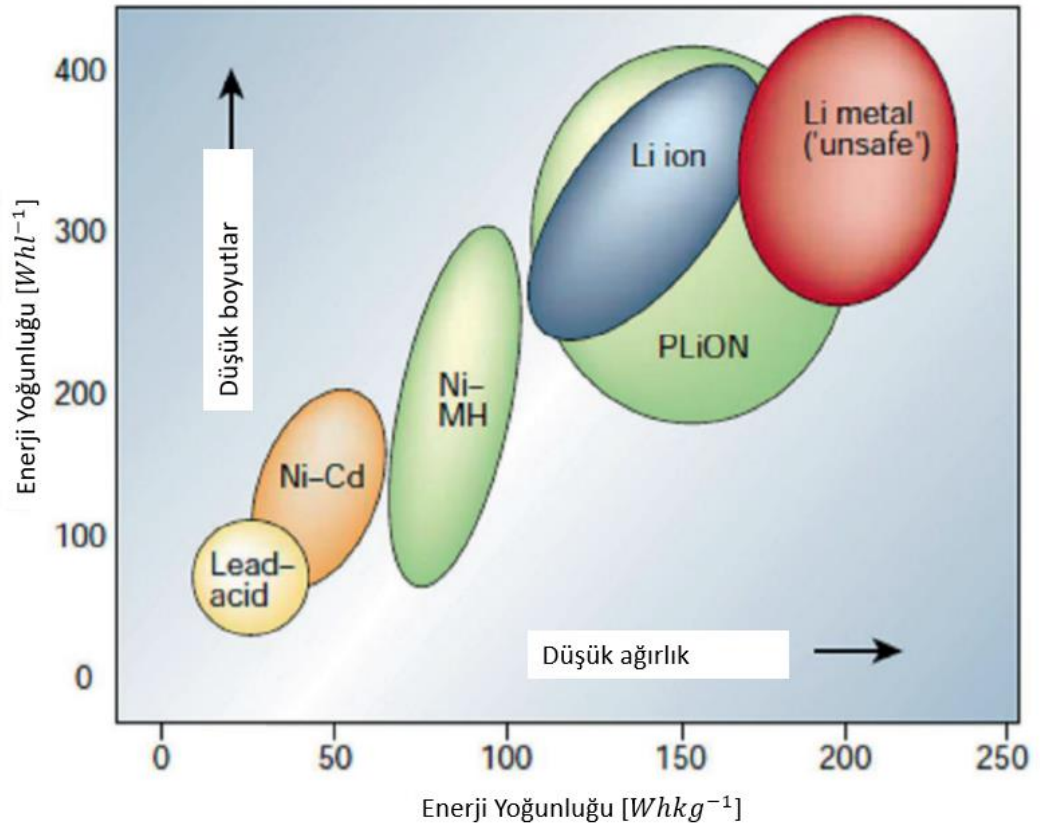
Katot, anottan elektronları alır ve indirgenir. Katot malzemesinin seçimi, voltajına ve zaman içindeki kimyasal kararlılığına bağlıdır. Elektrolit, hücre içinde katot ve anot

arasında iyonların yük transferi için ortam sağlar. Elektrolit, su veya çözünmüş tuzlara sahip diğer çözücüler gibi sıvı, katı veya jel tipi olabilir. Elektrolit seçimi, yüksek iletkenliği, elektrot malzemeleriyle reaksiyona girmemesi, çeşitli sıcaklıklarda özelliklerinde stabilite, güvenlik ve maliyet esas alınarak yapılır.

Anot ve katot malzemelerinin en iyi kombinasyonu, hafif, yüksek hücre voltajı ve yüksek hücre kapasitesi verecek olmasıdır. Her iki elektrot da elektronik olarak izole edilmiştir ve dahili kısa devre koşullarını önler (Dell vd., 2001). Bununla birlikte, elektrolit ile çevrilidirler. Gerçek bir hücre tasarımında, anot ve katot arasında mekanik bir izolasyon sağlamak için ayırıcılar kullanılır.

Batarya çeşitleri:

Bataryalar temel olarak birincil ve ikincil bataryalar olarak ikiye ayrılır. Birincil bataryalar şarj edilemez yani tek kullanımlıdır. İkincil bataryalar ise şarj edilebilir ve tekrar kullanılabilir bataryalardır. Günümüzde bulunan mevcut bataryaların kimyalarına göre çeşitlerinin hacimsel ve kitlesel enerji yoğunlukları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 5. Farklı batarya teknolojileri için hacimsel ve kütle enerji yoğunluğu (Miao vd., 2019)

Kurşun asitli bataryayı oluşturan elementler kurşun, kurşun oksit ve seyreltilmiş sülfürik asittir. Bu bataryalar uzun süredir üretildiğinden araştırma geliştirme açısından olgunlaştı ve maliyet önemli ölçüde azaldı. Başlıca dezavantajlardan bazıları kendi kendine deşarj, yüksek ağırlık, düşük özgül güç ve enerjidir. Ayrıca bu bataryaların çevrim ömrü diğer bataryalara göre daha kısadır.

Nikel bazlı bataryalar son yıllarda ticari olarak uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır (Shukla vd., 2001). Bu bataryalar, esas olarak yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim ömrü ve hızlı şarj yetenekleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. En çok kullanılan çeşitleri Nikel Metal Hidrür (NiMH) ve Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) kimyalarına sahip olanlardır. Pozitif elektrot Nikel Hidroksitten oluşur ve negatif elektrot NiMH durumunda Metal Hidrürden veya Ni-Cd durumunda Kadmiyum Hidroksitten oluşur. Bu bataryalar, özgül enerji ve özgül güç değerlerine göre Kurşun-Asit ve Li-İyon bataryalar

arasında yer alır (Smith vd., 2011). Ni-Cd kimyası, kadmiyumun zehirli olmasından dolayı birçok ülkede endüstriyel kullanımları yasaklanmıştır.

Li-ion bataryalar, son on yılda hızla standart bir güç kaynağı haline geldi ve uygulama alanları giderek genişleyerek muazzam bir gelişme yaşadı. Bu bataryalar, pozitif ve negatif elektrotlar olarak lityum depolama bileşikleri kullanır. Bir batarya çalıştırıldığında, pozitif ve negatif elektrotlar arasında lityum iyonları alışverişi yapılır. Pozitif elektrot malzemesi tipik olarak katmanlı bir yapıya sahip bir metal oksit iken, negatif elektrot katmanlı bir grafit karbon yapısı içerir. Li-ion bataryalar, Bölüm 1.5'te açıklanan pozitif elektrot tipine göre sınıflandırılır. Li-ion bataryalar, düşük bakım, uzun çevrim ömrü, yüksek özgül güç ve enerji, düşük kendi kendine deşarj ve yüksek verimlilik nedeniyle birçok uygulama için en uygun seçim olarak görülüyor (R. Lu vd., 2011).

Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kurşun-asit bataryalar ve yeni teknolojiye sahip olan lityum-iyon bataryaların kullanımı oldukça yaygındır. Lityum-iyon bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldığında lityum-iyon bataryalar, daha az hacim ve ağırlıkta daha fazla enerji depolamaktadırlar (Aktaş vd., 2020).

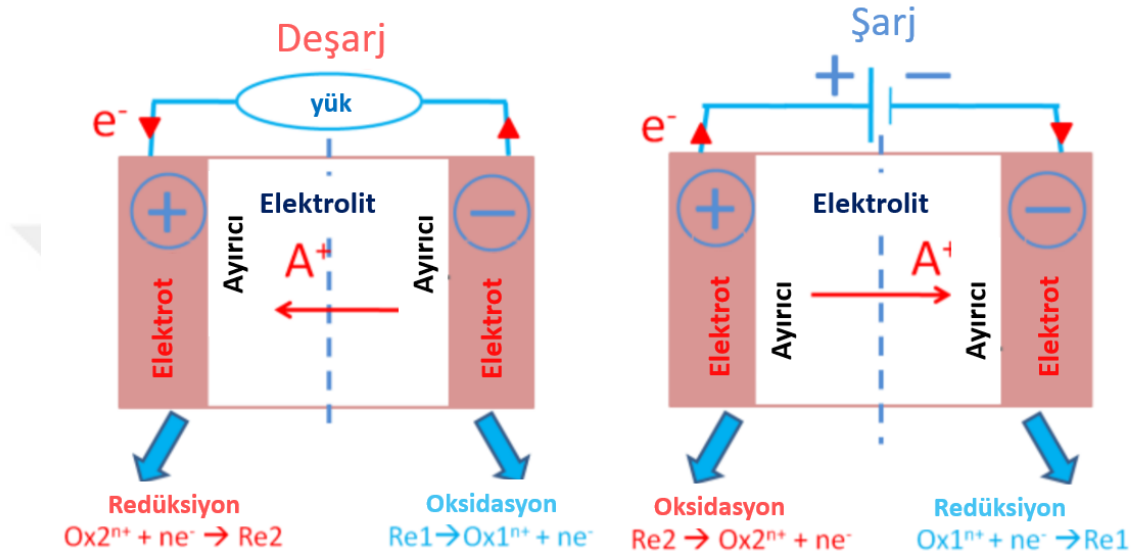
2.2.3. Li-ion bataryalar ve özellikleri

Günümüzde dünyada en yaygın ve geniş alanda kullanılan batarya çeşitlerinden biri Li-ion bataryalardır. Şarj edilebilir Li-ion bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömründen dolayı çoğunlukla taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılır ve elektrikli araçlar için en yüksek potansiyele sahip bataryalar olarak kabul edilir (Chawla vd., 2019). Ayrıca, dinamik ve değişken şarj durumlarına diğer bataryalara göre daha dayanıklıdır.

Li-ion batarya çalışma prensibi:

Li-ion bataryalar, pozitif elektrot olan katot, negatif elektrot olan anot, elektrolit, ayırıcı ve pozitif, negatif akım toplayıcılardan oluşur. Deşarj sırasında, lityum iyonları anottan

katoda elektrolitin içinden geçer ve böylece elektrik akımı oluşur. Şarj sırasında ise lityum iyonları katot tarafından salınır ve tekrar anoda dönerek başlangıç durumunu alır (Wong & Chow, 2020). Elektrolit, bataryalarda kilit bir role sahiptir ve bataryanın elektrokimyasal performansını ve güvenliğini direkt olarak etkilemektedir. Aşağıda bulunan Şekil 2.6’da şarj ve deşarj durumlarının basit bir gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2. 6. Bir Li-ion bataryanın şematik çalışma prensibi (Hordé vd., 2012)

Katot malzemelerine göre Li-ion bataryalar:

Günümüzde kullanılan birçok Li-ion batarya kimyaları aktif olarak kullanılmaktadır. Li-ion bataryaların kimyalarındaki farklılıklar genelde bataryanın özgül gücünü ve özgül enerjisi geliştirmek üzere oluşturulmuştur. Son yıllarda farklı kimyalara sahip en çok kullanılan Li-ion bataryalar; lityum titanat oksit (LTO), lityum kobalt oksit (LCO), lityum mangan oksit (LMO), lityum demir fosfat (LFP), lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) çeşitleridir. Çizelge 2.2’de en yaygın kullanılan Li-ion bataryaların avantaj ve dezavantajları sıralanmıştır.

Çizelge 2. 2. Lityum batarya modellerinin bazı avantajları ve dezavantajları (Hannan vd., 2018; Oliveira vd., 2021)

Batarya Modeli	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanı
Lityum-Titanat Oksit (LTO)	En uzun çevrim ömrü	Düşük güç ve enerji yoğunluğu	Gelişmiş nano-teknoloji uygulamaları
	Düşük sıcaklıklarda iyi performans	Yüksek maliyet	
	Makul seviyede güvenli		
Lityum Kobalt Oksit (LCO)	Yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğu	Kobalttan dolayı yüksek maliyet	Akıllı telefonlar, tabletler, laptoplar, dijital kameralar
		Düşük çevrim ömrü	
		Sınırlı akım	
		Aşırı ısınma koruması gerekli	
Lityum Mangan Oksit (LMO)	Yüksek akım taşıyabilme	LCO'dan daha düşük güç yoğunluğu	EV, HEV ve medikal
	Yüksek güç yoğunluğu	Düşük çevrim ömrü	
	Yüksek ısı stabilite	Yüksek zehirli malzemeler	
	Yüksek güvenlik seviyesi		
Lityum Demir Fosfat (LFP)	Aşırı şarj ve yüksek sıcaklık şartlarında stabil çalışma	Düşük güç ve enerji yoğunluğu	EV, elektrikli el aletleri, taşınabilir cihazlar
	Yüksek güvenlik seviyesi		
	Düşük iç direnç		
	Yüksek çevrim ömrü		
	Düşük zehirli malzeme		
Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC)	Yüksek güç ve enerji yoğunluğu	Kobalttan dolayı yüksek maliyet	EV, Elektrikli el aletleri, enerji depolama
	Yüksek çevrim ömrü	LFP'den daha az güvenli	
	Düşük kendiliğinden ısınma		
Lityum Nikel Mangan Alüminyum Oksit (NCA)	Makul seviyede güvenli	Düşük güç ve enerji yoğunluğu	EV
	Yüksek çevrim ömrü	Geliştirilme ihtiyacı	
	Yüksek verimlilik		

Lityum titanat oksit (LTO) bataryalar, yüksek kapasiteleri, yüksek şarj ve deşarj oranları ve yüksek çevrim ömrü ile ön plana çıkmaktadır (Zhang vd., 2015). Ek olarak, düşük sıcaklıklarda stabil ve güvenli bir şekilde çalışması da en önemli özelliklerindendir. Ancak düşük enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğuna sahip olmasına rağmen günümüzde

geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Lityum kobalt oksit (LCO) bataryalar, kullanım alanı olarak yüksek deşarj ihtiyacı olmayan akıllı telefon, laptop, tabletler gibi elektronik eşyalarda kullanılır. Çevrim ömrünün düşük olması ve akım sınırlaması nedeniyle yüksek akım gerektiren alanlarda uygulanması için ek çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, enerji yoğunluğu ve özgül enerji bakımından oldukça iyi olsa da ısıl stabilite olarak zayıf kalmaktadır ve kobalt malzeme maliyetinin yüksek olmasından ötürü LCO bataryaların fiyatları yüksektir.

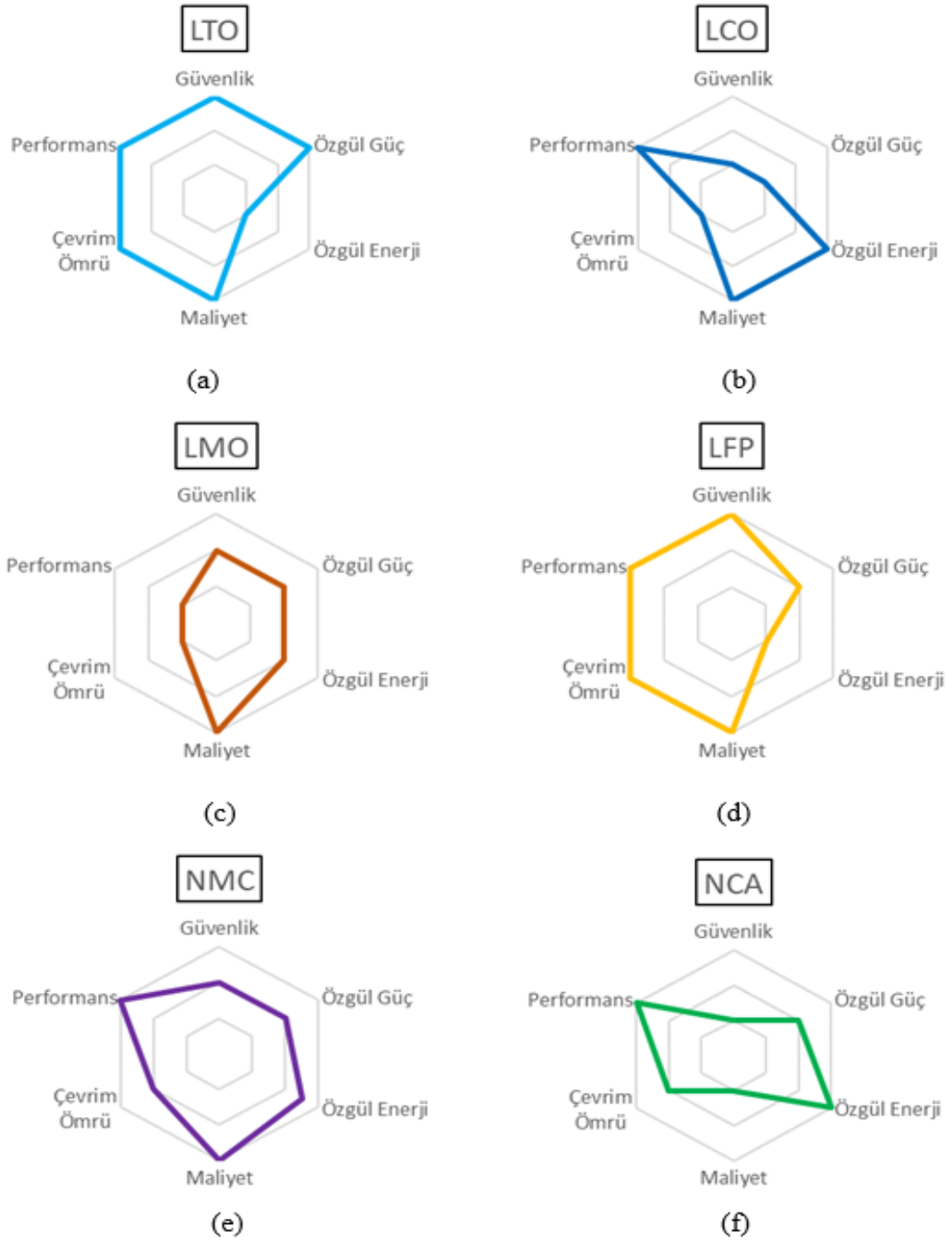
Lityum mangan oksit (LMO) bataryalar ise katot malzemesinden dolayı LCO bataryalara göre daha ucuzdur ancak güç yoğunluğu nispeten yüksek olsa da LCO bataryalardan düşüktür (Kennedy vd., 2000). Yüksek akımları taşıyabilmekle birlikte, ısıl stabilitesi ve yüksek güvenlik seviyesi bu batarya türünün öne çıkan özellikleridir. En büyük dezavantajları ise düşük çevrim ömrü ve yüksek miktarda zehirli malzeme içermesidir.

Lityum demir fosfat (LFP) bataryalar, yüksek sıcaklıklarda ısıl stabilitesi iyi olduğundan aşırı şarj durumunda güvenli bir şekilde çalışabilmektedir. Çevrim ömrünün yüksek olması, iç dirençlerinin düşük olması en büyük avantajlarındanıdır. Ancak düşük güç yoğunluğu ve düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğundan yüksek güç gerektiren alanlarda kullanılması daha zordur.

Lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC) bataryalar, yüksek güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra çevrim ömrünün uzun olması ile otomotiv endüstrisinin dikkatini çekmiştir ve günümüz elektrikli araçlarında en çok tercih edilen Li-ion batarya türüdür. İçeriğindeki kobalttan ötürü maliyeti yüksektir (Omar vd., 2012). Normal çalışma şartlarında güvenli olsa da LFP batarya ile karşılaştırıldığında daha az güvenlidir.

Lityum nikel mangan alüminyum oksit (NCA) bataryalar, yüksek çevrim ömrü ve yüksek verimlilikleri ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, LTO bataryalar gibi orta seviyede

güvenli bir çalışmaya sahiptir. Ancak düşük güç ve enerji yoğunluğu bu batarya türünün en büyük dezavantajlarıdır.



Şekil 2. 7. Li-ion teknoloji karşılaştırması **a)** LTO, **b)** LCO, **c)** LMO, **d)** LFP, **e)** NMC, **f)** NCA (Saldaña vd., 2019)

Bataryaların seçiminde birçok önemli değerlendirme kriteri mevcuttur. Bu kriterlerin önemi, bataryaların uygulanacağı alanlar, güç ihtiyacı, çalışma ortamı, maliyet gibi birçok faktörün birleşiminden oluşmaktadır. Şekil 2.7’de, daha önce bahsedilmiş olan Li-ion batarya türlerinin güvenlik, özgül güç, özgül enerji, maliyet, çevrim ömrü ve performans açısından değerlendirmeleri gösterilmiştir. Değerlendirmeler incelenecek olursa, Li-ion batarya türlerinin hiçbirinin tek başına tüm istekleri karşılayamayacağı açıkça görülmektedir. Bu yüzden, uygulama gereklilikleri incelenerek değerlendirme kriterleri önceliklendirilmeli ve batarya türü bu önceliklendirmeye göre seçilmelidir.

Çalışma güvenliği açısından kıyaslandığında, LTO ve LFP ön plana çıkmakla beraber LMO ve NMC de makul derecede güvenli çalışmaktadır. Ancak, LCO ve NCA bataryalarının kullanıldığı uygulamalarda ekstra önlemler alınmasını gerektirecek şartlar oluşabilir.

Özgül güç, birim kütle başına alınacak bilecek maksimum güçtür ve istenilen güç ihtiyacını karşılamak için gerekli batarya ağırlığını hesaplamakta kullanılabilir. LTO bataryası, özgül güç anlamında diğer bataryalardan daha iyi bir performansa sahiptir. Dolayısıyla, tüm Li-ion bataryalardan aynı güç elde edilmek istendiğinde en düşük ağırlıkla istenilen gücün elde edilebileceği Li-ion batarya türüdür. Özgül güç anlamında en verimsiz seçenek LCO olarak göze çarpmaktadır. Diğer Li-ion batarya türleri ise makul derecede özgül güce sahiptir.

Özgül enerji, birim hacme düşen nominal batarya enerjisini temsil etmektedir. Bataryanın istenilen güçte çalışabileceği süre ile ilişkili olduğundan bataryalar için kilit bir özelliktir. Özgül enerjiler kıyaslandığında öne plana çıkan iki Li-ion batarya türü LCO ve NCA bataryalardır. Ayrıca, NMC bataryalar da özgül enerji açısından kullanıma çok uygundur. LTO ve LFP bataryaların özgül enerjileri incelendiğinde, diğer Li-ion batarya türlerine göre daha düşük özgül enerjiye sahiptirler.

Ticarileştirilen birçok proje ve uygulamada en önemli kriterlerden biri maliyettir. Li-ion bataryaları maliyet olarak kıyaslandığında, kobalt malzemesinden ötürü en yüksek maliyetli batarya türü NCA bataryalardır. Kıyaslanan diğer batarya türleri birbiriyle

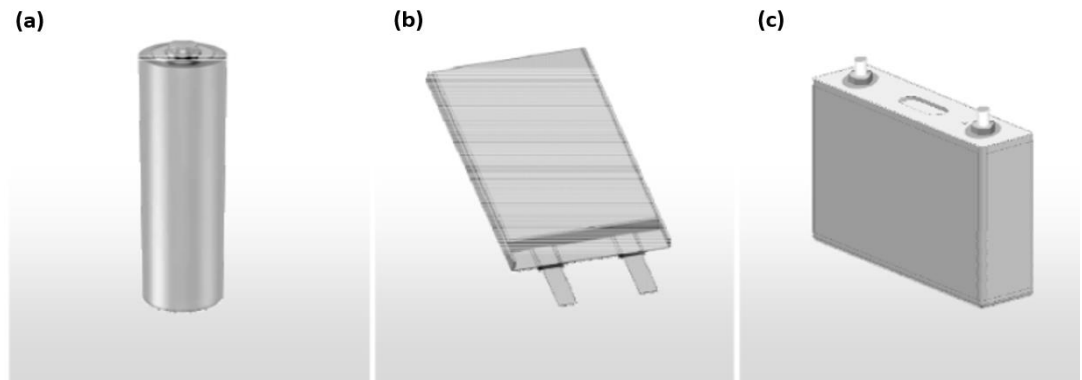
kıyaslanabilir maliyetlere sahiptir.

Çevrim ömrü bataryanın şarj ve deşarj çevrimini yapabildiği sayıyı belirtmektedir. Çevrim ömürleri göz önüne alındığında, LTO ve LFP bataryaları diğerlerine kıyasla daha iyi bir performansa sahiptir. LCO ve LMO ise daha az sayıda şarj-deşarj döngüsünü devam ettirebilmektedir. LMO bataryası, en düşük performansa sahip olarak öne çıkmaktadır. Diğer batarya çeşitleri ise birbirleriyle kıyaslanabilir performanslara sahiptir.

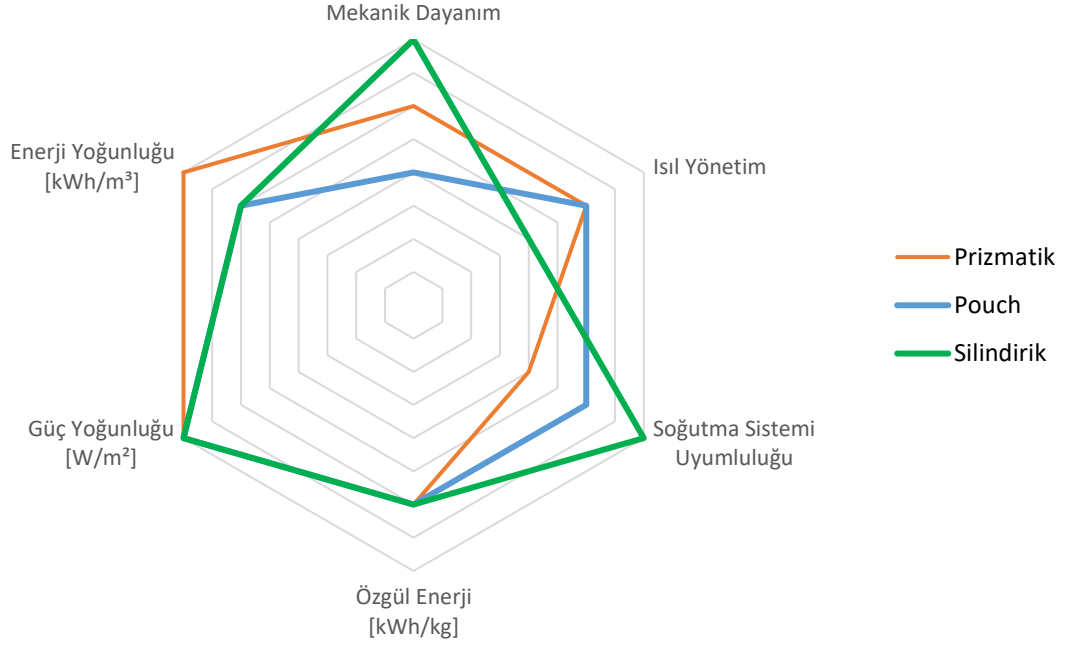
Yukarıdaki değerlendirmelerden de görüleceği gibi, kıyaslanan kriterler içerisinde tüm Li-ion batarya türlerinin ortalama değerleri karşılaştırıldığında durumda en iyi seçeneğin lityum titanat oksit (LTO) olduğu görünmektedir. Ancak, LTO bataryanın da kendine özgü büyük bir dezavantaj olarak düşük özgül enerjiye sahiptir. Böylelikle, hiçbir batarya hücresinin tek başına tüm ihtiyaçları karşılayamadığı açıkça görünmektedir. Bu yüzden, batarya türü seçimi yapılacağı durumlarda bataryanın uygulanacağı şartlara göre kriterler değerlendirilmeli ve batarya seçimi yapılmalıdır.

Geometrilerine göre Li-ion bataryalar:

Günümüzde geometrik çeşitlilik göz önüne alındığında genelde prizmatik, pouch ve silindirik olarak üç tip bataryaya rastlanmaktadır (Lemian & Bode, 2022). Batarya geometrilerindeki farklılıklar genelde farklı projelerdeki farklı kullanımlardan kaynaklıdır (Kurfer vd., 2012).



Şekil 2. 8. Tasarımlarına göre batarya hücreleri a) silindirik, b) pouch, c) prizmatik



Şekil 2. 9. Farklı Li-ion batarya tasarımlarının karşılaştırılması

Dış çeperinde paslanmaz çelik kaplı olan silindirik hücreler hem birincil hem de ikincil batarya olarak en çok kullanılan batarya çeşitlerindendir. Kapasite değerleri 1,95–4,90 Ah arasında değişmektedir (Baazouzi vd., 2023). Düşük maliyetli olması ve küçük geometrili olması ile birlikte Şekil 2.9’da da görüleceği gibi esnek kullanım alanı ve sıcaklık kontrolü sağlaması en önemli avantajları arasındadır. En önemli dezavantajı ise kapasitesinin sınırlı olmasıdır.

Pouch hücreler ise prizmatik hücrelerin daha ince hali olarak karşımıza çıkmaktadır. Kapasite değerleri genellikle 16–50 Ah arasındadır. Pouch hücreler, güç yoğunluğu ve özgül enerji açısından en iyi performansı gösterirken, dayanıklılık olarak diğer hücre çeşitlerinden daha dayanıksızdır. Bir başka dezavantajı ise hücrenin şişme ile ilgili sorunlar yaşayabilmesi ve bataryanın ömrünü, kapasitesini azaltıp daha güvensiz hale getirmesidir.

Prizmatik hücreler, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu olarak ön plana çıkmaktadır. Kapasiteleri 20–120 Ah arasında değişmekle beraber diğer hücrelere göre daha kalın

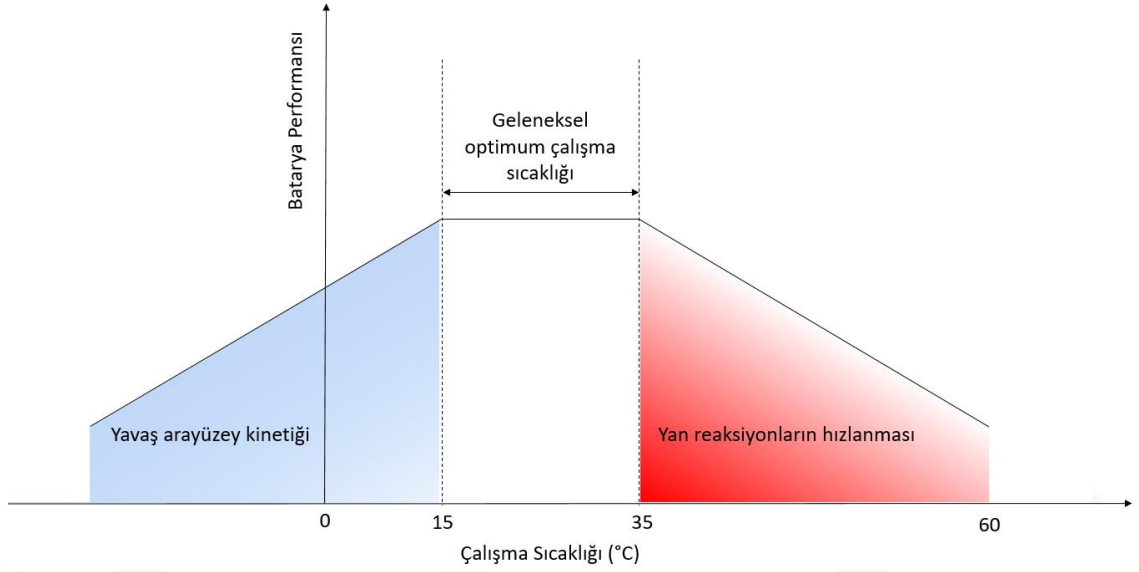
olmasından dolayı soğutmaya uygunluk açısından daha zor şartlar sunmaktadır. EV üreticileri, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve şarj güvenliği özelliklerini göz önüne alarak daha çok prizmatik hücreleri tercih etmektedir.

2.2.4. Batarya termal yönetim sistemleri

Günümüzde, Li-ion bataryalar elektrikli araçlar alanında kendini kanıtlamıştır. Bunun temel sebeplerinden bir tanesi enerji yoğunluk performanslarının oldukça yüksek olmasıdır. Ancak, daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi bazı problemlerin çözümü hala masada durmaktadır. Bu problemler; düşük batarya ömrü, yüksek şarj süresi, yüksek maliyet, sürüş menzili problemi olarak sıralanabilirler. Bir diğer büyük problem ise çalışma sıcaklığı çok yüksek değerlere çıktığında mevcut enerji ve batarya ömrünün bundan olumsuz etkilenmesidir (Benabdelaziz vd., 2020).

Katot malzemesi ve sıcaklık, lityum iyon batarya hücresinin deşarj kapasitesini belirleyen temel göstergelerdir. Sıcaklık arttıkça lityum iyon bataryadaki aktif elektrolitin aktivitesi azalır ve deşarj kapasitesi önce artar sonra azalır (Lv vd., 2021).

Li-ion batarya üreticileri, genellikle Li-ion bataryanın çalışma aralığını şarj durumu için 0–45 °C arasında, deşarj işlemi için -20 – 60 °C arasında önermektedir. Ancak, batarya üreticileri bu sıcaklıkları bataryanın çalışması gereken en uç noktalar olarak vermektedir. Dolayısıyla, bataryadan maksimum verimi elde edebilmek için batarya çalışma sıcaklığının belirli bir aralıkta kalması gerekmektedir. Li-ion bataryalar için optimum çalışma sıcaklık aralığını belirlemek için yapılan birçok çalışmada farklı değerler verilse de genel kabul olarak Li-ion bataryaların optimum çalışma sıcaklığı 15-35 °C aralığında olduğu düşünülmektedir (Ma vd., 2018). Aynı zamanda, batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkının 5 °C'yi aşmaması önerilmektedir (Peng vd., 2019). Yapılan çalışmalar, hücre içinde 5 °C'den fazla sıcaklık farkı olduğu durumda termal yaşlanmanın 25% arttığını ve güç kapasitesinin 10% düştüğünü göstermektedir (J. Kim vd., 2018).



Şekil 2. 10. Li-ion bataryalarının çalışma sıcaklık aralıkları ve etkileri (Wang vd., 2019)

Şekil 2.10’da görüleceği gibi düşük sıcaklıklarda artan elektrolit viskozitesi ile birlikte ara yüzeydeki aktivite yavaşlar ve elektrokimyasal reaksiyonlar yavaşlayarak batarya kapasitesinde düşümlere sebep olur. -20 °C’de yapılan ölçümlerde, iç dirençlerin artmasından dolayı kapasitede 60% oranında düşüş olmaktadır (Peng vd., 2019).

Batarya çalışma sıcaklığının düşük olmasında çevre sıcaklığı kritik bir rol oynarken, yüksek sıcaklık durumuna çevresel etkilerin yanı sıra bataryanın elektrokimyasal reaksiyonları sonrası ortaya çıkan tersinir ve tersinmez ısı üretimi de eklenir. Özellikle yüksek akımda şarj ve deşarj işlemleri uygulanması durumunda bataryada üretilen ısılar daha da artmaktadır. Batarya çalışma sıcaklığında görülen çok yüksek değerler hücrenin zarar görmesine ve işlevini yitirmesine neden olabilecek bazı problemlere neden olabilir. Elektrot malzemelerinin artan reaktivitesi ve bunun sonucunda ciddi katı elektrolit interfaz (SEI) oluşumu gibi yan reaksiyonlar nedeniyle yüksek sıcaklıklarda döngü stabilitesinin bozulduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, 50 °C sıcaklığın üzerindeki değerlerde çevrim ömrü azalacaktır ve 70 °C üzerindeyse termal kaçaklar meydana gelecektir.

Bataryaların, önerilen sıcaklık değerlerinin dışına çıktığında karşılaşılabileceği problemler yukarıda sıralanmıştır. Tüm bu problemler göz önüne alındığında, EV’lerde Li-ion

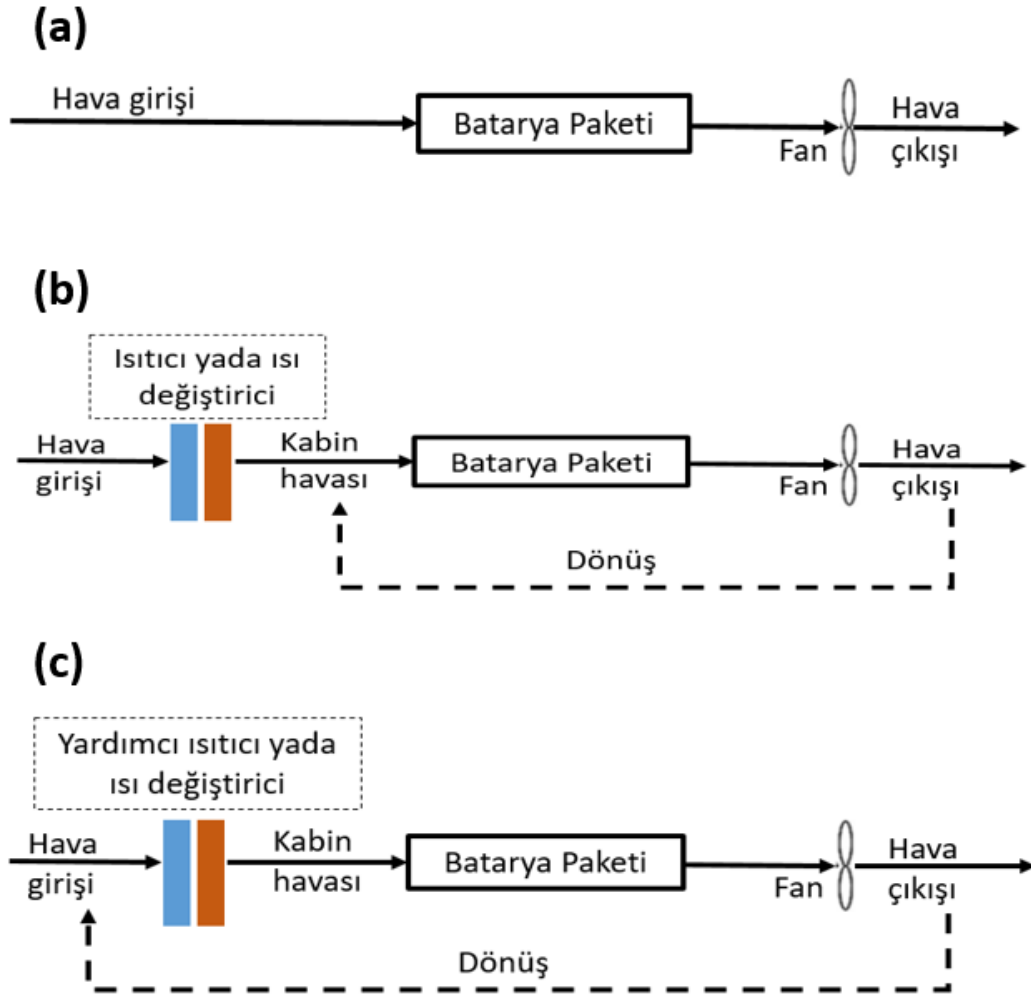
bataryaların sıcaklığının belirli bir düzeyde ve homojen tutulması büyük önem taşımaktadır. Batarya performansının yanında çıkabilecek potansiyel problemde meydana gelebilecek güvenlik zaatları ve çıkacak maliyetler düşünöldüğünde bataryaların termal bir yönetim sistemine ihtiyacı olduğu açıkça görölmektedir.

EV ve HEV’lerde termal yönetim sistemleri temel olarak; aktif ya da pasif, seri ya da paralel, ısıtma ya da soğutma, hava ya da sıvı ya da faz değıştirci malzeme ya da ısı borusu ya da termoelektrik soğutucu olarak sınıflandırılırlar (Siddique vd., 2018).

Aktif sistemler, dışarıdan harici bir güç kaynağına ihtiyaç duyan, pompa ya da fan içeren sistemlerdir. Pasif sistemler ise dışarıdan herhangi bir harici güce ihtiyaç duymazlar. Ancak bataryanın ısınan yüzeylerinden ısıyı alabilmesi için ısı borusu ya da PCM gibi bazı özel yapıları içerirler. Aktif ve pasif sistemler kıyaslandığında, aktif sistemlerin maliyetleri genelde daha yüksek olsa da ısıl yönetimde daha faydalı olduğu görölmektedir. PCM bazlı pasif sistemler genellikle sıcaklık homojenliğini sağlamakta, ısı boru bazlı sistemlerse daha fazla ısı çekmekte kullanılmaktadır.

Hava bazlı BTYS:

Hava bazlı BTYS (Batarya Termal Yönetim Sistemi), pasif hava soğutma, aktif hava soğutmalı sistemler olarak iki ana kategoriden oluşur.



Şekil 2. 11. Hava bazlı ısı yönetim türleri: **a)** Pasif hava soğutma, **b)** Pasif hava soğutma ve ısıtma, **c)** aktif hava soğutma ve ısıtma

Şekil 2.11’de pasif ve aktif hava soğutmalı sistemlerin şematik gösterimleri görülmektedir. Pasif hava soğutmalı sistemler, aktif hava soğutmalı sistemlerle kıyaslandığında daha düşük ısı transferi sağlayabilir. Dolayısıyla ısı transfer katsayısı düşük olduğundan sadece düşük yoğunluklu batarya hücreleri için uygundur. Pasif hava soğutmalı sistemlerin kullanılmasının tek avantajı, aktif hava soğutmaya kıyasla daha düşük maliyetle olmasıdır (Al-Zareer vd., 2018).

Çizelge 2. 3. Endüstriyel uygulamalarda BTYS için kullanılan hava soğutma sistemlerinin özeti

Endüstriyel Uygulama	Hücre Tipi & Boyutu (mm)	Soğutma Sistemi	Nominal Deşarj Oranları	Batarya Paketindeki Toplam Hücre	Batarya Paketinin İçeriği (kWh)	Hücre Kapasitesi (Ah)
Nissan Leaf EV	Pouch NMC 7.91 X 216 X 261	Pasif (Hava soğutma)	1/3 C-1 C	192	24	33
BYD BESS	Prizmatik LFP 58 X 145 X 415	AC aktif (Hava soğutma)	-	10	12,8	230
Samsung SDI Mega M2-P2 BESS	Prizmatik NMC 174 x 93 x 23 - 173 X 125 X 45	HVAC aktif (Hava soğutma)	1 C-2,5 C	22	6 8	68 - 94 - 111
HITACHI BESS	Silindirik CH75-6	Zorlanmış (Hava soğutma)	1 C-2,2 C	6	1,665	75
TESVOLT BESS	Prizmatik NMC 173 X 125 X 45	HVAC (Hava soğutma)	1 C	14	4,87	94
Integrated BMW BESS	Prizmatik NMC 173 X 125 X 45	AC aktif (Hava soğutma)	0,3 C	96	33,2	94
JRC's Smart Grid BESS	Prizmatik NMC 148 X 98 X 27	HVAC aktif (Hava soğutma)	- 0,4 C	16	3,97	68

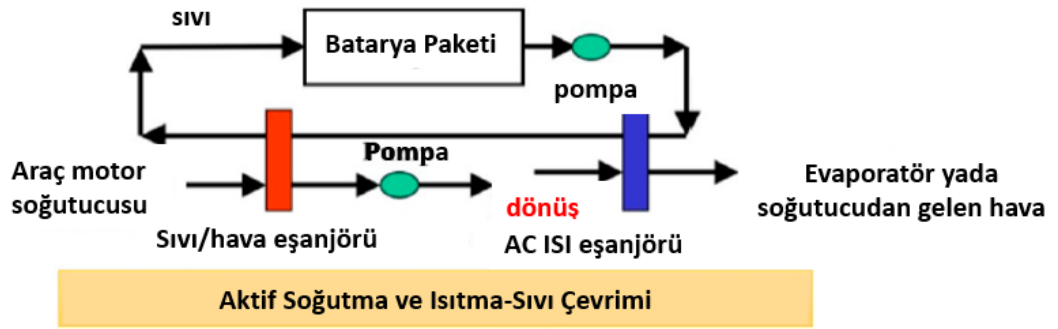
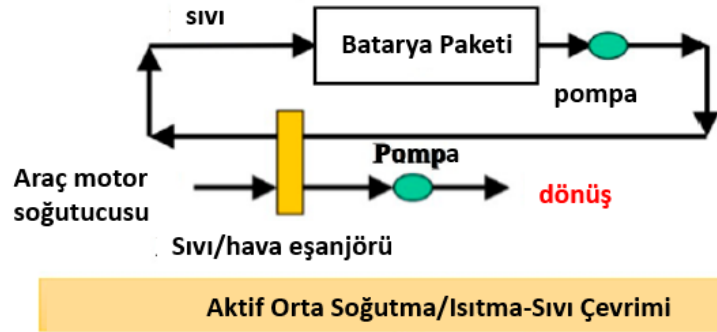
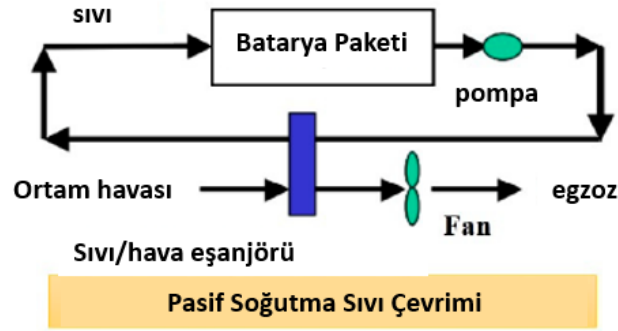
Aktif hava soğutma için, yüksek güçlü bir fan üfleyici gibi enerji tüketen bir kaynak kullanarak ısı transferini geliştirmek için hava akışı batarya paketine zorlanır. Çizelge 2.3'te de görüldüğü gibi, endüstriyel uygulamalarda kullanılan bataryalar için önerilen hava bazlı BTYS'lerin çoğu aktif hava soğutma sistemleridir. Bunun nedeni, aktif hava soğutmanın doğal hava soğutmadan daha yüksek bir ısı transfer katsayısına sahip olmasıdır. Ayrıca, endüstriyel uygulamalarda kullanılan bataryalar zorlu koşullar altında çalışır ve bu da batarya hücrelerinin yüksek şarj, deşarj hızında çalıştığı ve herhangi bir olumsuz etki ve güvenlik tehlikesini önlemek için daha verimli bir soğutma sistemi gerektirdiği anlamına gelir.

Sıvı bazlı BTYS:

Sıvı bazlı BTYS, EV uygulamalarında en yaygın şekilde kullanılan termal yönetim sistemidir. Bunun ana sebebi, yüksek ısı transfer katsayısı, yüksek verim ve bütünleşik bir yapıya sahip olmasıdır. Hava bazlı termal yönetim sistemleri ile kıyaslandığında, bataryanın aynı ortalama sıcaklık seviyesine ulaşması için 2-3 kata kadar daha az enerji harcamaktadır. Sıvı bazlı BTYS bazı dezavantajları karmaşıklık, maliyet, ek ağırlık ve sıvıyı sistemde dolaştırmak için gereken ek güç ihtiyacıdır.

Sıvı bazlı BTYS, sistemin termal kontrolü için temelde iki farklı sıvı grubu kullanmaktadır. Bu sıvılar, batarya hücreleriyle direkt temas halinde olan yalıtkan mineral yağlar ve batarya hücrelerine direkt olarak temas etmeden genellikle soğutucu plaka yardımıyla ısı transferi sağlayan geçirilen sıvılardır. Yalıtkan sıvı kullanılan yöntemde, batarya modülü direkt olarak mineral ağa batırılmaktadır. Direkt temas olmayan yöntemde ise batarya modüllerinin etrafına soğutma-ısıtma plakaları yerleştirip içlerinden sıvı geçirilerek ısı transferi sağlanmaktadır.

Sıvı bazlı BTYS, aktif sıvı soğutmalı ve pasif sıvı soğutmalı olarak iki temel kategoriye ayrılmıştır. Pasif soğutma sistemi için harici herhangi bir ek yük gerekmeden, radyatör kullanılarak soğutma yapılmaktadır. Ancak tahmin edileceği gibi, aracın hareket hızı, çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı gibi bazı faktörler radyatörde meydana gelecek ısı transfer miktarına direkt etki etmektedir. Ortam sıcaklığının batarya sıcaklığından daha yüksek ya da birbirine yakın olduğu durumlarda, sistemin verimliliği düşecektir. Ek olarak, pasif sıvı soğutma sisteminde sadece soğutma yapılabilir ve bataryanın çalışma sıcaklık aralıklarına baktığımızda bazı ülkelerde ya da ekstrem durumlarda yetersiz kalacaktır.

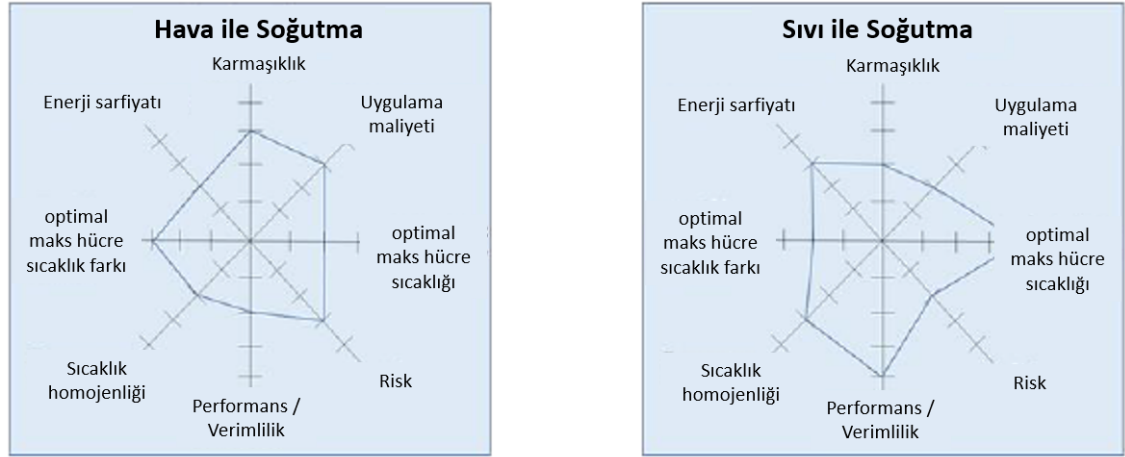


Şekil 2. 12. Pasif ve aktif soğutma/ısıtma çevrimleri (Hong vd., 2017)

Pasif sıvı soğutmalı sistemde kullanılan akışkan, bir pompa yardımıyla batarya grubuna gönderilir. Batarya grubu ile aralarında ısı transferi gerçekleşerek bataryanın sıcaklığı düşerken, sıvının sıcaklığı artar. Batarya paketinden çıkan sıcaklığı artmış sıvı, radyatör grubuna giderek radyatör ve fan tarafından soğutulur. Ardından tekrar batarya grubuna giderek sirkülasyon tamamlanmış olur.

Aktif sıvı soğutmalı-ısıtmalı sistemde iki adet döngü vardır. İlk döngü soğutucu akışkanın pompa yardımı ile sistemde dolaşmasına, ikinci döngü ise ısıtma veya soğutma moduna göre çalışmaktadır. Soğutma modunda iken üstte bulunan ısı eşanjörü bir evaporatör işlevi görürken ısıtma modunda çalıştığında dört yollu vana vasıtası açılmaktadır. Üstte

bulunan ısı eşanjörü kondenser, altta bulunan ısı eşanjörü ise evaporatör işlevi görür.



Şekil 2. 13. Hava ve sıvı soğutma için genel değerlendirme (Chen vd., 2015; Yeow vd., 2012)

Hava soğutmalı ve sıvı soğutmalı sistemler karşılaştırıldığında, sıvı soğutmalı sistemlerin yapısı, ağırlığı, bakımı ve yer gereksinimi açısından daha karmaşık olduğu görülmektedir. Ayrıca, sisteme eklenen ısı değiştiriciler de ek maliyetler olarak karşımıza çıkarken, herhangi bir sızdırma problemi karşısında da araç güvenliğini tehlikeye atma potansiyeli bulunmaktadır. Sızıntı olması durumunda, kullanılan sıvının elektriksel iletkenliği yüksek olduğundan, pozitif ve negatif terminallerin birbiri ile temasına neden olarak kısa devreye neden olabilir.

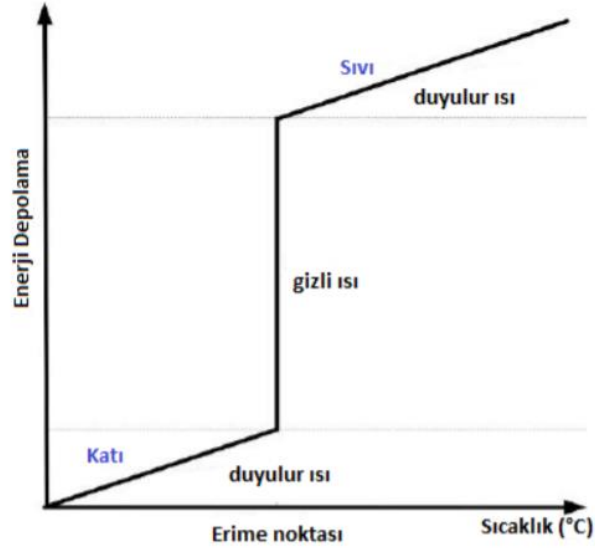
Hava soğutmalı sistemler, araçta daha az yer kaplamasının yanı sıra araç hızıyla orantılı olarak verimi artırır. Basit yapısı, düşük maliyeti ve bakımı açısından daha avantajlıdır. Batarya hücre geometrileri düşünüldüğünde, özellikle silindirik batarya hücrelerinin soğutulmasında tasarım açısından daha avantajlıdır. Diğer yandan, yüksek akım gereksinimi bulunan elektrikli araçlar batarya fazla ısınacağı için ısı transfer miktarının olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. Nispeten daha düşük ısı transfer katsayısına sahip olan hava bazlı soğutma sistemi, batarya grubunun sıcaklığını istenilen seviyeye çekememe ihtimalini bulundurmaktadır. Dolayısıyla batarya hücrelerinin hasar alması ve çalışmayı durdurmasına sebep olabilir. Sıvı soğutmalı sistemlere baktığımızda ise ısı transfer katsayısının çok daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Termal iletkenlik, ısı

kapasitesi ve ısıtma-soğutma kontrolü açısından sıvı soğutmalı sistemler daha verimli çalışmaktadır. Ayrıca, uniform hücre sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklığı istenilen seviyelerde tutabilme bağlamında bakıldığında, yüksek sıcaklıktan ötürü bataryada meydana gelebilecek hücre yaşlanması, çevrim ömrünün azalması ve güç azalması problemleri de sıvı soğutmalı sistemde çözülebilmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçlarda yoğunlukla prizmatik batarya hücreleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi, prizmatik hücrelerin enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve şarj güvenliği açısından ön plana çıkmasıdır. Ancak prizmatik hücrelerin en büyük sorunlarından biri, termal yönetiminin diğer batarya hücresi geometrilerine göre daha zor olmasıdır. Öte yandan, termal yönetim açısından soğutma sistemi olarak sıvı soğutma sistemlerinin yaygın olarak kullanılmaktadır.

FDM bazlı BTYS:

Faz değiştirici, fiziksel hal değişimine uğrarken sıcaklığı artmadan, termal enerjiyi depolayarak geçebilen malzemelerdir. BTYS’de faz değiştirici malzeme erime sırasında gizli ısıyı sınırına ulaşana kadar absorbe eder ve bu sayede sıcaklık bir müddet aynı seviyede tutulacaktır. Faz değiştirici malzemeler, fiziksel hal değişimine uğrarken sıcaklığı artmadan, termal enerjiyi depolayarak geçebilen malzemelerdir. FDM, hava soğutmalı ve sıvı soğutmalı sistemlere entegre edilerek de kullanılabilir.



Şekil 2. 14. Faz değişim malzemesinin sıcaklık-enerji depolama grafiği (Yang vd., 2019)

2.2.5. Li-ion batarya karakteristikleri

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çeviren cihazlardır. Bu çalışmada çokça kullanılan ve batarya çalışma koşullarını karakterize etmekte faydalanılan değişkenler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Hücre, Modül ve Batarya Paketi:

Elektrikli araçlar, seri ve paralel olarak düzenlenmiş ayrı hücreler ve modüllerden oluşan yüksek voltajlı bir batarya paketine sahiptir. Bir hücre, bir bataryanın alabileceği en küçük, paketlenmiş formdur ve genellikle bir ila altı vol seviyesindedir. Bir modül, genellikle seri veya paralel olarak bağlanan birkaç hücreden oluşur. Daha sonra modüller de kendi arasında tekrar seri veya paralel olarak birbirine bağlanarak bir batarya paketi oluşturulur.

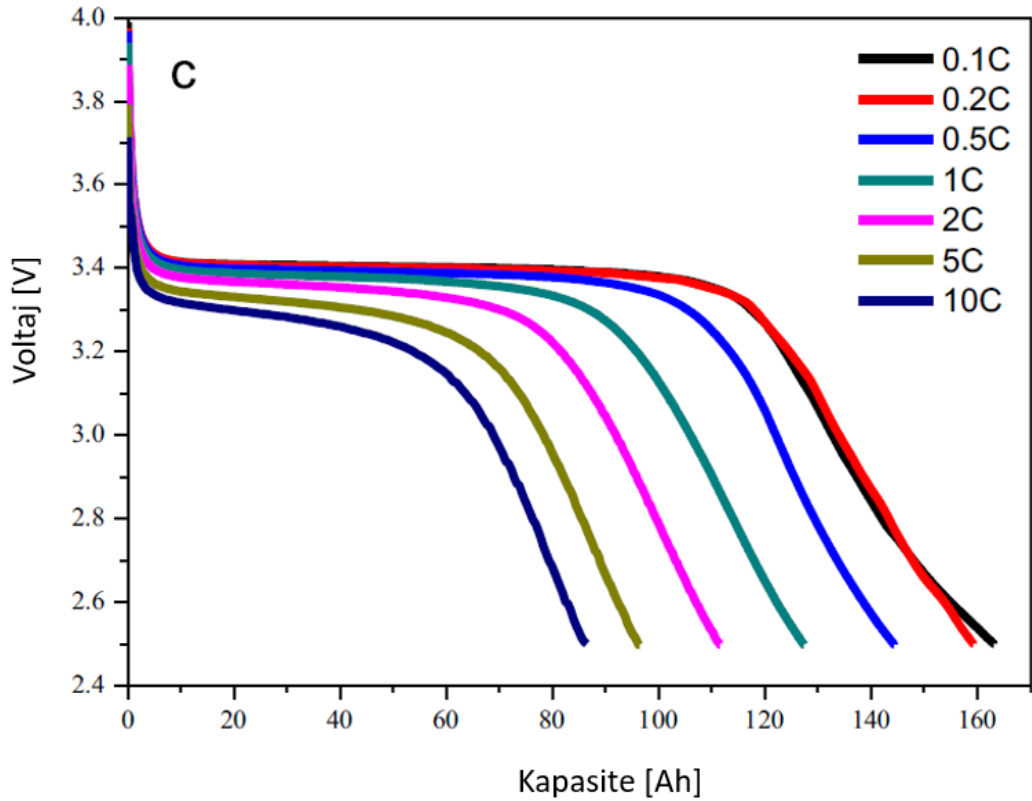
Batarya sınıflandırılması:

Bataryalar, içeriğinde farklı kimyalara sahip olabilmektedir. Batarya geliştirmede denge

sağlanması gereken temel iki özellik enerji ve güçtür. Bataryalar hem yüksek güce hem de yüksek enerjiye sahip olamazlar. Bu da bataryanın çalışma karakteristiğine ve batarya seçimine etkiyen ana faktörlerden biridir.

Deşarj oranı (C)

Batarya temel özelliklerine bakıldığında, bataryalar arasında oldukça değişken olan batarya kapasitesini normalleştirmek için deşarj akımı genellikle bir C oranı olarak ifade edilmektedir. C, bataryanın maksimum kapasitesine göre boşalma hızının bir ölçütüdür. Örneğin 1 C deşarj oranı denildiğinde, bataryanın voltajının bir saatte tüketileceği bir akım kullanılacak anlamına gelmektedir. 2 C deşarj oranı için ise batarya kapasitesi olan Q_{bat} yarım saatte bitecek şekilde akım verilecek demektir. C/2 deşarj oranında ise tam tersi olarak, bataryayı iki saatte boşaltacak akım kullanılacaktır.



Şekil 2. 15. Farklı deşarj oranlarına bağlı voltaj – kapasite grafiği (J. Lu vd., 2015)

Bu durumda, C arttıkça bataryadan çekilecek olan akım değeri artacak ve bataryanın

boşalma süresi azalacaktır. Çizelge 2.4'te farklı C göre kullanılacak akım ve batarya deşarj süreleri gösterilmiştir. Bu değerin formülü

$$C \left[\frac{1}{h} \right] = \frac{I [A]}{Q_{bat} [Ah]} \quad (2.1)$$

olarak tanımlanır.

Çizelge 2. 4. Deşarj oranlarına bağlı batarya çalışma değerleri

Deşarj Oranı C [1/h]	Kapasite Q [Ah]	Deşarj Akımı I [A]	Deşarj Süresi t [sn]
5 C	30	150	720
4 C	30	120	900
3 C	30	90	1200
2 C	30	60	1800
1 C	30	30	3600
0,5 C	30	15	7200
0,33 C	30	9,9	10910
0,2 C	30	6	18000
0,1 C	30	3	36000

Batarya durumu:

Bataryanın anlık durumunu ifade eden bazı parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

Şarj Durumu (State of Charge - SOC) (%):

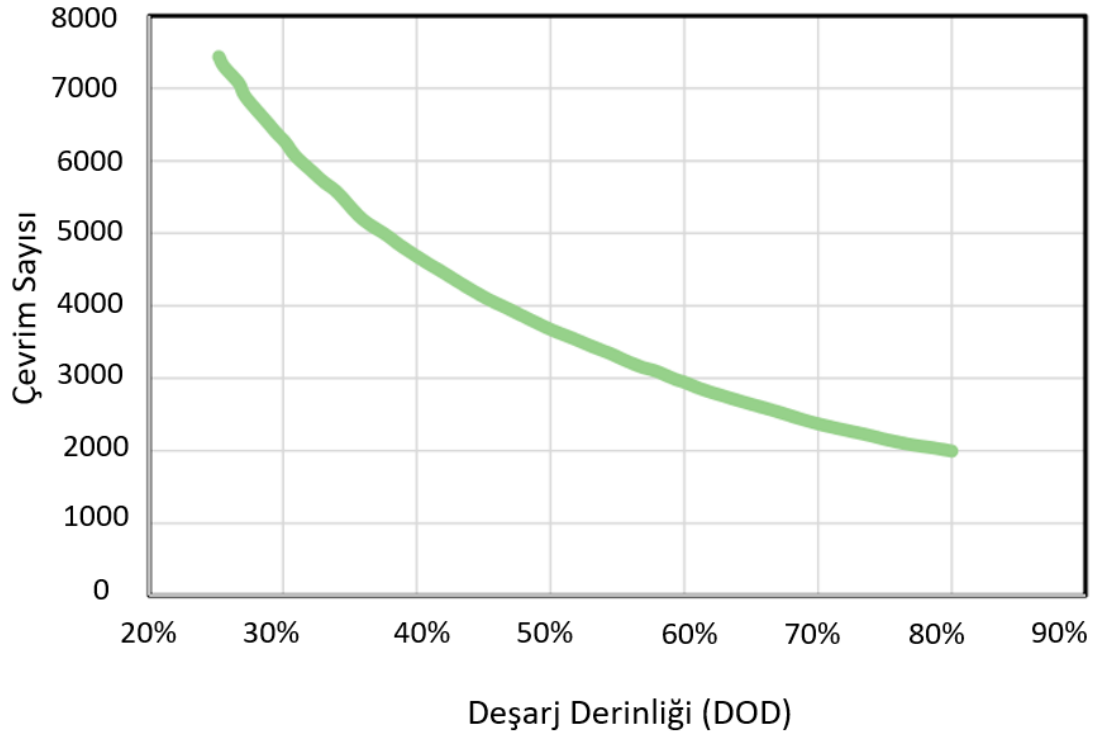
Anlık batarya kapasitesinin, maksimum batarya kapasitesine göre yüzdesi olarak ifade edilmektedir. SOC, zaman içinde batarya kapasitesindeki değişimi belirlemek için genellikle akım integrali kullanılarak hesaplanır (Ahmed vd., 2014).

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{Q_n} \int_{t_0}^{t_0+t} I_{bat}(dt) \quad (2.2)$$

SOC(t) anlık batarya kapasitesi iken, $SOC(t_0)$ ise ilk durumdaki şarj durumunu göstermektedir. Nominal kapasite Q_n ile ifade edilmekte ve I_{bat} ise şarj ya da deşarj akımı olarak formüle dahil edilmiştir.

Deşarj Derinliği (Depth of Discharge – DOD):

Maksimum kapasitenin yüzdesi olarak ifade edilen, boşaltılmış batarya kapasitesi yüzdesidir. SOC değeri 1 iken DOD değeri 0'dır ve SOC değeri 0 iken DOD değeri 1'dir. Dolayısıyla DOD değeri, SOC değerinin tam tersi olarak da düşünülebilir.



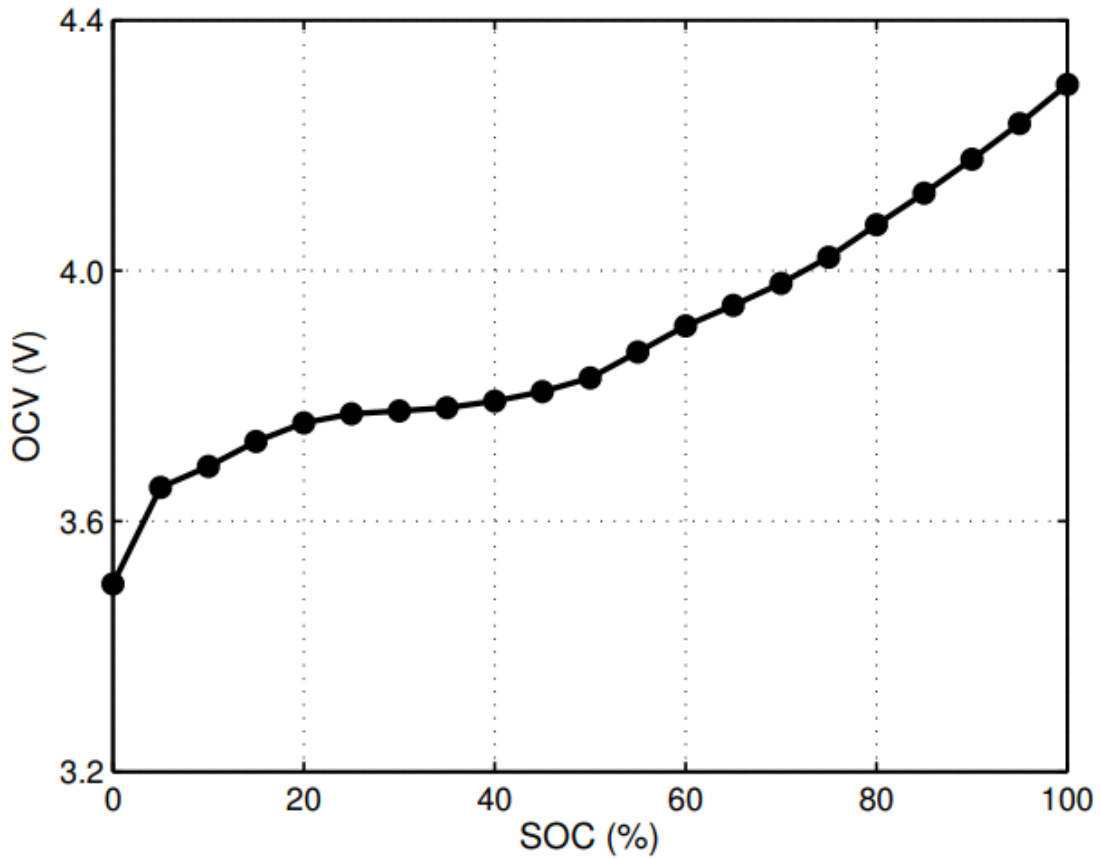
Şekil 2. 16. Deşarj derinliğine bağlı batarya çevrim sayısı

Bir deşarj işleminin derin deşarj olarak adlandırılabilmesi için en az 80% DOD değerine ulaşması gerekmektedir. Bataryalar için deşarj derinliğinin, çevrim ömrü açısından

olumsuz etkiler yaratmasından ötürü çok yüksek olması istenmemektedir (Elshurafa & Aldubyan, 2019).

Terminal Voltajı ve Açık Devre Voltajı (OCV):

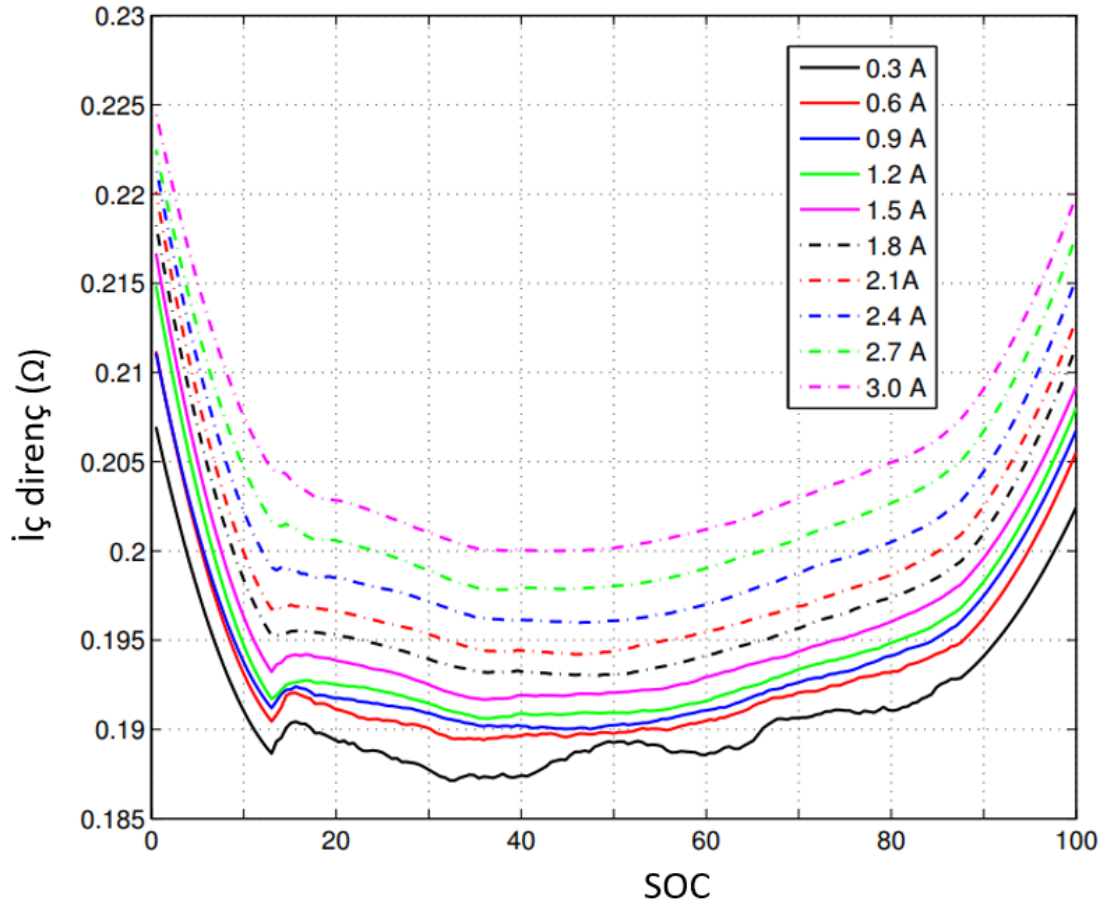
Terminal voltajı, adından da anlaşılacağı gibi yük uygulanan batarya terminalleri arasındaki voltajdır. Terminal voltajı SOC ve deşarj/şarj akımına göre değişmektedir. Açık devre voltajı ise batarya terminalleri arasındaki yük uygulanmadan elde edilen voltajdır. Açık devre voltajı, bataryanın SOC değerine bağlıdır ve şarj durumuyla birlikte artmaktadır.



Şekil 2. 17. Oda sıcaklığında açık devre voltajı ve SOC% karşılaştırılması (Plett, 2004)

İç Direnç:

Batarya içindeki direnç, genellikle şarj ve deşarj için farklı olup, aynı zamanda bataryanın SOC değerine de bağlıdır. İç direnç arttıkça batarya verimliliği azalır ve şarj enerjisinin çoğu ısıya dönüştürüldüğü için termal kararlılık azalır.

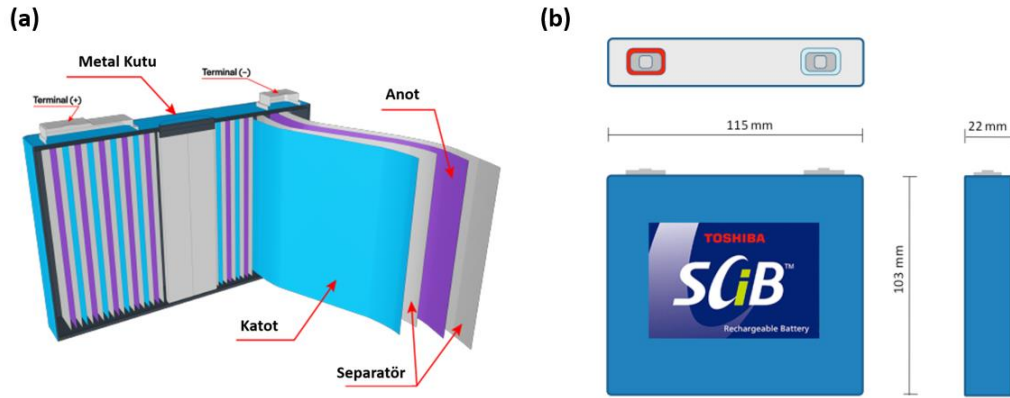


Şekil 2. 18. Farklı deşarj akımları ve SOC seviyeleri için iç direnç değerlerinin değişimi (D. Kim vd., 2013)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Batarya Modülü ve Deneysel Sistem

Li-ion bataryalar yüksek voltajlarda ve geniş bir aralıkta çalışabilir. Aynı zamanda kullanılmadıklarında kapasite kaybına uğramazlar. Li-ion batarya hücrelerinin başlıca dezavantajları ise maliyetinin yüksek olması ve sıcaklığa karşı hassas olmasıdır. Özellikle yüksek sıcaklıklara çıkıldığında termal bozulmaların etkisi ile kapasite kaybı gözlenmektedir (Amini vd., 2019). Dolayısıyla bu tür bataryaların soğutma ihtiyacı ve ısı yönetimi son derece önem arz etmektedir. Şekil 3.1 a’da Li-ion batarya hücrelerinin başlıca 4 ana bileşeni: Anot (-), Katot (+), seperatör ve elektriği ileten sıvı olarak yer almaktadır ve Şekil 3.1 b’de ise tezde çalışmasında seçilen batarya hücresi yer almaktadır. Belirtilen bu hususlar dikkate alınarak elektrikli taşıtlarda kullanılan ve ayrıca yaygın endüstriyel kullanım alanlarına sahip Li-ion batarya hücresi tez çalışmasında kullanılmak üzere belirlenmiştir.



Şekil 3. 1. a) Li-ion batarya hücresinin ana bileşenleri, **b)** Tez çalışmasında belirlenen Li-ion bataryanın ana ölçüleri (mm)

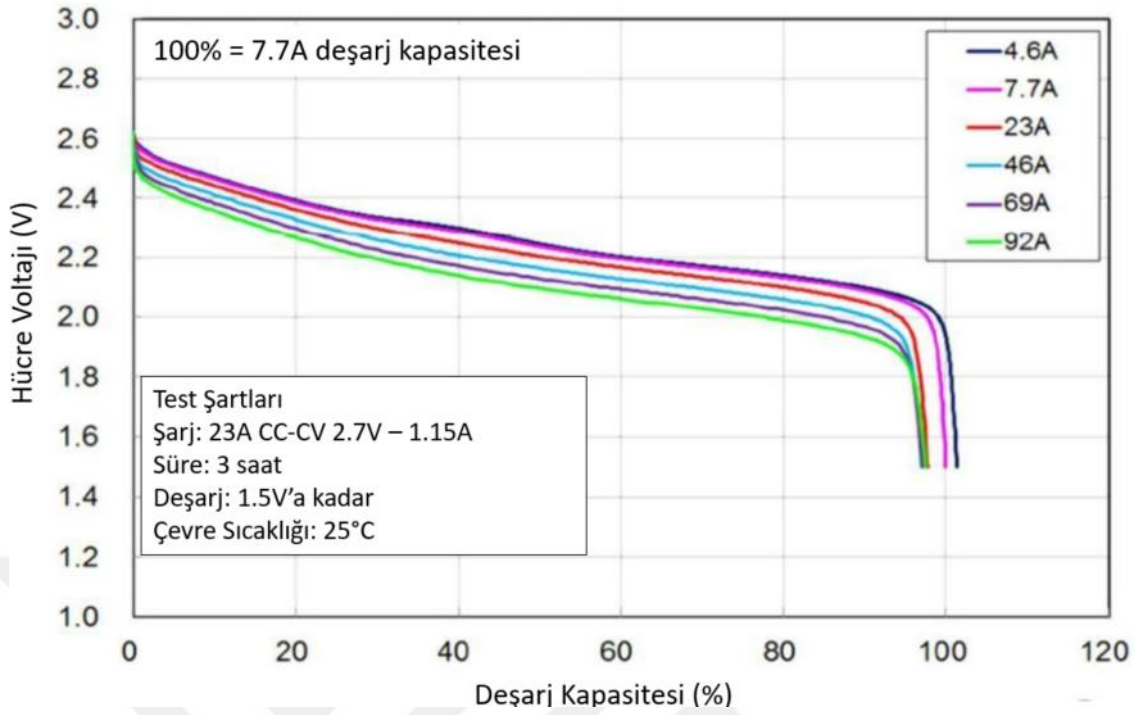
Tez çalışmasının ana konulardan biri olan farklı sıcaklıklarda çalışma karakteristiğinin tespit edilmesi adına geniş bir çalışma sıcaklığı aralığı olan bir hücre olarak ön plana çıkmaktadır. Önceki bölümlerde bahsedilen hücre karakteristikleri göz önüne alınarak, çalışmalarda kullanılacak batarya hücresi olarak 23 Ah nominal kapasiteye sahip ve nominal voltajı 2,3 V olup 1,5 V - 2,7 V arasında çalışabilen Toshiba SCiB 23 Ah batarya

hücresi seçilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan ve yukarıda ebatları verilen batarya hücresinin özellikleri Çizelge 3.1’deki gibidir.

Çizelge 3. 1. Tez çalışmasında kullanılan batarya hücrelerinin özellikleri

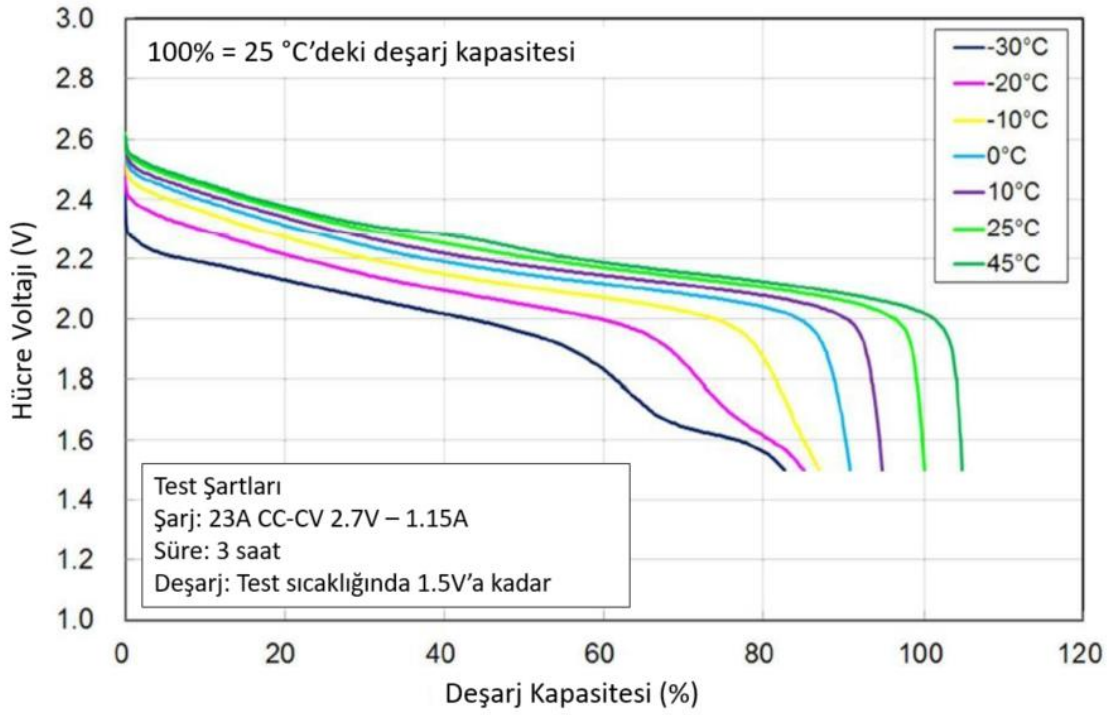
Hücre Özellikleri	Değerler
Nominal Kapasite	23 Ah
Nominal Voltaj	2,3 V
Ağırlık	550 g
Enerji / Ağırlık	96 Wh/kg
Enerji / Hacim	202 Wh/L
Çalışma Voltajı	1,50 – 2,70 V
Çalışma Sıcaklığı	-30 – 55 °C

Batarya kapasitelerinin kullanımı sıcaklığa ve çekilen akıma (deşarj oranı) göre değişiklik göstermektedir. Sistemden daha düşük bir voltaj çekiliyorsa, bu kapasitenin daha verimli şekilde kullanıldığı anlamına gelmektedir. Şekil 3.2’de bu çalışmada kullanılacak olan batarya hücresinden çekilen akıma bağlıdeşarj kapasitesinin kullanım oranını göstermektedir. Aşağıdaki şekilde görüleceği gibi 1/5 C ve 1/3 Cdeşarj oranlarındadeşarj kapasitesi neredeyse 100% kullanılabilirken, akıma bağlı olarak (1 C, 2 C, 3 C, 4 C) akım arttıkçadeşarj kapasitesinin kullanım oranı düşmektedir.



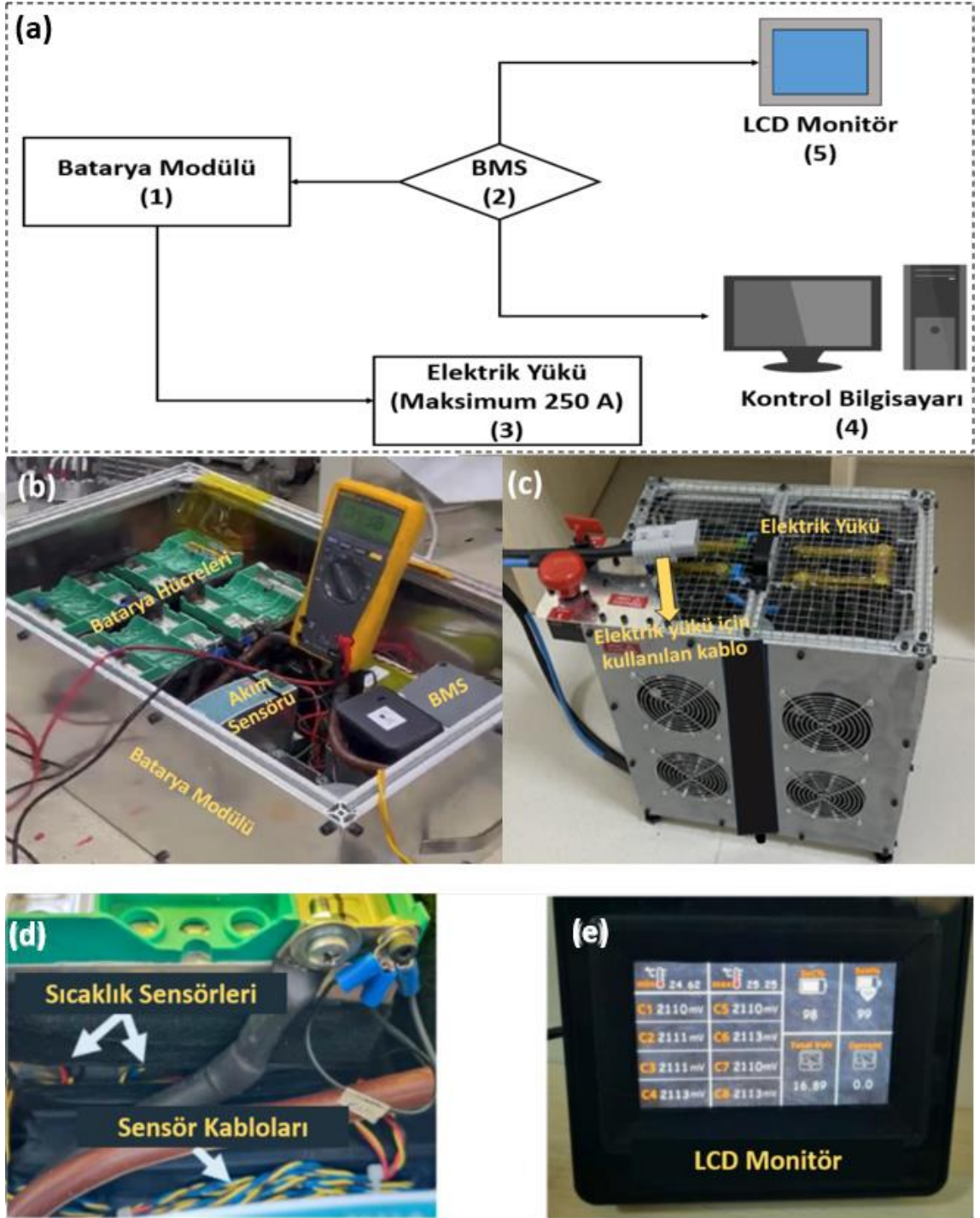
Şekil 3. 2. Çalışmada kullanılan batarya hücrelerinin 25 °C’deki deşarj oranı karakteristiği

Deşarj kapasitesini etkileyen bir diğer ana faktör ise çalışma sıcaklığıdır. Batarya hücresi elektrokimyasal reaksiyonların verimli şekilde gerçekleşmesi için belirli bir çalışma sıcaklık aralığında çalışmalıdır. Literatür araştırmalarında Li-ion batarya hücreleri için en uygun çalışma sıcaklık aralığı 25-50 °C olarak belirtilmiştir. Şekil 3.3’te bu çalışmada kullanılan batarya hücresinin 1 C deşarj oranında çalışırken sıcaklığa bağlı deşarj kapasitesi kullanımı görülmektedir. Grafikten de rahatlıkla görülebileceği gibi deşarj kapasitesi kullanım oranı, sıcaklığa bağlı olarak ciddi derecede değişmektedir. Bu çalışmanın ana amaçlarından biri de batarya hücresinin çalışma sıcaklığını optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutarak bataryadan en iyi verimi almaktır. Böylece, deşarj kapasitesi kullanımını maksimuma çıkararak, aracın menzilini yükseltmek hedeflenmektedir. Tezin hedeflerinden biri olan elektrikli taşıt atık ısı bileşenlerinden biri olan bataryalardan çekilen ısının iklimlendirme sistemine aktarılması ile menzil artışı açısından iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 3. 3. Çalışmada kullanılan batarya hücrelerinin çeşitli sıcaklıklardaki deşarj oranı karakteristiği

Gerçek koşullarda elektrikli taşıtlarda yüksek akımlara maruz kalan batarya paketi için Batarya yönetim sistemi ve algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. BTYS pasif ve aktif soğutma/ısıtma çevrimleri ile entegre çalışabilmektedir (Garud vd., 2023). Çalışma sıcaklığı çok yüksek değerlere çıktığında mevcut enerji ve batarya ömrünün bundan olumsuz etkilendiği ifade edilmektedir (Ouyang vd., 2020). Bu kapsamda tez çalışmasında daha yüksek akımlara çıkabilmek için BMS ihtiva eden batarya modülü deney düzeneği geliştirilmiştir. Daha yüksek akımlarda batarya güvenlik standartları gereği hücre ve modül parametrelerinin izlenmesi gerekmektedir (Previati vd., 2022). Bu kapsamda BMS içeren modül deney düzeneği (Şekil 3.4 ve Çizelge 3.2) ile aynı zamanda SOC, SOH (Batarya sağlık durumu), V (Voltaj), I (Akım) ve T (Sıcaklık) gibi batarya ısıl yönetimine yönelik parametreler anlık takip edilerek soğutma sürecine ilişkin deneysel veriler ile karşılaştırmalı veriler elde edilmiştir. Ayrıca batarya modülü için elde edilen deneysel veriler batarya hücrelerinin ve modülün laboratuvar ortamında karakteristiklerinin katalog verilerine ihtiyaç duyulmadan elde edilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 3. 4. (a) Çalışmada kullanılan deneysel sistemin şematik gösterimi (b) çalışma için geliştirilen batarya modülü, (c) deşarj prosesi için elektrik yükü, (d) sıcaklık sensörleri, (e) LCD monitör

Hücre ve modül karakteristikleri aynı zamanda Batarya modülü için oluşturulan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli ile elde edilen sonuçların doğrulanması sürecinde kullanılmıştır. Bu sayede farklı soğutucu plaka tasarımlarının batarya yüzey

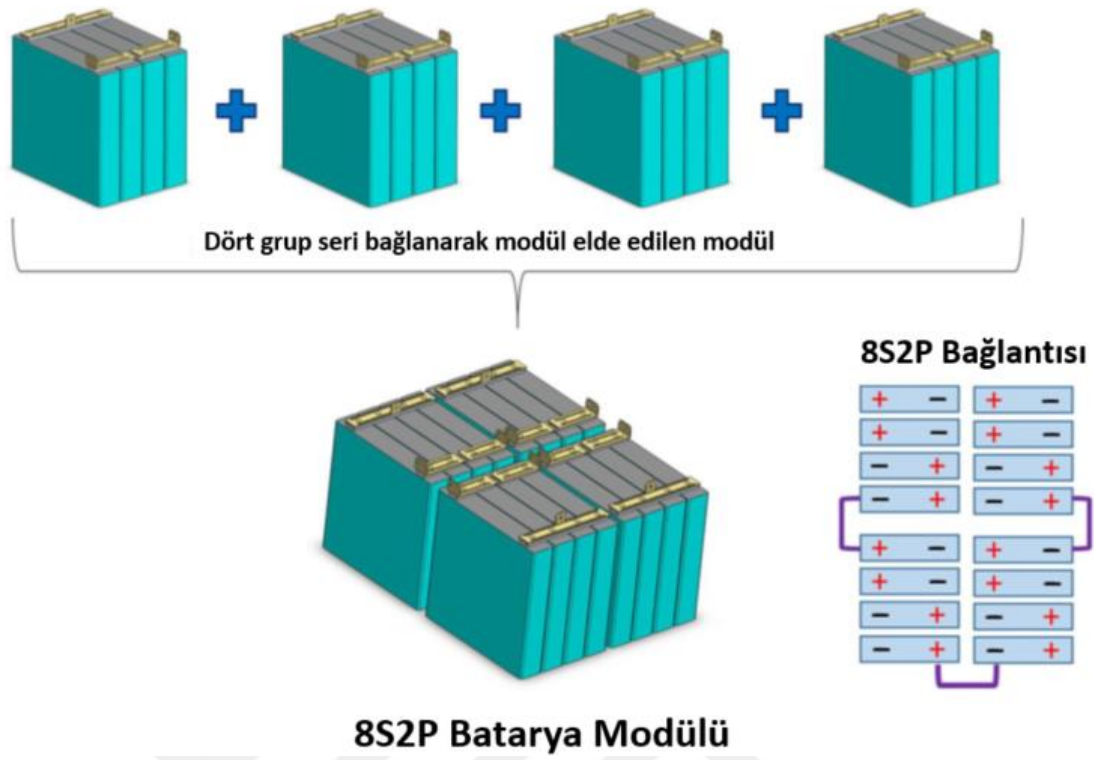
sıcaklığı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında oluşturulan ve batarya modülünü içeren deneysel sistemin şematik gösterimi Şekil 3.4'te görülmektedir. Deneysel sistem; batarya modülü (1), Batarya Yönetim Sistemi (2), Elektrik Yüğü (3), Kontrol Bilgisayarı (4) ve LCD monitör (5) olmak üzere beş ana bileşenden oluşmaktadır.

Çizelge 3. 2. Batarya modülü deney bileşenleri

Sıra No	Deneysel komponent	Özellikler
1	Batarya modülü	8S2P bağlantılı modül
2	Batarya yönetim sistemi (16 seri bağlamaya kadar)	CAN ve RS232 destekli
3	Elektrik yükü	250 A değerine kadar üç kademeli sabit akımda deşarj yapma olanağı
4	Kontrol bilgisayarı	Verileri almak için kullanılır
5	Batarya izleme arayüz LCD ekranı	Batarya hücrelerinin gerilim, sıcaklık ve çıkış akım değerlerini gösteren ekran

Bu çalışmada oluşturulan batarya sisteminde, her biri dörder hücreden oluşan dört adet modül olmak üzere toplamda 16 adet batarya hücresi vardır. Her modül kendi içerisinde 2P2S (2 paralel / 2 seri) olarak bağlanmıştır ve sabittir. Sistemde bulunan dört adet modül birbiri ile seri bağlanırsa Şekil 3.5'teki gibi 8S2P, paralel bağlanırsa 8S2P dizilimine sahip batarya sistemi elde edilebilir.



Şekil 3. 5. Tez çalışmasında kurulan 8S2P batarya modülünün elektriksel bağlantısı

Çalışmada kullanılacak ve ölçülecek değerler göz önüne alınarak sistemin Paralel-Seri dizilimi belirlenmiştir. Bu çalışmada çalışılacak maksimum deşarj oranı 4 C'dir. Bu yüzden maksimum deşarj oranı göz önüne alınarak sistem dizilimi için hesaplamalar yapmak gerekmektedir.

Şekil 3.6'da sistemin dizilimini belirlemek amacı ile yapılan hesaplamalar gösterilmiştir.

Tekil Hücre					
Özellikler				Charge/disc. current [A]	
V _{min}	V _{nom}	V _{maks}	Kapasite [Ah]	Daimi	Burst (>10 sn)
1.5	2.3	2.7	23	100	200

Sistem						
Sistem Devresi	V _{min}	V _{nom}	V _{maks}	Kapasite [Ah]	Daimi Deşarj [A]	Burst Deşarj [A]
16S	24.0	36.8	43.2	23.0	100.0	200.0
8S2P	12.0	18.4	21.6	46.0	200.0	400.0
4S4P	6.0	9.2	10.8	92.0	400.0	800.0
2S8P	3.0	4.6	5.4	184.0	800.0	1600.0
16P	1.5	2.3	2.7	368.0	1600.0	3200.0

Gerekli Akım Değeri [Amp]					
Sistem Devresi	1C	2C	3C	4C	8C
16S	23	46	69	92	184
8S2P	46	92	138	184	368
4S4P	92	184	276	368	736
2S8P	184	368	552	736	1472
16P	368	736	1104	1472	2944

Elektrik Motoru [kW]					
Sistem Devresi	1C	2C	3C	4C	8C
16S	0.85	1.69	2.54	3.39	6.77
8S2P	0.85	1.69	2.54	3.39	6.77
4S4P	0.85	1.69	2.54	3.39	6.77
2S8P	0.85	1.69	2.54	3.39	6.77
16P	0.85	1.69	2.54	3.39	6.77

Şekil 3. 6. İncelenecek deşarj oranlarına göre yapılan hesaplamalar ve tercih edilen sistem koşulları

Deneyisel sistemde kullanılan batarya modülünün karakteristikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Batarya modülünün şarj prosesinde yaklaşık 10 saat boyunca sabit bir 5 A seviyesinde akım kullanılır. Batarya yönetim sistemi verilen sabit akımın tüm hücrelere dengeli bir şekilde yönlendirilmesini sağlarken aynı zamanda şarj esnasında oluşabilecek herhangi bir problem durumunda şarj işlemini durdurur. 10 saatlik şarj prosesinin ardından hücrelerin şarj edilmesinden dolayı yükselen sıcaklık değerlerinin çevre sıcaklığına gelmesi için iki saatlik bir soğuma sürecine bırakılır. Çevre şartlarında stabil hale gelen batarya modülü ile istenilen elektrik yük verilerek deneyler gerçekleştirilir.

Çizelge 3. 3. Tezin deneysel çalışmalarında kullanılan batarya modülünün karakteristiği

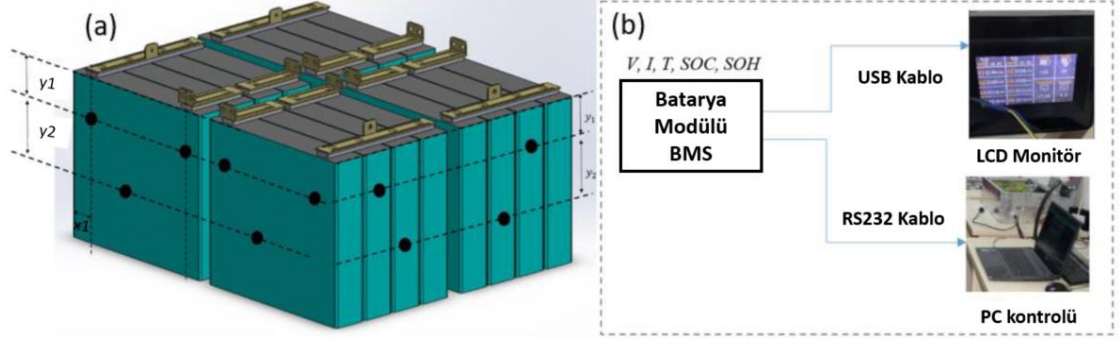
Özellik	Batarya Modülü
Hücre sayısı	16
Toplam deşarj akımı	46 A, 161 A, 197 A
Toplam nominal voltaj	18,4 V
Toplam kapasite	46 Ah
Şarj akımı ve süresi	5 A / 10 saat
Soğuma süresi	2 saat

3.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Veri Alma Sistemi

Deneysel düzende kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyetleri Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Batarya hücrelerinin çeşitli noktalarından yapılan sıcaklık ölçümleri farklı ölçüm aralığına ve hassasiyete sahip PT100 tipi sıcaklık sensörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan sıcaklık sensörlerinin ölçüm lokasyonları ve veri toplama sistemi Şekil 3.7 a ve Şekil 3.7 b'de verilmiştir.

Çizelge 3. 4. Deneysel sistemde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri

Cihaz	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Dahili sıcaklık sensörü	-50 °C / +400 °C	± 0,01 °C
Akım sensörü	0 – 250 A	± 1,0%
Sıcaklık sensörleri – PT100	-25 °C / +200 °C	± 0,1 °C



Şekil 3. 7. (a) Deneysel sistemde sıcaklık ölçümü alınan lokasyonlar, **(b)** deney verilerini toplama sistemi

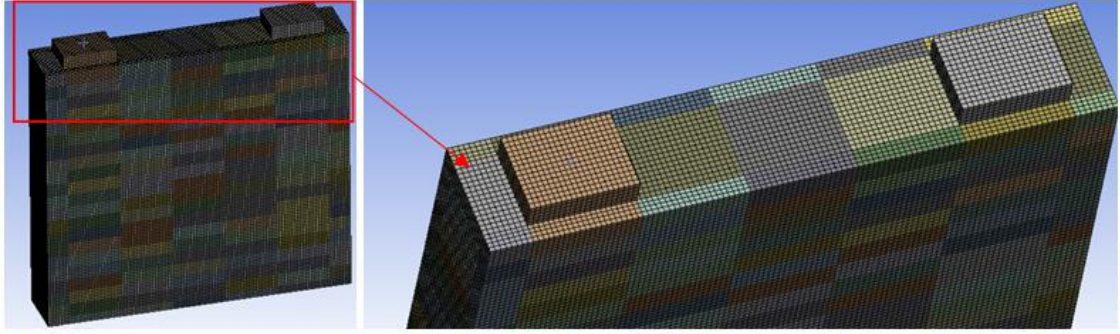
Deneysel düzende kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyetleri Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Batarya hücrelerinin kırk noktasından gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleri farklı ölçüm aralığına ve Şekil 3.7 a'da görüldüğü gibi batarya modülünün ön ve arka yüzünde bulunan hücrelerde üçer adet simetrik lokasyonda sıcaklık sensörleri bulunmaktadır. Güvenilir sıcaklık verileri elde etmek adına sıcaklık sensörlerinin yerleri batarya modülünün ön ve arka tarafları için simetrik şekilde seçilmiştir. Ön ve arka yüzlerde toplamda altı adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Lokasyonlar için seçilen x_1 , y_1 ve y_2 değerleri sırasıyla 15 mm, 20 mm ve 60 mm'dir. Ayrıca, ön ve arka yüzdeki hücrelerin arasında bulunan ve en yüksek sıcaklıkların beklendiği batarya hücrelerinin yan yüzlerine de ikişer adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Böylece, her bir dörtlü hücre grubu için on adet, tüm batarya modülü için ise toplam kırk adet sıcaklık sensörü bağlanmıştır. Sıcaklık sensörlerinden alınan veriler her 2,61 sn'de birer kere kaydedilmektedir ve ortaya çıkan sıcaklık verileri simülasyon çalışmalarının doğrulaması için kullanılacaktır.

Ölçülen sıcaklıkların verileri BMS'den RS232 kablosu ve USB yardımıyla alınabilmektedir. Deneyler sırasında, batarya modülünün voltaj değerleri (V), akım (A), şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) LCD monitör yardımıyla eşzamanlı olarak görülebilmektedir ve veriler PC'ye direkt olarak aktarılabilir.

3.3. Batarya Modülü İçin CAD Modeli ve Mesh Yapısı

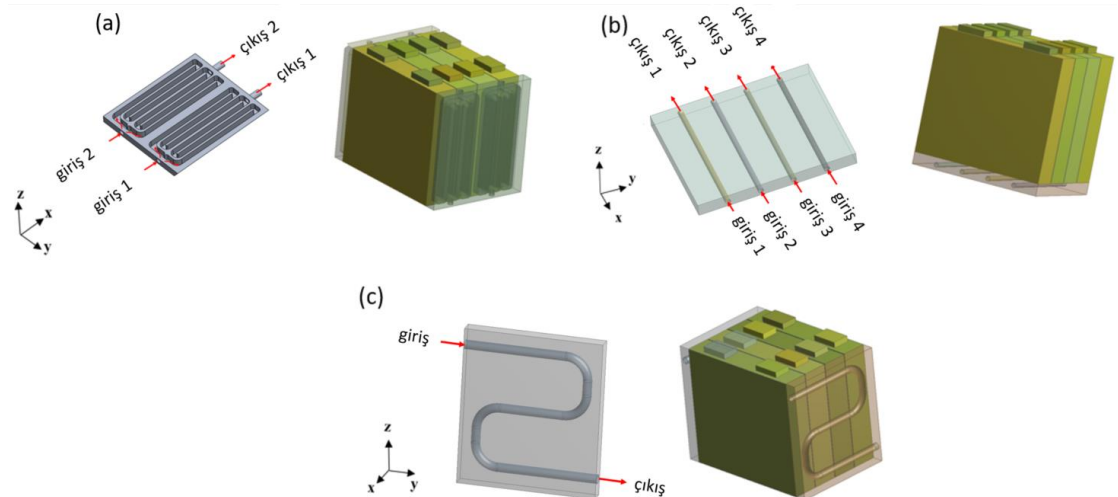
Batarya hücresinin CAD modeli oluşturulurken, mesh yapısının kontrol edilebilirliğini

arttırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için multizone yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem literatürde yaygın olarak kullanılmakta olup ilgili modelin alt modellere ayrılması şeklinde özetlenebilir.



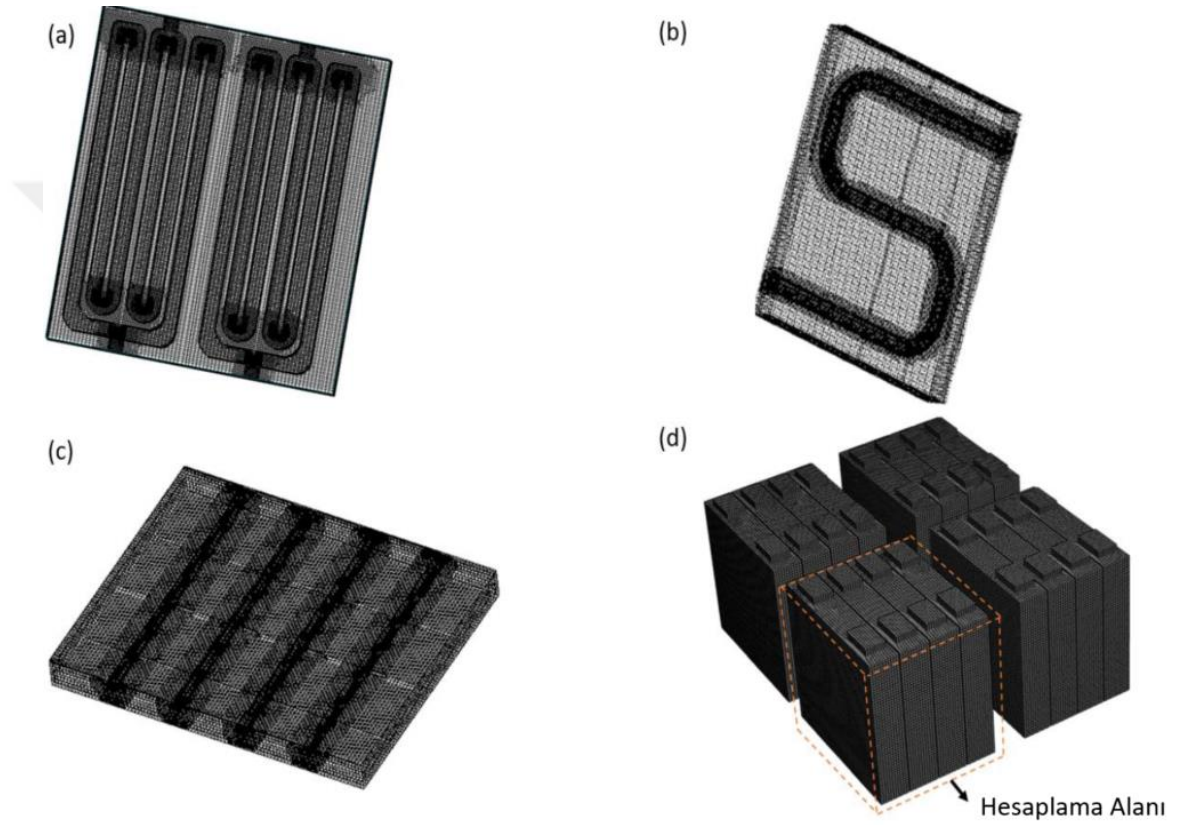
Şekil 3. 8. Multizone yöntemi ile mesh işlemi yapılmış batarya hücresi

Multizone metodu ile hücrenin her bölgesinde homojen mesh elemanı kullanma imkânı mevcuttur. Ancak daha fazla sayıda batarya paketi içeren sistemlerde çözümleme zamanlarında oldukça uzun sürelerle karşılaşıldığından dolayı bunun yerine *cut cell* olarak adlandırılan ve mümkün mertebe hexahedral elemanlardan oluşan çözüm ağı yapısı tercih edilmiştir. Şekil 3.8’de tekil bir batarya hücresinin multizone çözüm ağı yapısı yer almaktadır.



Şekil 3. 9. (a) çok kanallı soğutucu plaka ve batarya grubu CAD datası (b) serpantin soğutucu plaka ve batarya grubu CAD datası, (c) alt soğutucu plaka ve batarya grubu CAD datası

Sayısal simülasyonlarda, farklı deşarj hızlarında soğutma performansının karşılaştırmalı sonuçlarını elde etmek için Şekil 3.9’da görüldüğü gibi HAD modelleme yardımıyla (i) çok kanallı soğutucu plaka, (ii) serpantin soğutucu plaka ve (iii) alt soğutucu plakalar olarak adlandırılan üç soğutucu plaka tasarlanmıştır.



Şekil 3. 10. Multizone yöntemi ile oluşturulan **(a)** çok kanallı soğutucu plaka mesh yapısı, **(b)** serpantin soğutucu plaka mesh yapısı, **(c)** alt soğutucu plaka mesh yapısı, **(d)** batarya modülü mesh yapısı

Multizone yönteminin tasarlanan üç farklı soğutucu plakaya ve batarya modülüne uygulanmış hali Şekil 3.10’da görülmektedir. Fark edileceği gibi özellikle soğutucu plakalardaki sonlu eleman analizlerinde bazı bölgelerdeki hesaplamalar oldukça zor ve karmaşık olabilmektedir. Bu yüzden, bu tip kritik bölgelerde çözüm ağı yapısı biraz daha sık tutularak yapılan hesaplamaların daha hassas olması sağlanmıştır.

3.4. Çözümlemelerde Kullanılan Batarya Modeli ve İlgili Denklemler

Sayısal simülasyonlarda, batarya modülünün, akışın ve ısı transferinin geçici hesaplamalarını eş zamanlı simüle etmek için Ansys Fluent (Release 19.2) yazılım paketi kullanıldı (Dubey vd., 2021). Farklı deşarj hızlarında soğutma performansının karşılaştırmalı sonuçlarını elde etmek için görüldüğü gibi HAD modelleme yardımıyla (i) çok kanallı soğutucu plaka, (ii) serpantin soğutucu plaka ve (iii) alt soğutucu plakalar olarak adlandırılan üç soğutucu plaka tasarlanmıştır.

Çok kanallı soğutucu plaka, batarya hücresi ile soğutma sıvısı arasındaki ısı transferi alanını artırıcı avantaja sahip paralel kanallardan oluşmaktadır. Bu sayede, diğer soğutucu plakalara kıyasla aynı çalışma şartları altında makul bir basınç düşüşü ile daha iyi soğutma performansı elde edilebilir. Çok kanallı soğutucu plaka iki giriş ve iki çıkışa sahiptir. Serpantin soğutucu plakada ise bir giriş ve bir çıkış bulunmaktadır. Son olarak, alt soğutucu plaka dört boru tarafından sağlanan dört giriş ve dört çıkışa sahiptir.

Çok kanallı soğutucu plakanın soğutma performansı, geleneksel serpantin plaka ve günümüzde elektrikli araç batarya soğutma üniteleri uygulamalarında kullanılan alt soğutucu plaka ile HAD yardımı ile kıyaslanmıştır. Soğutma plakalarının tamamı ana giriş kısmında kütleli debiler eşit olacak şekilde analiz edilmiştir ve kütleli debi 0.01 kg/sn olarak seçilmiştir.

Batarya modülünün mesh yapısı, sayısal modelde kullanılan tüm soğutucu plakalar ve bu çalışmada kullanılan modülün hesaplama alanı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan batarya modülünün simetrik özelliklerinden dolayı, hesaplama süresini azaltmak ve farklı soğutucu plakaların termal performansını hızlı bir şekilde değerlendirmek için sayısal hesaplamalarda soğutucu plakaları içeren dört hücreli bir batarya grubu kullanıldı. Hesaplama alanının mesh alanı, doğru tahmin edilen sonuçların elde edilmesi ve sayısal hesaplamalarda hesaplama süresinin azaltılması açısından çok önemliydi [13-15]. Sabit özellikli sıkıştırılamaz akış için sayısal hesaplamalarda, su akışının geçici koşulları için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri, Denklemler (3.1)–(3.7) kullanılarak skaler formda yazılabilir. Burada u , v ve w hız bileşenleri, ∂p

basınç düşüşünü, ν kinematik viskoziteyi (m^2/s), T sıcaklığı (K), ρ yoğunluğu (kg/m^3), k ısı iletkenliği (W/mK), c_p hesaplama alanındaki akışkanın özgül ısısıdır (J/kg K) ve g yer çekimi ivmesidir (m/s^2).

Akış bölgesi için *süreklilik denklemi* şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

x , y ve z yönlerindeki momentum korunumu denklemleri sırasıyla aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} + \frac{d^2 w}{dz^2} \right) + \rho g_z \quad (3.4)$$

Akışkan bölgesi için enerji denklemi, geçici koşullara sahip akışkan bölgesi için Denklem (3.5) kullanılarak yazılabilir; burada Φ Denklem (3.6)'den hesaplanabilen dağılım fonksiyonudur. Katı bölgeler için enerji denklemi Denklem (3.7)'de yazılabilir; burada S hacimsel ısı üretimini içeren kaynak terimidir; k_s ısı iletkenliği, ρ_s yoğunluk ve $c_{p,s}$ bu çalışmada kullanılan katı malzemelerin özgül ısısıdır.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3.5)$$

$$\Phi = \mu \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S = \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

Sayısal analiz için, basınç-hız bağlantısı için SIMPLE algoritması seçilmiş, sayısal hesaplamalar kararsız koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Akış denklemlerinin normleştirilmiş kalıntı değerleri 10^{-3} 'ten ve enerji denklemi 10^{-6} 'dan küçük

olduğunda yakınsama varsayılmıştır. Katı-akışkan sınır yüzeyleri için kayma sınır koşulu kullanılmamış ve deney koşulları dikkate alınarak ortam hava sıcaklığının 290,5 K sabit değeri olduğu varsayılmıştır. Batarya modülü için, modüldeki her batarya hücresinin özelliklerini modellemek amacıyla NTGK alt modeli kullanıldı. Sayısal hesaplamalarda kullanılan sınır koşulları Çizelge 3.5’te listelenmiştir.

Çizelge 3. 5. Nümerik simülasyonlarda kullanılan sınır şartları

Yüzeyler ya da Alanlar	Sınır Şartları
Soğutucu sıcaklığı	Sabit sıcaklık değeri 290,5 K
Soğutucu plakanın çıkış yüzeyi	Gösterge basıncı 0 Pa
Ana girişte soğutucunun kütleli debisi	0,0002 kg/sn
16 hücreli batarya modülü	NTGK modeli
Katı alanların dış yüzeylerinin hava ile teması	Serbest taşınım sınır koşulu
Akış şartları	Kararsız koşullarla laminar akış
Ortam Sıcaklığı	293 K
Malzeme Tipi	Katı Etki Alanları
Çok kanallı soğutucu plaka	Alüminyum
Serpantin soğutucu plaka	Alüminyum soğutucu plakalı bakır boru
Alt soğutucu plaka	Alüminyum soğutucu plakalı bakır boru
Tüm soğutucu plakaların dış yüzeyi	Taşınım sınır koşulu

Sayısal hesaplamalarda üç farklı soğutucu plaka kullanılmıştır. İkinci ve üçüncü plakalar genellikle elektrikli araçlardaki batarya paketlerinin soğutma uygulamalarında kullanılan serpantin ve alt soğutucu plakalardır. Çok kanallı soğutucu plaka ise, batarya modülü yüzeylerinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla su akışının iki paralel akış bölgesine ayrıldığı batarya soğutmanın ısı performansında daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla bu çalışmada geliştirilmiştir.

Ortam havasıyla temas eden katı bölgelerin dış yüzeyleri için serbest taşınım koşulu kullanıldı. Sayısal hesaplamalarda, tüm soğutma bloklarının giriş bölgesinde, aynı koşullarla karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek için soğutucunun kütleli debi 0,0002 kg/sn sabit değer olarak seçilmiştir. Bir hücre ya da batarya modülünde oluşturulan sayısal modelin temel girdi ve çıktıları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11. Batarya simülasyon modelinin ana girdi ve çıktıları

Bir hücredeki kimyasal, elektriksel ve termal süreçlerin ilerlemesini tahmin etmek için iki ana yöntem kullanılır: (1) tek potansiyel ampirik batarya modeli (SPEBM) ve (2) çift potansiyelli çok ölçekli çok alanlı (MSMD) batarya modeli. Tek potansiyel ampirik batarya modeli, tek bir batarya hücresindeki elektrot ölçeği tahminleri için kullanışlıdır. Ancak bu çalışmada olduğu gibi büyük ölçekli geometri sistemlerindeki karmaşık elektrokimyasal olayların tamamını incelemek için bu modeli kullanmak çok verimli değildir (Kök & Alkaya, 2020). SPEBM ile karşılaştırıldığında, MSMD batarya modeli bu sınırlamaları çok ölçekli, çok boyutlu bir yaklaşımın homojen bir modelini kullanarak çözer (Hosen vd., 2022). Üç elektrokimyasal alt model çeşitli araştırmalara uygulanabilir: (1) Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, (2) eşdeğer devre modeli (ECM) ve (3) Newman alt modelleri sözde 2D (P2D) model karmaşıklık düzeyi. Bu alt modeller, fiziksel ve elektrokimyasal olayların çeşitli uzunluk ölçekleriyle incelenmesinde esneklikleri açısından faydalı olmuştur (Madani vd., 2017).

Bu çalışmada NTGK modeli, daha az parametre gerektirmesi, daha büyük uzunluk ölçekleri için uygun olması ve mevcut batarya modülü sisteminden gelen verilerin analiz edilebildiği yarı deneysel bir model olması nedeniyle batarya modülünün geçici davranışını simüle etmek için seçilmiştir. NTGK modelinin seçilmesi ve yapılan deneylerden elde edilen verilerin batarya sistemi ile kullanılması simülasyon modelinin güvenilirliğini arttırmış ve doğrulama çalışmalarını kolaylaştırmıştır.

NTGK modelinde bataryanın elektriksel ve termal alan özellikleri, bataryanın hücre ölçeğindeki hesaplama uzayında Denklemler (3.8)–(3.10)’da verildiği gibi formüle edilir (Ho vd., 2020; U. S. Kim vd., 2008):

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_c \nabla T) = \sigma_{pos} |\nabla \varphi_{pos}|^2 + \sigma_{neg} |\nabla \varphi_{neg}|^2 + q_{ech} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma_{pos} \nabla \varphi_{pos}) &= -j \\ \nabla \cdot (\sigma_{neg} \nabla \varphi_{neg}) &= j \end{aligned} \quad (3.9)$$

Burada σ elektrik iletkenliğidir, φ elektrik potansiyelidir. *pos* ve *neg* alt simgeler sırasıyla pozitif ve negatif elektrotları ifade eder. *Hacimsel akım aktarım hızı* formülü Denklem (10) (Immonen & Hurri, 2021)’te aşağıdaki gibi yazılır:

$$j = \frac{C_N}{C_{ref} Vol} Y [U - (\varphi_{pos} - \varphi_{neg})] \quad (3.10)$$

burada *Vol* aktif bölgenin hacmidir, C_{ref} ise Fluent’teki parametre tahmin aracı tarafından deşarj sonuçları aracılığıyla *U* ve *Y* fonksiyon parametrelerini elde etmek için kullanılan batarya hücresinin kapasitesidir. Deşarj derinliğine (DOD) göre, *U* ve *Y* fonksiyonları sırasıyla Denklemler (3.11) ve (3.12)’te gösterildiği gibi hesaplanır (Kwon vd., 2006):

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DOD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (3.11)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DOD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3.12)$$

burada T_{ref} referans sıcaklığıdır ve ayrıca C_1 ve C_2 belirli bir batarya için sabit değerlerdir. Denklem (3.13)’te elektrokimyasal reaksiyonun ısısı, q_{ech} aşağıdaki gibi verilmektedir :

$$q_{ech} = j \left[U - (\Phi_{pos} - \Phi_{neg}) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (3.13)$$

burada birinci terim aşırı potansiyelden kaynaklanan ısıyı, ikinci terim ise entropik ısı üretimini temsil eder.

NTGK modeli için malzemelerin ayrıntılı özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3. 6. MSMD model için malzeme özellikler

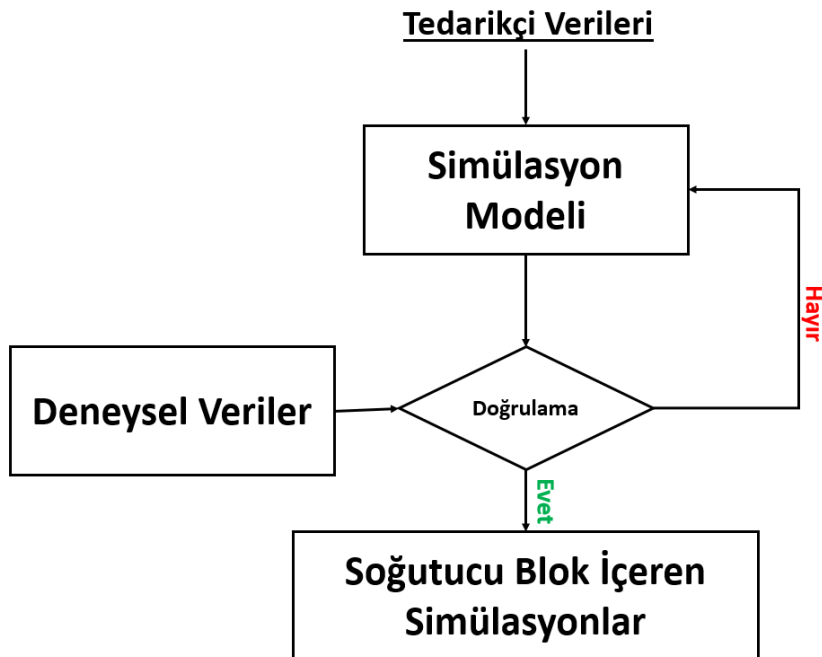
Özellik	Alüminyum (Pozitif Tab)	Çelik (Negatif Tab)	Jelly Roll (Aktif Bölge)
Yoğunluk (kg/m^3)	2719	8030,0	2226
Özgül ısı (J/kg-K)	871	502,48	1197
Isı iletkenliği (W/mK)	202,4	16,27	27
Elektrik iletkenliği (S/m)	$3,541 \times 10^7$	$8,33 \times 10^6$	$1,19 \times 10^6$, $9,83 \times 10^5$

Bu tez çalışmasında, nominal hücre gerilimi 2,3 V olan ve elektriksel olarak 8S2P olarak bağlanan 16 hücreden oluşan bir batarya modül sistemi kullanılmıştır. Şarj ve deşarj sırasında batarya sisteminin voltaj, akım ve sıcaklıklarını güvenli bir şekilde ölçmek ve yönetmek amacıyla batarya yönetim sistemi mevcuttu. Ayrıca batarya sisteminde farklı deşarj oranları uygulayacak esnek rezistans sistemi mevcuttu. Bu direnç sistemi ile batarya sisteminin 16 hücresi kullanılarak 1 C (46 A), 3,5 C (161 A) ve yaklaşık 4,25 C (197 A) deşarj hızlarına sahip deneyler yapılmıştır. Deneyler, 17,5 °C'lik kontrollü bir ortam sıcaklığında ve herhangi bir ek soğutma veya ısıtma sistemi olmadan gerçekleştirildi. Deneyler sırasında verilerin kaydedilmesi için RS232 bağlantısı kullanılmış olup gerilim, akım ve sıcaklık değerlerine odaklanılmıştır. Sıcaklık verileri batarya modülündeki hücrelerin belirli yerlerine yerleştirilen kırk adet PT100 sıcaklık sensörü yardımıyla elde edilmiş, diğer veriler ise doğrudan BMS'den kayıt altına alınmıştır. Şarj işlemi, batarya

modülündeki dahili bir şarj cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Şarj işlemi bir kez gerçekleştirildikten sonra çevrim testleri yerine en zor koşulları sağlayan elektrik yükü kullanılarak boşaltma işlemi uygulandı.

MSMD simülasyon modülü oluşturulurken bu bölümde bahsedilen deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrulama için kullanılmıştır. Deneyler yapıldıktan sonra HAD çalışmasında da aynı koşullar yaratılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modelinde ortam sıcaklığı ve başlangıç sıcaklığı 290,5 K olarak alınmış olup, MSMD batarya modelinde parametre tahmin aracı (PET) ile batarya sisteminin özellikleri tanımlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle batarya hücresi tedarikçisinden alınan veriler ile simülasyon modeli oluşturulmuştur. Ardından 16 hücreli 8S2P bağlantıya sahip batarya modülü ile deneysel sistem kurulup 1 C (46 A), 3,5 C (161 A) ve yaklaşık 4,25 C (197 A) deşarj hızlarında deneyler yürütülmüştür. Simülasyon modelini doğrulamak için deneysel sistemden çıkan veriler karşılaştırılmıştır ve modelin doğruluğu ispatlanmıştır. Simülasyon modelinin doğruluğu sağlandıktan sonra aynı deşarj oranlarında üç farklı tasarıma sahip soğutucu blok ile simülasyonlar yürütülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

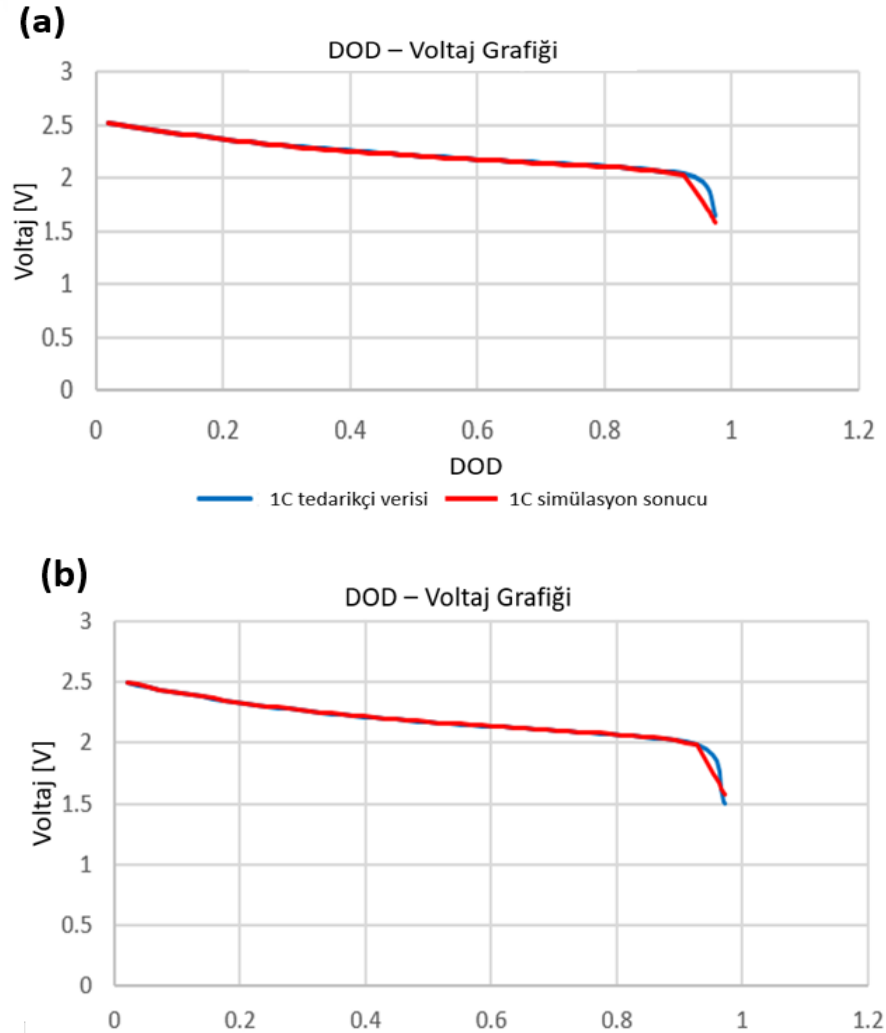


Şekil 3. 12. Tez çalışmasında yürütülen çalışmanın temel şeması

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

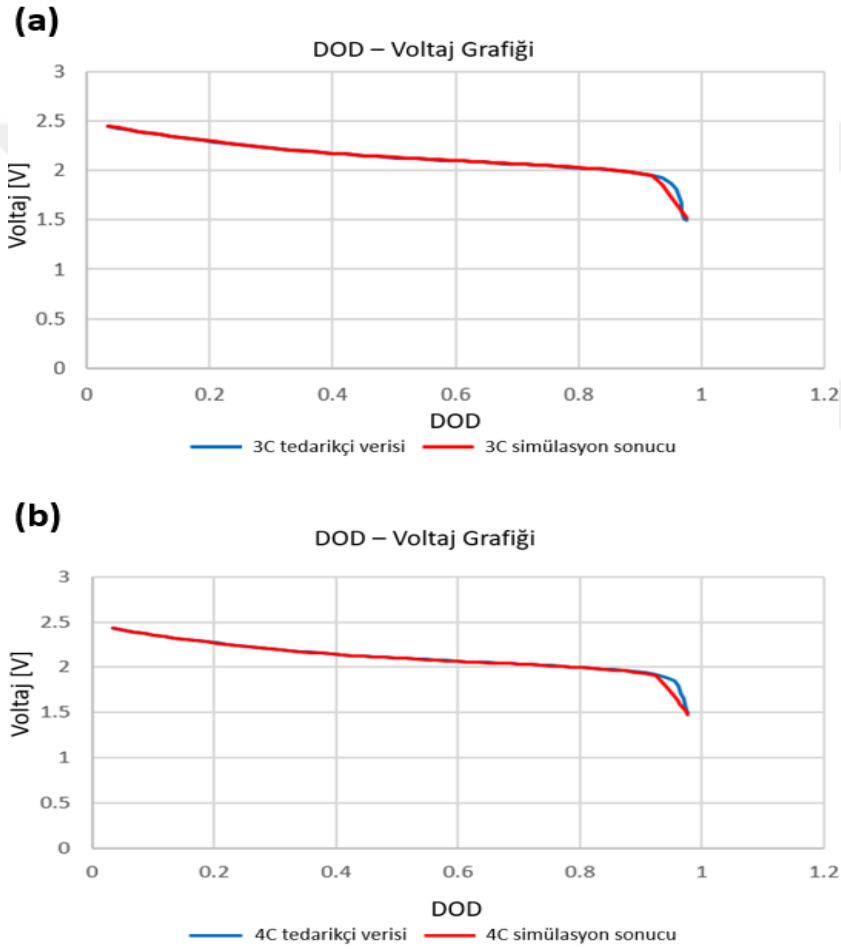
4.1. Tedarikçi Verilerinden Simülasyon Modeli Oluşturulması

Simülasyon modeli oluşturulurken ilk olarak batarya hücresi tedarikçisi olan firmadan alınan katalog verileri kullanılarak tekil batarya hücresi için sayısal model oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model ilk olarak batarya tedarikçi firma tarafından sunulan katalog değerleri ile karşılaştırılmıştır. 1-4 C deşarj oranlarındaki DOD-Voltaj grafikleri tedarikçinin test sonucu elde ettiği grafikler referans alınarak oluşturulmuş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4. 1. a) 1C deşarj oranı (23 A) için, b) 2C oranı (46 A) için tedarikçi verileri ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

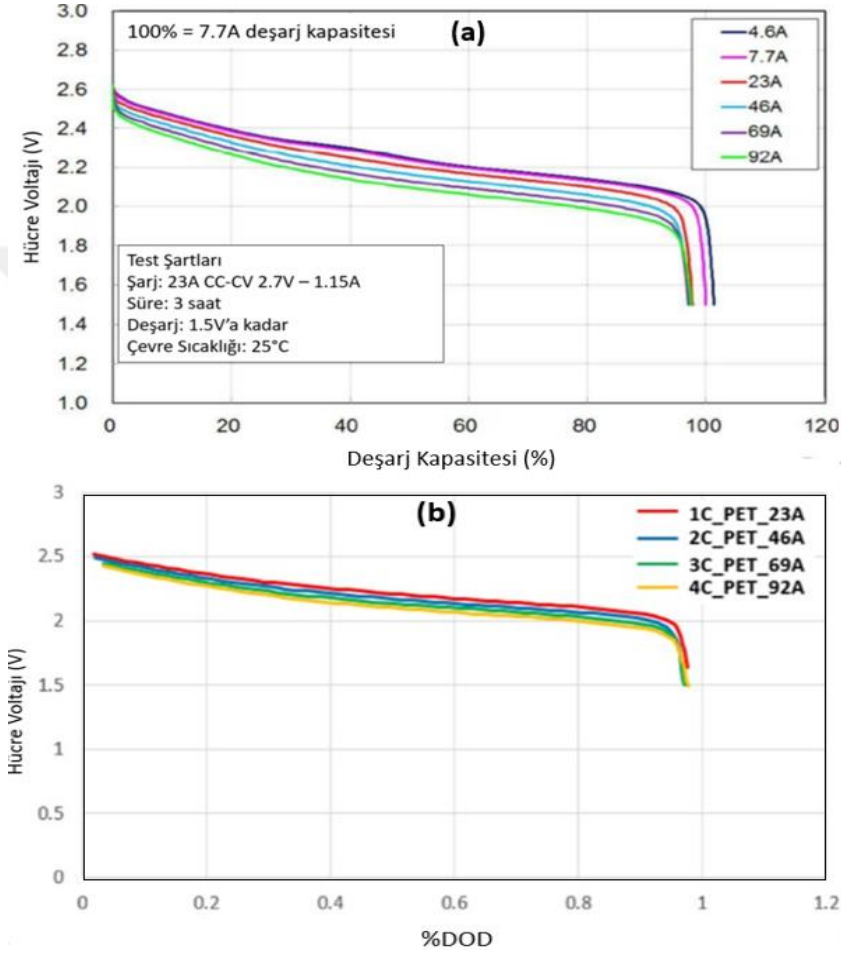
Şekil 4.1’de 1 C (23 A) ve 2 C (46 A) sabit akım altında batarya hücresinin deşarj esnasında voltaj eğrisi ve sayısal model sonuçları yer almaktadır. Elde edilen veriler dikkate alındığında, sadece voltajın hızlı düşüş bölgesinde oluşan farklılıklar göze çarpmaktadır. Bunun sebebi, voltaj hızlı düşüş bölgesinin kontrolünün oldukça zor olmasıdır ve bu farklılık göz ardı edilebilecek durumdadır. Voltaj hızlı düşüş bölgesinin göz ardı edersek, her iki eğrinin de benzer eğilim gösterdiği ve sayısal sonuçlar ile tedarikçi test sonuçları arasındaki farkın genel olarak 1% değerinin altında olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4. 2. a) 3C deşarj oranı (69 A) için, **b)** 2C oranı (92 A) için tedarikçi verileri ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

3 C ve 4 C sabit akım için elde edilen sayısal sonuçlar ile tedarikçi test sonuçları ise karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2’de sunulmuş olup benzer eğilimin 2 C, 3 C, 4 C sabit akım için de sağlandığı ifade edilebilmektedir.

Ek olarak, Şekil 4.3 a’da farklı akım değerleri için 25 °C ortam sıcaklığında tedarikçi firma test sonuçları ve Şekil 4.3 b’de ise sayısal modelden elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Elde edilen batarya hücresi operasyon voltajı karakteristikleri incelendiğinde sonuçların tutarlı olduğu rahatlıkla görülebilmektedir.

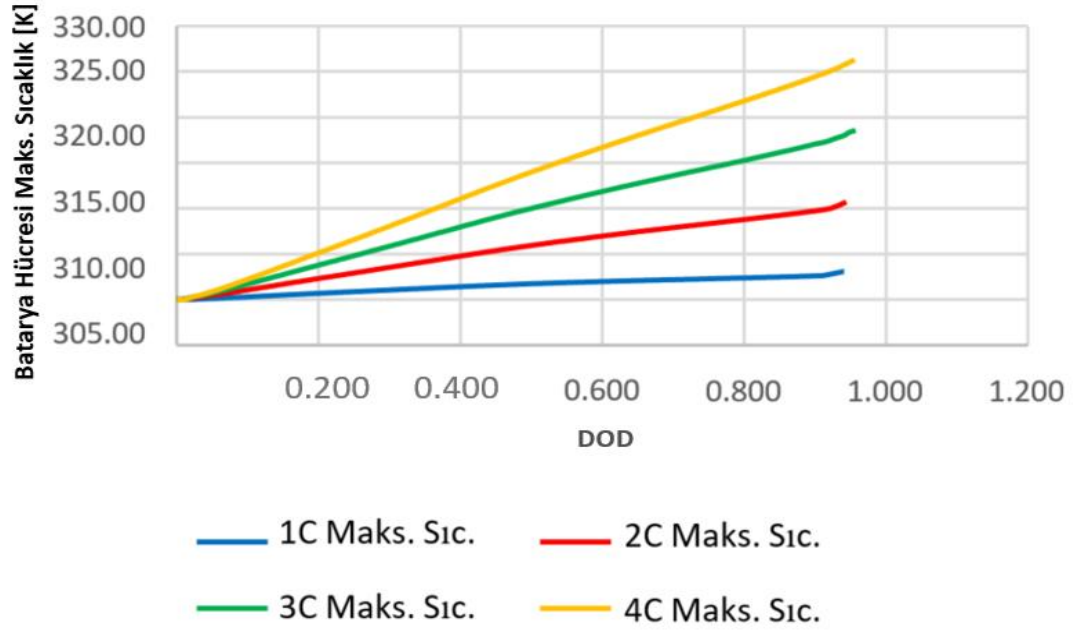


Şekil 4. 3. Tüm deşarj oranları için DOD – Voltaj grafikleri **a)** Tedarikçi verileri, **b)** Simülasyon sonucu elde edilen veriler

Seçilen batarya hücresinin tedarikçi firma tarafından sağlanan tüm deşarj oranları için DOD – Voltaj grafikleri referans alınarak sayısal modeli oluşturulmuştur. Sayısal analizler sonucunda elde edilen voltaj grafikleri referans alınan değerlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Voltaj eğrileri doğrulandıktan sonra Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi ile farklı deşarj oranlarında batarya yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Aşağıda tekil batarya hücresi için sayısal olarak elde edilen sıcaklık (K) dağılımları detaylı olarak

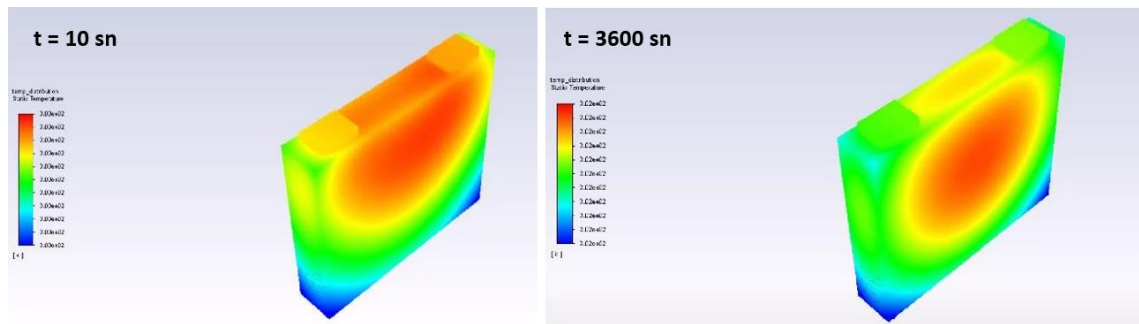
sunulmuştur.

Tekil batarya hücresinin Voltaj grafikleri farklı akımlarda elde edilen test sonuçları ile karşılaştırıldıktan sonra tekil batarya hücresinin sıcaklık dağılımları elde edilerek karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4'te yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, batarya deşarj akımına bağlı olarak sıcaklıklarda ciddi artış gözlemlenmektedir.



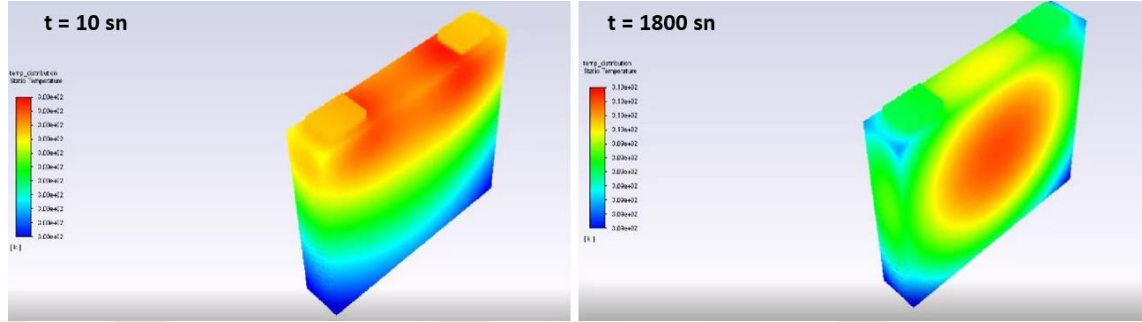
Şekil 4. 4. Tüm deşarj oranları için sayısal model sıcaklık (K) sonuçları

Şekil 4.4'te belirtilen bu sonuçlar daha sonra elde batarya paketi için gerçekleştirilecek çalışmalar için referans niteliğinde olup Şekil 4.5'ten Şekil 4.8'e kadar ise HAD modeli ile elde edilen batarya yüzey sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



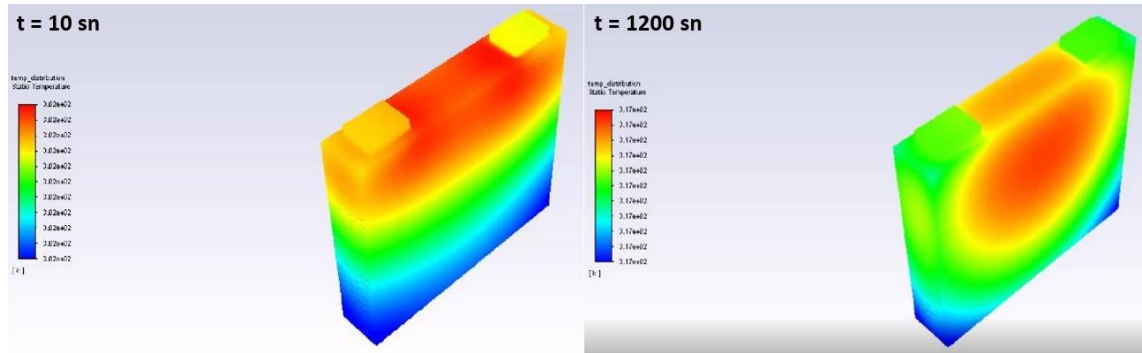
Şekil 4. 5. 1 C deşarj oranları (23 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları

Şekil 4.5 incelendiğinde, simülasyonun henüz başında sıcaklık artışının batarya hücresinin üst bölgesinden başladığı rahatlıkla görülebilmektedir. Simülasyonun sonunda yani 3600 sn’de ise sıcaklık batarya hücresinin ortasında daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

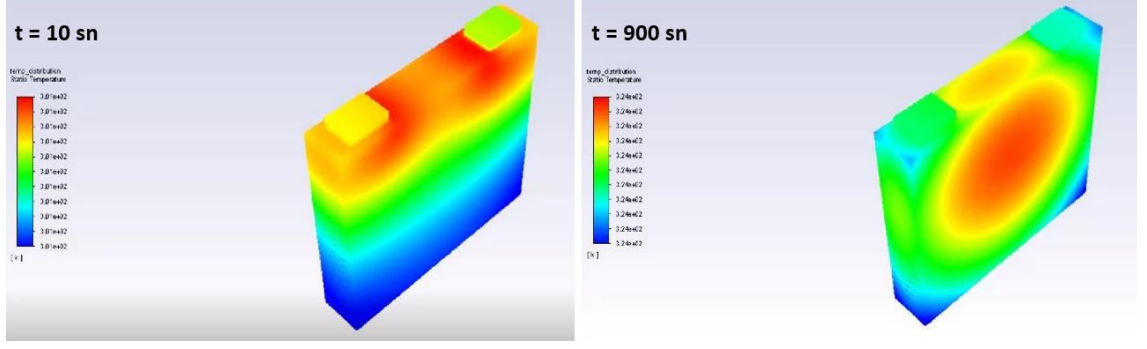


Şekil 4. 6. 2 C deşarj oranları (46 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları

Şekil 4.6’da 2 C deşarj oranı için batarya hücresinin sıcaklık dağılımları gözlenebilmektedir. Simülasyon süresinin 10 sn olduğu durumda, sıcaklık dağılımının hücrenin alt bölgesinden akımın çekildiği bölgeye doğru çıktıkça daha yüksek değerlere ulaştığı söylenebilir. Ancak 1800 sn’de son bulan simülasyon sonucunda 1 C’e benzer bir sıcaklık dağılımına ulaşmıştır.



Şekil 4. 7. 3 C deşarj oranları (69 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları



Şekil 4. 8. 4 C deşarj oranları (92 A) için sayısal model sonucu oluşan sıcaklık (K) dağılımları

Elde edilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında; erken deşarj zamanlarında yüksek sıcaklıkların hücrenin üst bölgesinde yer aldığı ancak zamanla, bu bölgenin batarya hücresinin ortasına doğru hareket ettiği tüm deşarj oranları için saptanmıştır. Bu sıcaklık dağılımı literatürde yapılan çalışmalarla kıyaslandığında tutarlı bir dağılım sergilemektedir (Y. Liu vd., 2019; Morali, 2022; Song vd., 2014; Tomaszewska vd., 2019; Zhu vd., 2021).

İlk aşamada batarya modülü için soğutmasız durumda HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarının tedarikçi verileri ile kıyaslaması sonucu simülasyon modelinin tedarikçi verilerine göre doğru oluşturulduğu rahatlıkla söylenebilmektedir.

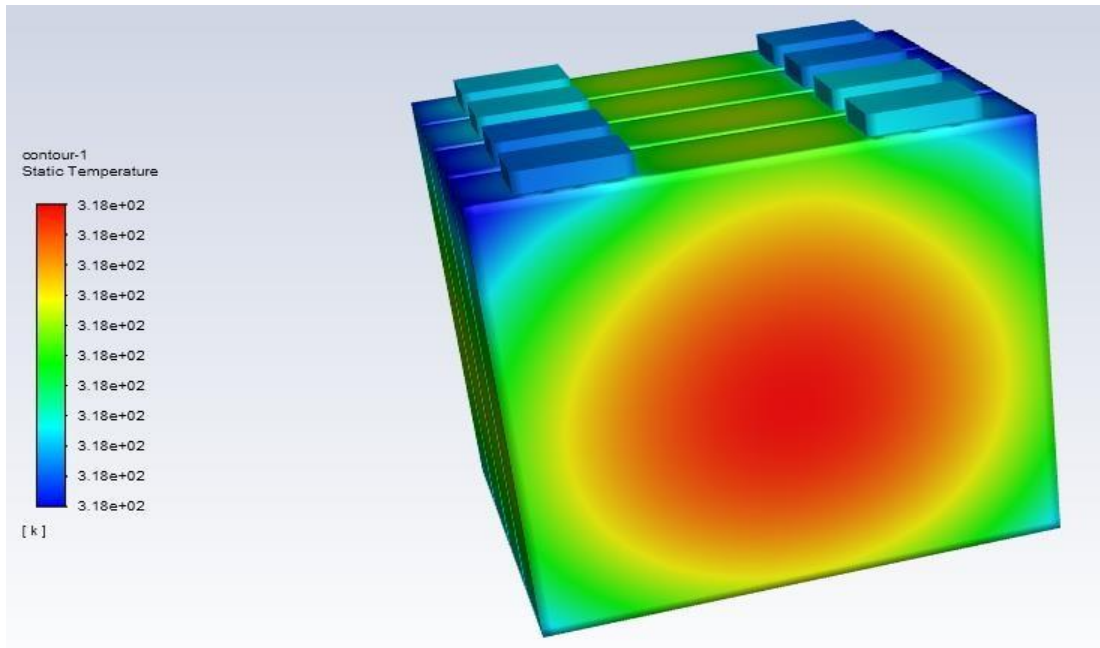
4.2. Deney Sonuçları ve Sonuçların Validasyonu

Bu tez çalışmasında, önceki bölümde belirtildiği gibi nominal hücre gerilimi 2,3 V olan ve elektriksel olarak 8S2P olarak bağlanan 16 hücreden oluşan bir batarya modül sistemi kullanılmıştır. Kurulan batarya modül sisteminde herhangi bir soğutucu blok kullanılmamıştır. Şarj ve deşarj sırasında batarya sisteminin voltaj, akım ve sıcaklıklarını güvenli bir aralıkta tutmak adına batarya yönetim sistemi mevcuttur. Ek olarak, batarya sisteminde farklı deşarj oranlarında çalışabilen ve kademeli deşarj oranına izin veren esnek rezistans sistemi mevcuttur. Bu rezistans sistemi ile batarya sistemi ile 16 batarya hücresi kullanılarak 1 C (46 A), 3,5 C (161 A) ve 4,25 C (197 A) deşarj oranları ile deneyler yürütülmüştür. Deneyler, 17,5 °C seviyesinde kontrollü bir ortam sıcaklığında gerçekleştirildi. Deneyler devam ederken batarya sisteminden alınan verilerin

kaydedilmesi amacıyla RS232 bağlantısı kullanılmıştır. Sıcaklık verileri ise batarya modülündeki hücrelerin daha önce belirtilen konumlarına yerleştirilen kırk adet PT100 sıcaklık sensörü yardımıyla elde edilmiş, diğer veriler ise doğrudan BMS aracılığı ile kayıt altına alınmıştır. Şarj işlemi, batarya modülündeki dahili bir şarj cihazı kullanılarak gerçekleştirildi yaklaşık 5 A kademesinde on saat şarj edildi ve iki saatlik soğumaya bırakılarak ortam sıcaklığına gelmesi sağlandıktan sonra deneyler yapılmıştır.

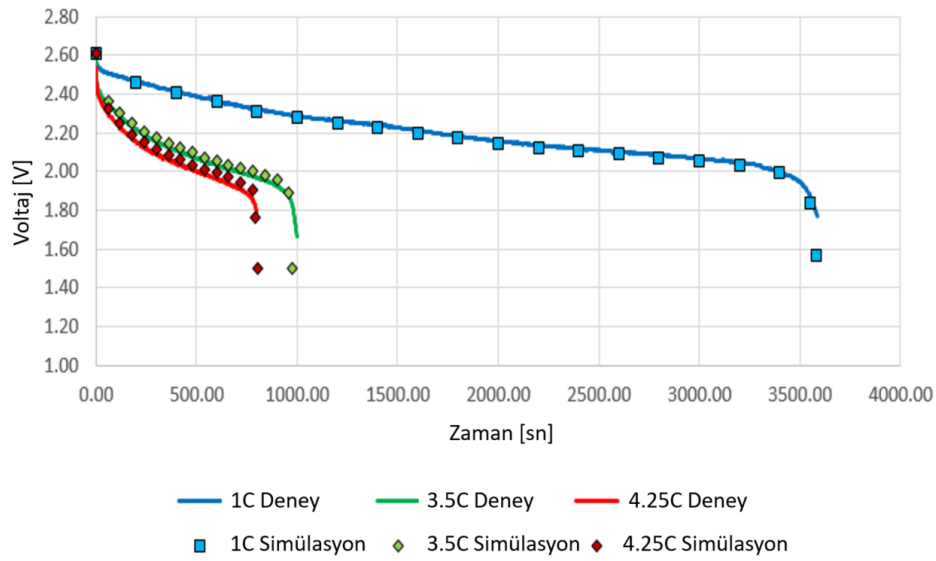
Batarya hücreleri karmaşık elektrokimyasal ve termodinamik sistemlerdir ve batarya performansını birçok faktör etkiler. Batarya deşarj eğrileri, deşarj sırasında oluşan batarya hücresi polarizasyonuna dayanmaktadır. Deşarj sırasında batarya hücrelerinde voltaj düşüşü yaşanır. Gerilimdeki düşüş, ohmik polarizasyon, aktivasyon polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonu gibi çeşitli faktörlerle ilişkilidir. Ohmik polarizasyon batarya hücresinin iç direncinden kaynaklanır; aktivasyon polarizasyonu elektro-kimyasal reaksiyonlara bağlıdır ve konsantrasyon polarizasyonu, iyonların elektrolit boyunca bir elektrottan diğerine nakledildiği kütle transferi (difüzyon) sürecinin karşılaştığı dirençtir (Paccha-Herrera vd., 2020).

Şekil 4.9'da ise soğutucu blok kullanılmadan elde edilen sayısal model sonuçları yer almaktadır.



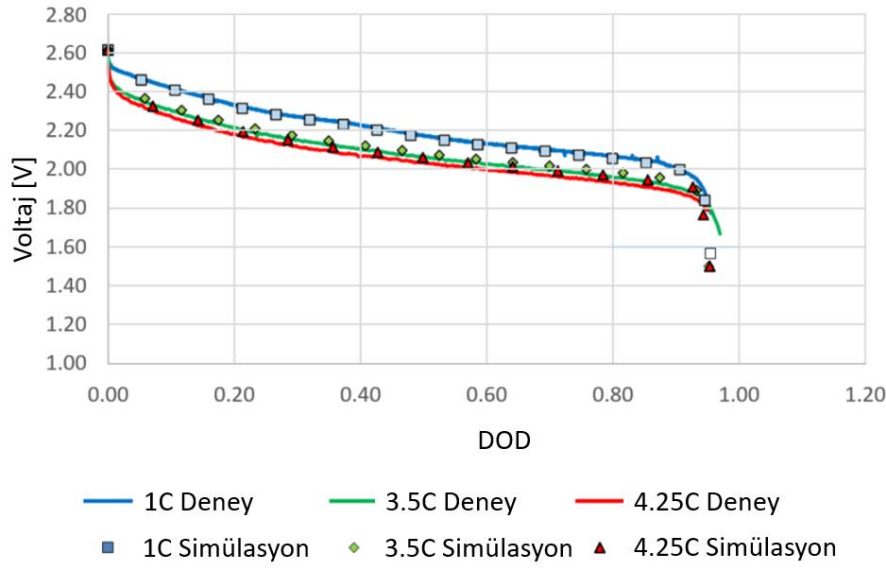
Şekil 4. 9. Batarya modülü için sayısal olarak elde edilen sıcaklık (K) dağılımı

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de ise HAD simülasyon sonuçları ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları verilmiştir. 8S2P hücre bağlantısına sahip olduğundan dolayı 1 C deşarj akımı elde edebilmek için batarya modülüne 46 amper, 3,50 C deşarj akımı elde edebilmek için batarya modülüne 161 amper ve 4,25 C deşarj akımı elde edebilmek için ise batarya modülüne yaklaşık 196 amper akım uygulanmıştır. Bu sayede çeşitli deşarj oranları için simülasyon verileri ve deney verileri karşılaştırılmış ve doğrulama işlemi daha güvenilir hale gelmiştir. Ayrıca, yüksek akım uygulandığında batarya modülünün dinamik ısıl davranışı gözlemlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4. 10. Üç farklı deşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının voltaj – zaman grafiği karşılaştırması

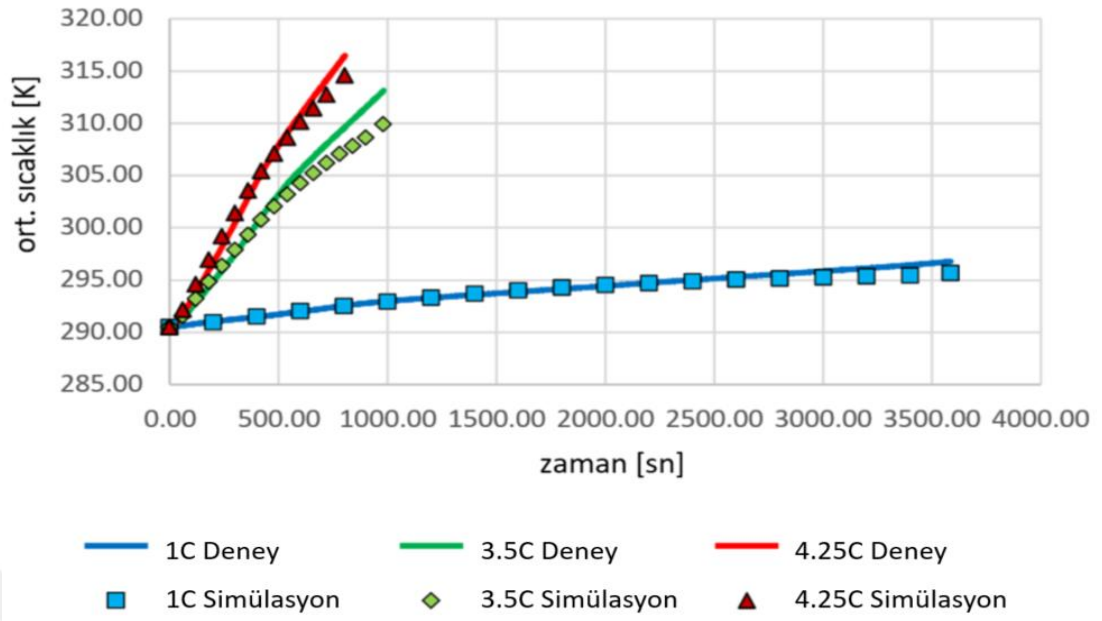
Şekil 4.10'daki voltaj-zaman grafiğinde ve Şekil 4.11'deki voltaj-DOD grafiğinde görüldüğü gibi simülasyon sonuçları deneylerdeki gibi voltaj karakteristiğini temsil etmektedir. Yaklaşık 2,60 V değerinden başlar ve durdurma kriteri olan yaklaşık 1,50 V değerinde biter.



Şekil 4. 11. Üç farklı deşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının voltaj – DOD grafiği karşılaştırması

Deney sonuçları, voltaj değerlerinin yaklaşık 2,60 V değerinden başlayıp yaklaşık 1,65 V değerine ulaştığını göstermektedir. Hücre katalog değerlerine göre gerilim değerinin 1,50 V değerine düşmesi gerekir ancak hızlı gerilim düşümü bölgesinde veri elde etmek zor olduğundan 1,65 V değerine kadar düşen veriler kaydedilebilir. Bu yüzden, hızlı düşüşün olduğu grafiğin son kısmında küçük farklılıklar oluşmuştur. Ancak bu bölgede voltaj kontrolü ve tahmini oldukça zor ve stabil değildir. Bu değerden sonra verinin sonlanmasının nedeni batarya yönetim sisteminin minimum voltaj değerini düşürerek hücreleri korumak için batarya sistemini durdurmasıdır.

Deneyel verilerle simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında batarya voltaj karakteristiği ve deney çalışmaları sonucu elde edilen voltaj grafiği neredeyse hatasız şekilde örtüşmektedir. Bu yüzden bu farklılıklar göz ardı edilebilir. Şekil 4.12’de BMS ihtiva eden batarya modülü deneysel ve HAD çalışmaları sonucunda elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin zamana ve DOD değerine bağlı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4. 12. Üç farklı deşarj oranında çalışan batarya modülüne ait deneysel verilerin ve simülasyon sonuçlarının ortalama sıcaklık – zaman grafiği karşılaştırması

Şekil 4.12’de üç farklı deşarj oranında kaydedilen ortalama sıcaklık verilerinin grafikleri gösterilmektedir. Üç farklı deşarj oranına sahip simülasyonların ortalama sıcaklık-zaman grafiğinde, simülasyon çalışmasında elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin zamana bağlı sonuçları görülmektedir. Simülasyon sonucunda 1 C deşarj hızında sıcaklık yaklaşık 5 K arttı. Bu arada 3,50 C için sıcaklık artış değeri 19,50 K civarında; 4,25 C için artan sıcaklık değeri yaklaşık 24 K’dir. Deney sonuçlarına benzer şekilde, deşarj hızı arttıkça sıcaklık artış değerinin de arttığı tespit edilmiştir. Deneyin ortalama sıcaklık-zaman grafiğinde 1 C boşalma hızı için sıcaklık yaklaşık 6 K artarken, 3,50 C için 1 C boşalma hızı için sıcaklık artışı yaklaşık 22,5 K’dir. En yüksek deşarj hızı olan 4,25 C uygulandığında yaklaşık 26 K sıcaklık artışı gözlemlendi. Bu sonuçlar, deşarj hızı arttıkça sıcaklık değişiminin hızlandığını göstermektedir.

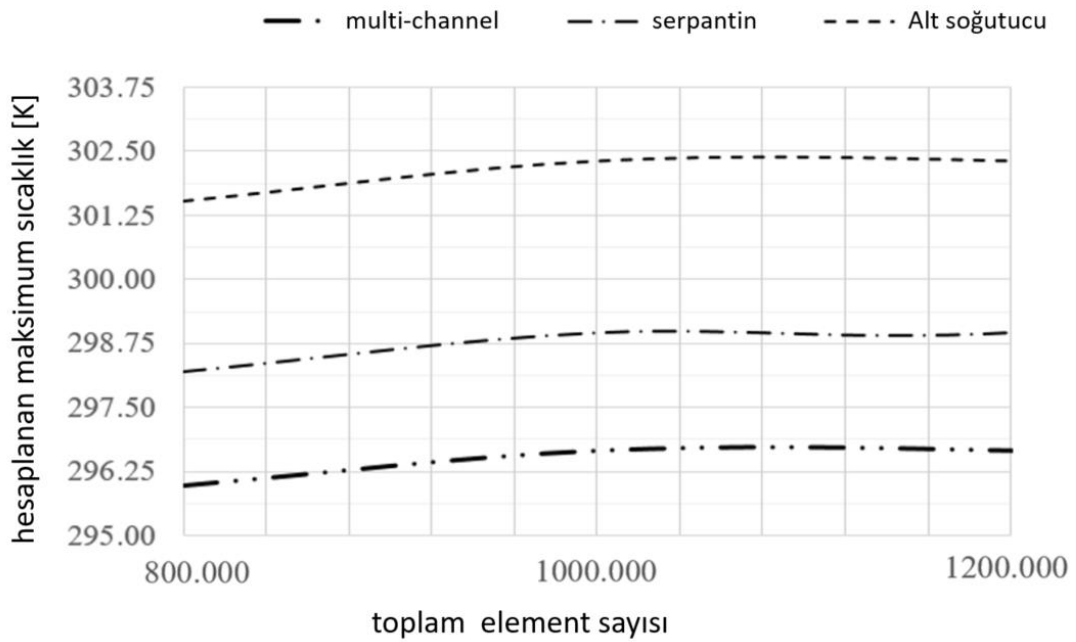
BMS ihtiva eden batarya modülü deneysel ve HAD çalışmaları sonucunda elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin zamana bağlı grafikleri karşılaştırıldığında, 1 C’de deney sonuçları ile HAD sonuçları arasındaki büyük bir benzerlik vardır. Maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık 1 K sapma görülmektedir. 3,50 C deşarj değerinde ise test sonuçları ve HAD sonuçları arasında zamanla artan sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapma değeri maksimum 3 K civarında kalmaktadır. 4,25 C deşarj oranında da 3,50 C’dekine benzer bir

durum söz konusudur. Bu deşarj oranında ise ortalama sıcaklık değęerlerindeki maksimum sapma miktarı 2 K dolaylarındadır.

Yukarıdaki tüm sonuçlar incelendiğinde, rahatlıkla söylenebilir ki test sonuçları ile HAD simülasyon çalışmalarının sonuçları, yüksek deşarj oranlarında zamanla sıcaklıklardaki sapmalar artmış olsa da maksimum sapmaların makul düzeyde olmasından dolayı birbiri ile büyük oranda örtüşmektedir. Dolayısıyla kurulan HAD modelinin mevcut batarya sisteminin çalışma şartlarını ve karakteristiğini temsil ettiğı söylenebilir.

4.3. Mesh Bağımsızlık Analizi

Batarya modülünün hesaplanan maksimum sıcaklığı, mesh bağımsızlığı analizi için seçildi çünkü sıcaklık gradyanları, boşaltma akımının değeri ne bağı olarak batarya hücrelerinin yüzey sıcaklığı üzerinde önemli ölçüde değışiyordu. Mesh bağımlılığı analizlerinde, bu durum için hesaplanan sıcaklık gradyanlarının daha yüksek olması nedeniyle deşarj oranı maksimum 4,25 C olarak seçilmiştir. Mesh bağımsızlık analizinin sayısal sonuçları Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Mesh bağımsızlık analizinin bu sonuçlarından, sıcaklık tahminleri için toplamda yaklaşık bir milyon elementin yeterli olduğu bulunmuştur.

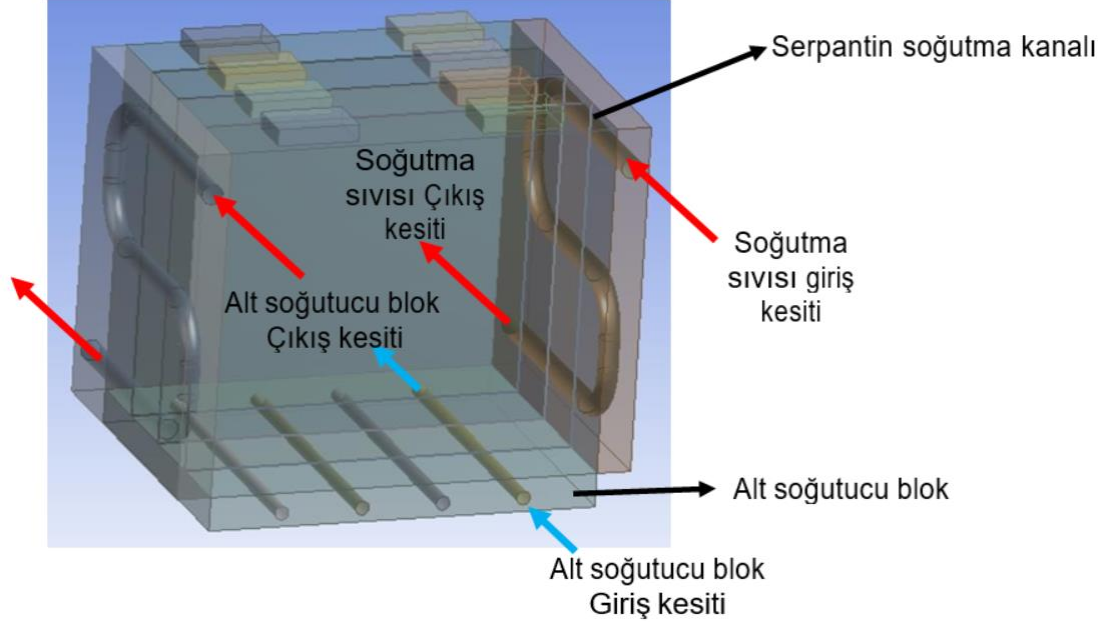


Şekil 4. 13. Mesh bağımsızlık analizinin sayısal sonuçları

4.4. Soğutucu Blok İçeren Batarya Modülü Simülasyon Sonuçları

Deneysel verilerle HAD simülasyonları doğrulandıktan sonra batarya modülün sayısal modeline farklı tip soğutucu bloklar eklenerek HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve soğutma performansı karşılaştırılmıştır. Bu sayede özel tasarıma sahip soğutucu plakanın, elektrikli taşıtlarda kullanılan geleneksel soğutucularla HAD modeli yardımıyla farklı deşarj oranlarında soğutma performansının karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 4.14'te serpantin kanal şeklinde soğutma sistemine sahip batarya modülünün HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizi için hazırlanan CAD modeli ve Şekil 4.15'te ise sayısal model kullanılarak elde edilen sıcaklık (K) dağılımı yer almaktadır. Batarya modülü için geliştirilen her iki soğutma sisteminde de batarya alt yüzeyinde tasarlanan soğutucu blok yapısal olarak içerisinde bakır boru geçecek şekilde standart soğutucu blok şeklinde olup bu sayede efektif soğutma sistemi tasarlamak amaçlanmıştır. Her iki sistemde soğutma sıvısı olarak saf su kullanılmıştır.

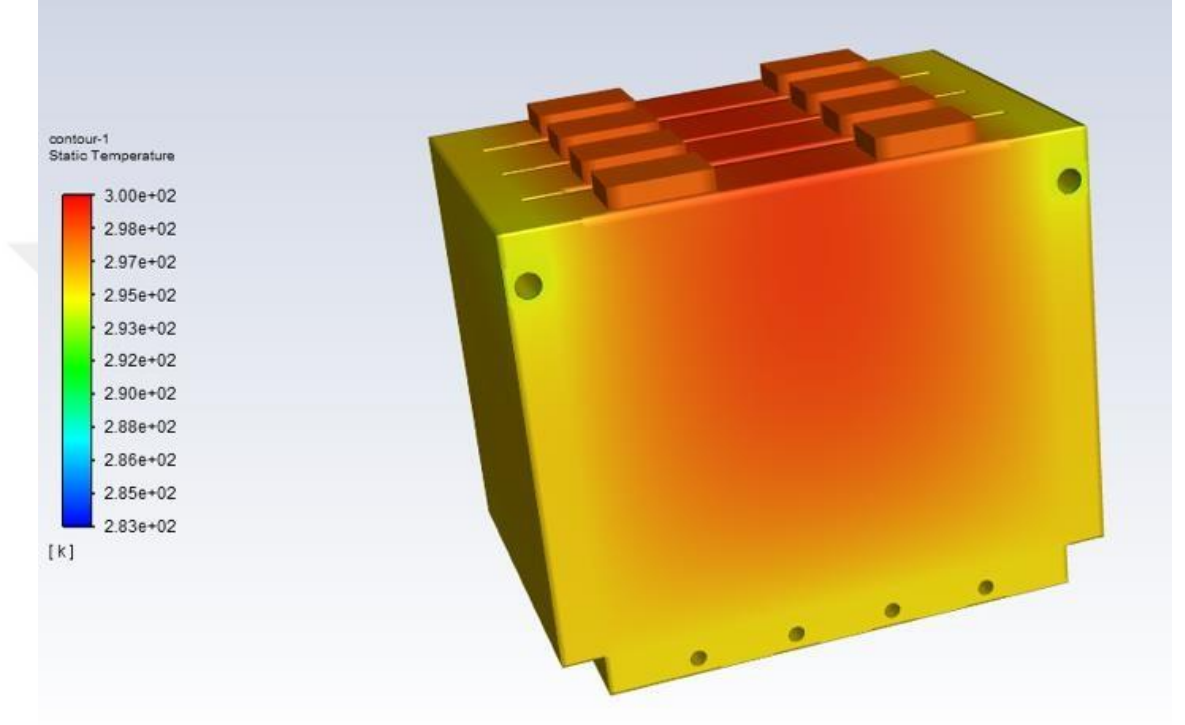


Şekil 4. 14. Serpantin kanallı batarya modülü için CAD modeli

Şekil 4.14'te hem serpantin soğutucu bloğa hem de alt soğutucu bloğa sahip dört hücreli batarya grubu yer almaktadır. Rahatlıkla görülebileceği gibi her bir dörtlü batarya

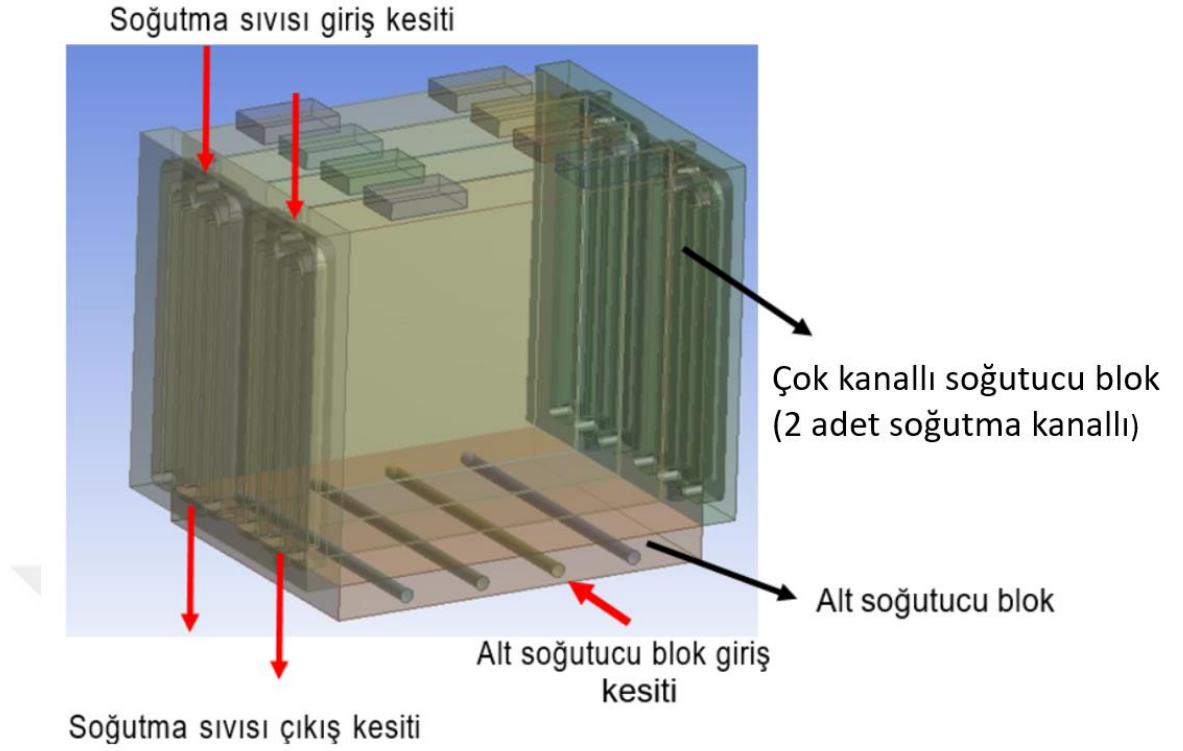
grubunun yan yüzeylerinde birer adet serpantin soğutucu plaka mevcuttur. Serpantin plakaların soğutucu sıvı için birer giriş ve birer çıkışları bulunmaktadır.

Alt soğutucu blok ise adından da anlaşılacağı üzere batarya grubunun altında konumlandırılmıştır. İçerisinde bulunan dört adet boru sayesinde dörder adet giriş ve çıkışa sahiptir ve batarya grubunu alttan soğutmaktadır.



Şekil 4. 15. Serpantin kanallı batarya modülü için 4 C deşarj akımında $t=900$ sn için elde edilen sıcaklık (K) dağılımı

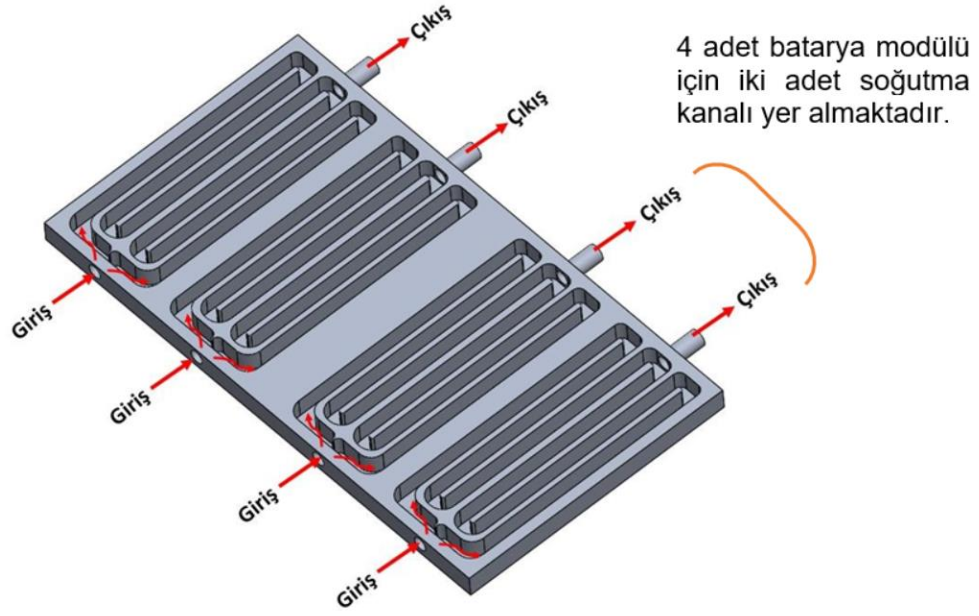
Şekil 4.15'te görülen serpantin kanallı soğutucu plakaya ve alt soğutucu plakaya sahip batarya grubunun 4 C deşarj oranı ile simülasyon sonunda elde edilen sıcaklık dağılımında, hücrelerin soğutucu bloklarla temas ettiği bölgeler nispeten düşük sıcaklıkta iken hücrenin soğutucu bloklara en uzak olan bölgelerinde sıcaklıklar yaklaşık 6 K daha yüksektir.



Şekil 4. 16. Çok kanallı soğutucu blok için oluşturulan CAD modeli

Şekil 4.16’da çalışmada kullanılan çok kanallı soğutucu blok içeren batarya modülü için CAD modeli yer almaktadır. Tez çalışmasında tasarımı ve HAD analizleri yapılan çok kanallı soğutucu blok yapısı ise Şekil 4.17’de detaylı olarak gösterilmiştir. Soğutucu blok yapısal olarak 4 adet birbirinden bağımsız soğutma kanalının her biri iki adet batarya hücresinin soğutulması amacıyla tasarlanmıştır.

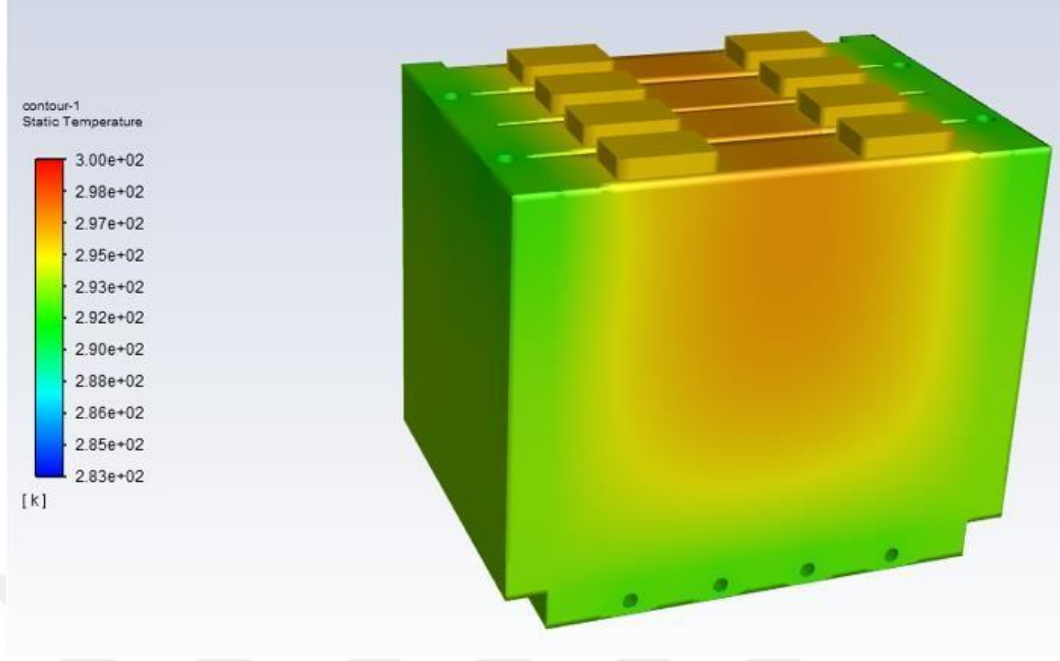
En önemli avantajlarından biri ise serpantin kanalda soğutma sıvısının kanal içinde giderek artan sıcaklığın etkisi ile soğutma kapasitesi azalırken, çok kanallı soğutucu blok tasarımında birbirinden bağımsız tasarım sayesinde her iki hücrenin farklı koşullarda soğutmaya olanak sağlayan ve birbirini en az etkileyecek şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Ancak burada diğer bir önemli husus ise makul seviyede basınç düşümü ile hedeflenen soğutma performansını gerçekleştirmektir.



Şekil 4. 17. Batarya paketi için geliştirilen çok kanallı soğutucu blok CAD modeli detayı

Soğutma kanalı tasarlanırken birbirine paralel 4 adet soğutma kanalı tasarlanmış olup her bir kanal içinde akışkan her iki yönde paralel iki akış olacak şekilde hareket etmektedir. Paralel akışın tercih edilme nedeni basınç düşümünü belirli bir seviyede kontrol etmektir. Diğer taraftan geliştirilen çok kanallı soğutucu bloğun önemli bir diğer avantajı ise farklı batarya hücrelerinin çalışma esnasında farklı soğutma ihtiyacı olması durumunda farklı soğutma sıvısı debilerinin seçilebilme olanağıdır. Serpantin ya da tek kanallı soğutma sistemlerinde bu durum bir dezavantaj olarak bulunmaktadır. Şekil 4.18’de ise çok kanallı soğutucu blok simülasyon sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları yer almaktadır.

Şekil 4.18’de görülen çok kanallı soğutucu plakaya ve alt soğutucu plakaya sahip batarya grubunun 4 C deşarj oranı ile simülasyon sonunda elde edilen sıcaklık dağılımında, hücrelerin soğutucu bloklarla temas ettiği bölgelerde sıcaklıklar istenilen seviyelerdedir. Temas bölgesinden uzaklaştıkça sıcaklıklar artmış olsa da serpantin kanallı soğutucu plaka ile karşılaştırıldığında daha iyi bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Ayrıca sıcaklık dağılımının homojenliği göz önüne alındığında sonuçlar gereksinimlere daha uygun görünmektedir.



Şekil 4. 18. çok kanallı soğutucu blok kullanılarak batarya modülü için 4 C deşarj akımında $t=900$ sn için elde edilen sıcaklık (K) dağılımı

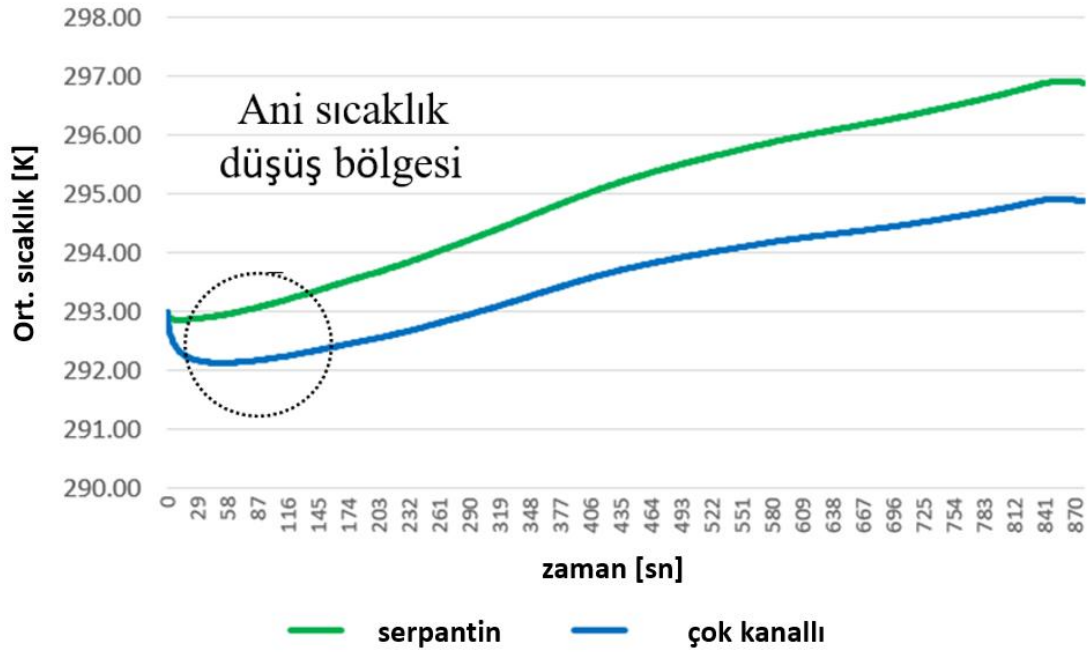
Çizelge 4. 1. Sayısal simülasyonlarda kullanılan başlangıç ve sınır şartları

Başlangıç ve sınır şartları	Soğutmasız	Serpantin soğutma	çok kanallı soğutucu blok ile soğutma
Hücre elektriksel özellikleri	2S2P		
Ortam sıcaklığı	293 K		
Akış tipi	-	Laminer Akış	Laminer Akış
Zaman	-	Geçici rejim	Geçici rejim
Deşarj akımı	4 C(184 A)		
Akışkan giriş sıcaklığı	-	283 K	283 K
Kütleli debi	-	0,0002 kg/sn	0,0002 kg/sn
En yüksek sıcaklık	318,37 K	299,10 K	296,99 K
Ortalama sıcaklık	318,22 K	296,89 K	294,87 K

Çizelge 4.1’de batarya modülü için gerçekleştirilen sayısal analizlerde kullanılan başlangıç koşulları, sınır şartları ve karşılaştırmalı sonuçlar yer almaktadır. Başlangıç koşullarında

verilen 0,0002 kg/sn değerindeki kütleli debi simülasyonun karakteristiğini anlamak için tanımlanmıştır. Nihai kütleli debi değeri 0,0002 kg/sn olacaktır. Elde edilen sayısal sonuçlar değerlendirildiğinde her iki blok kullanımı ile soğutmasız durum için elde edilen yaklaşık 45 °C olan en yüksek sıcaklık değerinin serpantin blok kullanılması durumunda yaklaşık 26 °C'ye, çok kanallı soğutucu blok kullanılması durumunda yaklaşık 24 °C'ye düşürüldüğü ifade edilebilir. Ancak elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında çok kanallı soğutucu blok ile batarya merkezinde elde edilen daha yüksek sıcaklıktaki bölgenin büyüklüğünün kayda değer şekilde azaldığı ve daha düşük sıcaklıklara soğutabildiği sonucuna varılmıştır. Belirtilen analizler 4 C sabit akımda gerçekleştirilmiş olup tercih edilen batarya hücresi 8C sabit akıma kadar deşarj olabilmeye özelliğine sahip olup belirtilen bu yüksek akımlarda sıcaklık farklılıklarının daha da önem kazanacağı ifade edilebilir.

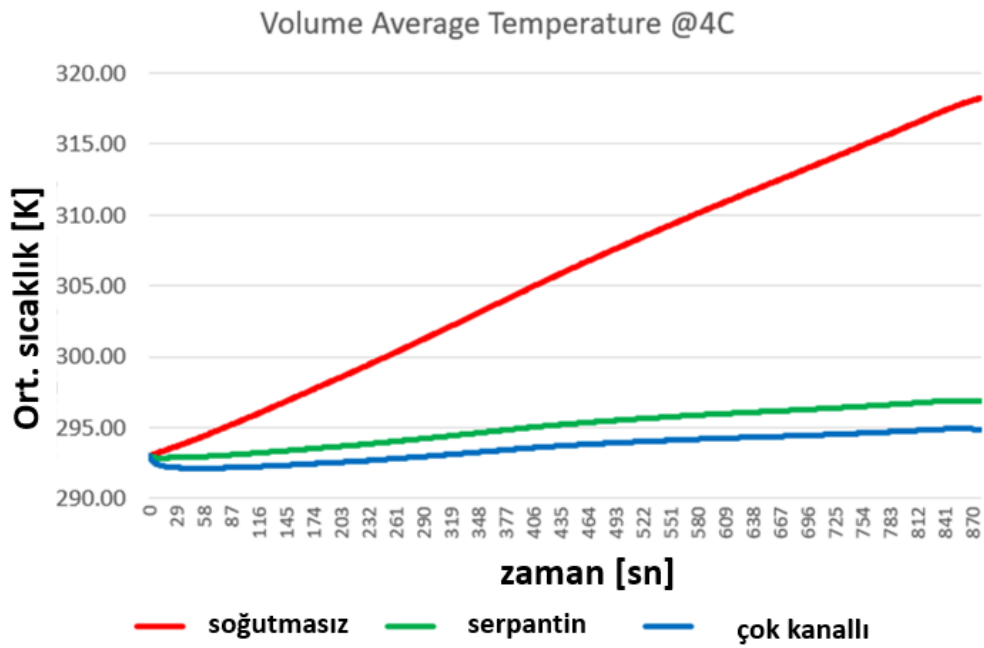
Şekil 4.19'da ise zamana bağlı olarak 4 C sabit akımda her iki soğutucu blok için batarya modülünde elde edilen ortalama sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği yer almaktadır.



Şekil 4. 19. Serpantin soğutucu blok ve çok kanallı soğutucu blok kullanılarak bataryalar için elde edilen ortalama sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği

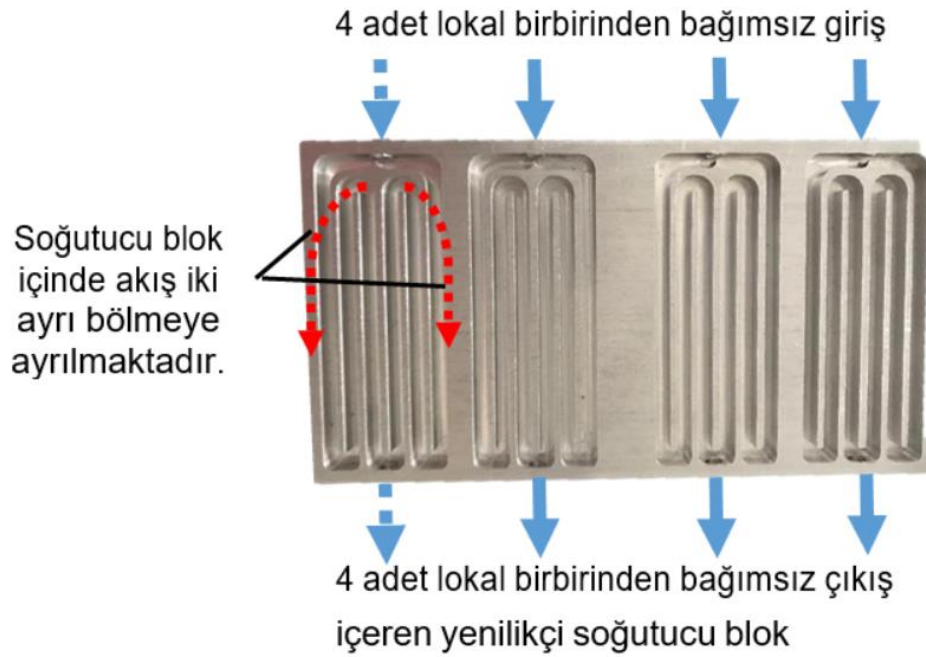
Her iki blok için elde edilen zamana bağlı sıcaklık değişimi incelendiğinde, çok kanallı soğutucu bloğunda daha düşük sıcaklıklar elde edildiği ifade edilebilir. Diğer taraftan

başlangıç anında (ilk 30 saniye) çok kanallı soğutucu bloğunun, serpantin kanala göre sıcaklıklarda ani bir düşüş sağladığı ve bataryaların çalışma koşulları ve güvenlik standartları dikkate alındığında bu özelliğin daha elverişli olduğu ifade edilebilir. Taşıtlarda kullanılan batarya hücrelerinin çok farklı akım aralığında ve farklı sürüş çevrimlerinde ani sıcaklık değişimleri meydana gelebilir. Bu durumun batarya yönetim sistemi tarafından kontrol altına alınabilmesi için istenilen sıcaklık değerine soğutma için gerekli tepki süresi önem taşımaktadır.

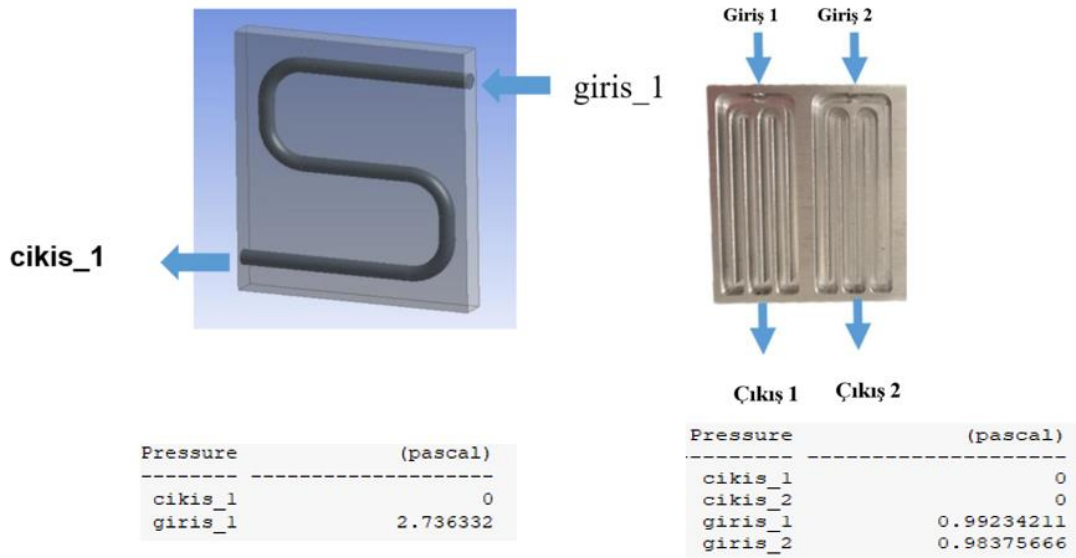


Şekil 4. 20. Çok kanallı soğutucu blok kullanımının sıcaklık dağılımına etkisi

Şekil 4.20’de ise soğutucu blok kullanılmaması durumu ile her iki soğutucu blok kullanımı ile birlikte elde edilen sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği yer almaktadır. Soğutucu blok kullanımı durumunda bataryanın sıcaklığının yaklaşık 15 dakika sonrasında soğutma kullanılmadığı duruma göre 19 K daha düşük sıcaklıkta olduğu ifade edilebilir. Bu değer çok kanallı soğutucu blokta daha yüksek olup yaklaşık 21 K civarındadır.



Şekil 4. 21. Sekiz adet batarya hücresi için tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilen çok kanallı soğutucu blok



Şekil 4. 22. Her iki blok için sayısal olarak elde edilen toplam basınç düşümünün karşılaştırılması

Diğer taraftan belirtilen bu soğutma performansının makul basınç düşümü ile sağlanması gereklidir. Akış karakteristikleri laminar akış olacak şekilde sınır şartları tayin edilmiş olup Şekil 4.22’de basınç düşümlerinin karşılaştırmalı sonuçları yer almaktadır. Tekil serpantin

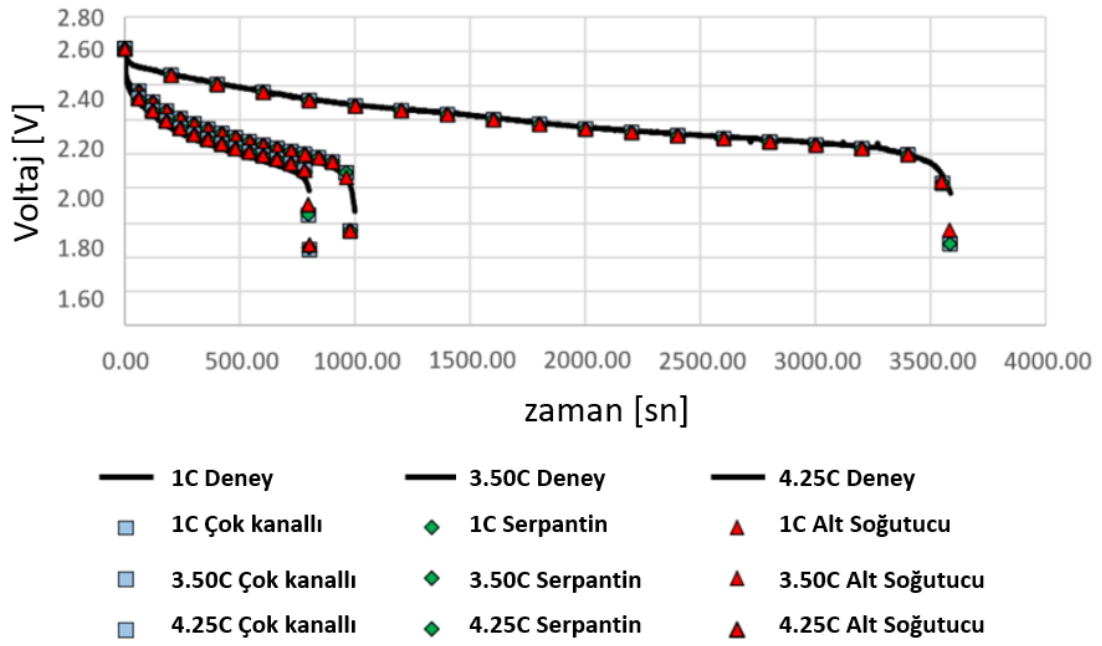
kanal kullanılması durumunda giriş-çıkış kesitleri arasında oluşan basınç farkı toplam 2,74 Pa hesaplanırken çok kanallı kullanılması durumunda toplam 1,98 Pa basınç farkı oluşmaktadır. Sonuç olarak serpantin kanala göre daha düşük basınç ile daha yüksek ısıl performans elde edilebildiği sayısal simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir. Çalışmada bataryalarının atık ısılarında en iyi şekilde faydalanabilmek amacıyla bundan sonraki çalışmalarda çok kanallı soğutucu blok ile devam edilmesi kararlaştırılmıştır. Diğer taraftan hem ısıl performans hem de ağırlık açısından dezavantaj olmaması için çok kanallı soğutucu blok imalatında alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Çizelge 4.2’de ise teorik ve HAD ile hesaplanan ve deneme için yapılan toplam basınç düşümü karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4. 2. Teorik ve HAD ile toplam basınç düşümü değerlerinin karşılaştırılması

	Kütleli debi (kg/sn)	Teorik (Pa)	Sayısal (HAD) (Pa)	Δ (%)
Laminer akış koşulları için Toplam Basınç Kaybı karşılaştırma verileri	0,0002	1,03	0,99	4%
	0,0010	7,30	7,58	4%
	0,0020	19,56	20,59	5%
	0,0030	36,89	38,83	5%
	0,0040	59,28	62,24	5%

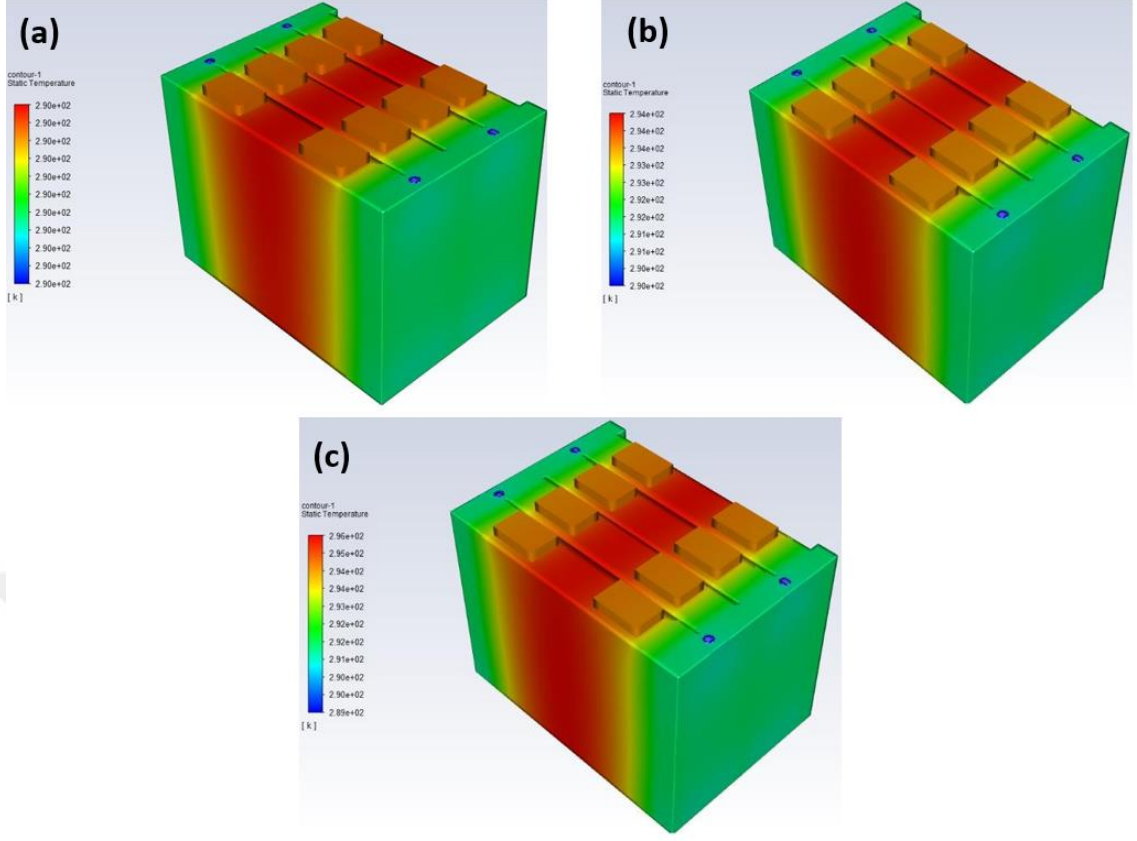
Blok içi akış analizlerinde HAD ile elde edilecek toplam basınç düşümü ile teorik hesaplamalar arasındaki fark genel olarak 5% ve altındadır bu değer tez çalışmasında hedeflenen 5% ile uyum içerisindedir.

Son dönemde ise BMS ihtiva eden Batarya modülü deney düzeneği ile elde edilen deneysel verilerle prototip imalatı yapılan soğutucu plakanın gerçek koşullarda elektrikli taşıtlarda kullanımına yönelik karşılaştırma sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. 23. Test, çok kanallı soğutucu plaka, serpantin ve alt soğutucu ile voltaj – zaman grafiği

Üç farklı soğutucu plaka kullanılarak elde edilen Şekil 4.23'te yer alan batarya hücre karakteristikleri tedarikçi verilerinde farklı olarak 3,50 C ve 4,25 C deşarj oranını içermektedir. Dolayısıyla doğruluğu daha önce ispatlanan simülasyon verileri soğutucu içeren batarya sistemi sonuçları da karşılaştırıldığında deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğu ifade edilebilir. Şekil 4.24'te ise çok kanallı soğutucu plaka için üç farklı deşarj akımında elde edilen batarya hücreleri yüzey sıcaklık dağılımları ve hücre karakteristikleri yer almaktadır.

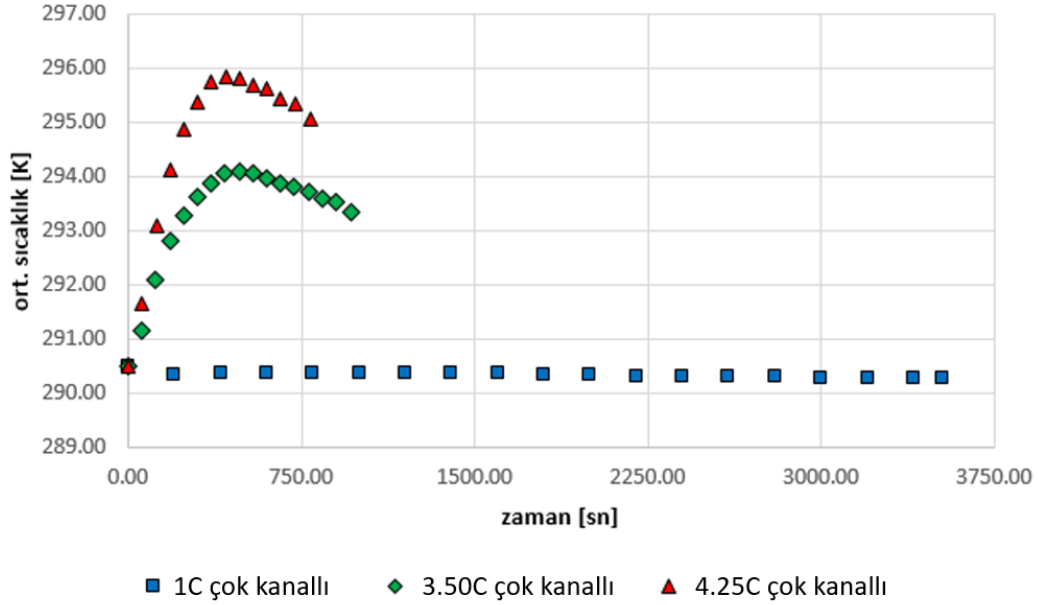


Şekil 4. 24. Çok kanallı soğutucu plaka ile meydana gelen sıcaklık dağılımları **a)** 1 C deşarj oranında, **b)** 3,50 C deşarj oranında, **c)** 4,25 C deşarj oranında

Şekil 4.24’da görülen üç farklı deşarj oranı ile çok kanallı soğutucu plaka ile yapılan simülasyonların sıcaklık dağılımlarına ait skalalar aynı olduğunda sıcaklık dağılımları özellikle 1 C deşarj oranı için sıcaklık farkları çok düşük kaldığından dolayı ayırt edilememektedir. Bu yüzden, her bir deşarj oranına ait simülasyon sonuçlarının sıcaklık aralıkları birbirinden farklıdır. Sonuçlar incelendiğinde her bir deşarj oranı için sıcaklık dağılımlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Soğutucu plakaların temas bölgelerinde sıcaklıklar oldukça düşük seyredirken temas bölgesinin uzağından kalan batarya grubunun orta bölgelerinde sıcaklıklar daha yüksektir.

1 C deşarj oranı için sıcaklık dağılımındaki maksimum fark yaklaşık 0.5 K’dir. Bu da 1 C deşarj oranında oldukça etkili bir soğutma olduğunu göstermektedir. 3,50 C deşarj oranı için ise bu fark yaklaşık 2 K’dir. Bu sıcaklık farkı değeri, nispeten yüksek bir deşarj oranı için oldukça iyi bir soğutma yapıldığını ispatlamaktadır. 4,25 C deşarj oranında sıcaklık

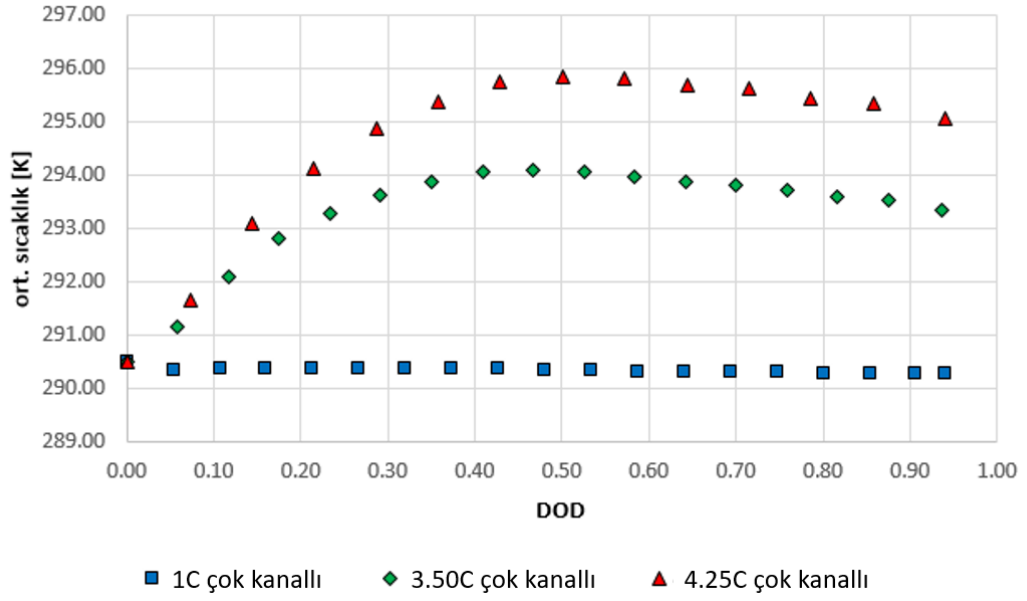
dağılımdaki maksimum fark ise yaklaşık 4 K olup yüksek deşarj oranı olduğu göz önüne alındığından makul bir sıcaklık farkıdır.



Şekil 4. 25. Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği

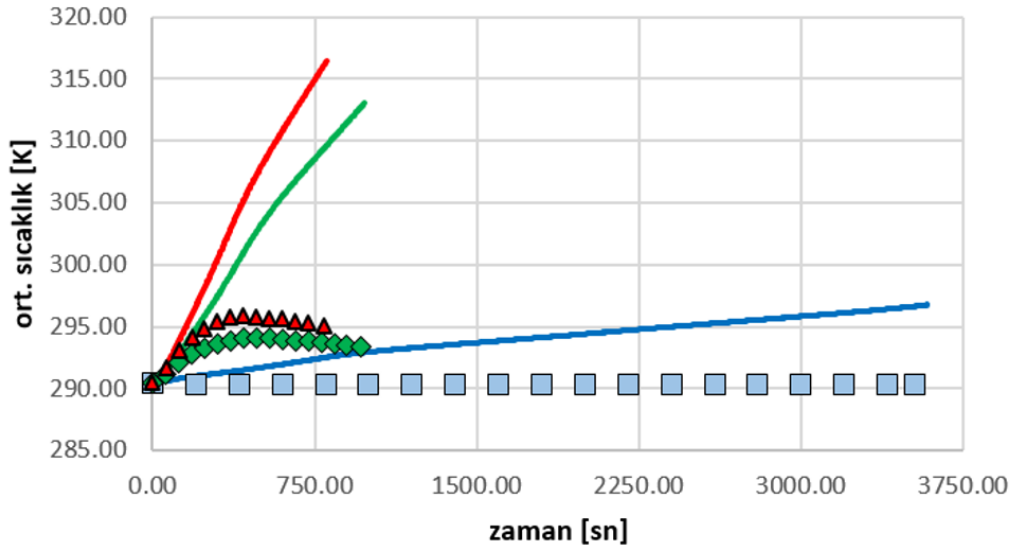
Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’de üç farklı deşarj oranı için batarya grubunun hacimsel ortalama sıcaklıkları verilmiştir. 1 C deşarj oranı ile yapılan simülasyonlarda başlangıç sürecinde (ilk 30 saniye) ani bir sıcaklık düşüşü sağladığı saptanmıştır. Bataryaların özellikle ilk çalışma süreçlerindeki çalışma koşulları ve güvenlik kaygıları göz önüne alındığında özellikle çok sıcak ortam sıcaklıklarında başlangıç anındaki ani sıcaklık düşüşünün oldukça fayda sağlayacağı aşikardır.

3,50 C deşarj oranında elde edilen ortalama sıcaklıklara bakıldığında başlangıç anındaki sıcaklık değeri ile karşılaştırıldığında yaklaşık 4 K’ye ulaşan sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Ardından çalışma koşulları stabil hale geldiğinde sıcaklığın tepe noktasından düşüşler gözlemlenmiş ve 1 K civarında bir düşüş olduğu görülmüştür. Bu düşüş, sistemin uzun çalışma koşulları düşünüldüğünde bataryanın stabil çalışması için pozitif yönde etki edecektir.



Şekil 4. 26. Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

4,25 C deşarj oranında ortaya çıkan ortalama sıcaklıklar diğer deşarj oranında elde edilen sıcaklıklarla kıyas edildiğinde beklendiği gibi daha yüksek bir seviyeye ulaşmıştır. En yüksek sıcaklık farkı yaklaşık 6 K olarak saptanmıştır. Ancak 3,50 C deşarj oranında ortalama sıcaklık değerlerinde elde edilen düşüş gibi 4,25 C deşarj oranında da 1 K civarında bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek deşarj oranı için ortalama sıcaklıkların makul sürelerde stabil hale gelip düşüşe geçmesi güvenlik, verimlilik ve çalışma fonksiyonlarının devamı açısından kritik öneme sahiptir.



— 1C Soğutmasız — 3.50C Soğutmasız — 4.25C Soğutmasız
 ■ 1C çok kanallı ◆ 3.50C çok kanallı ▲ 4.25C çok kanallı

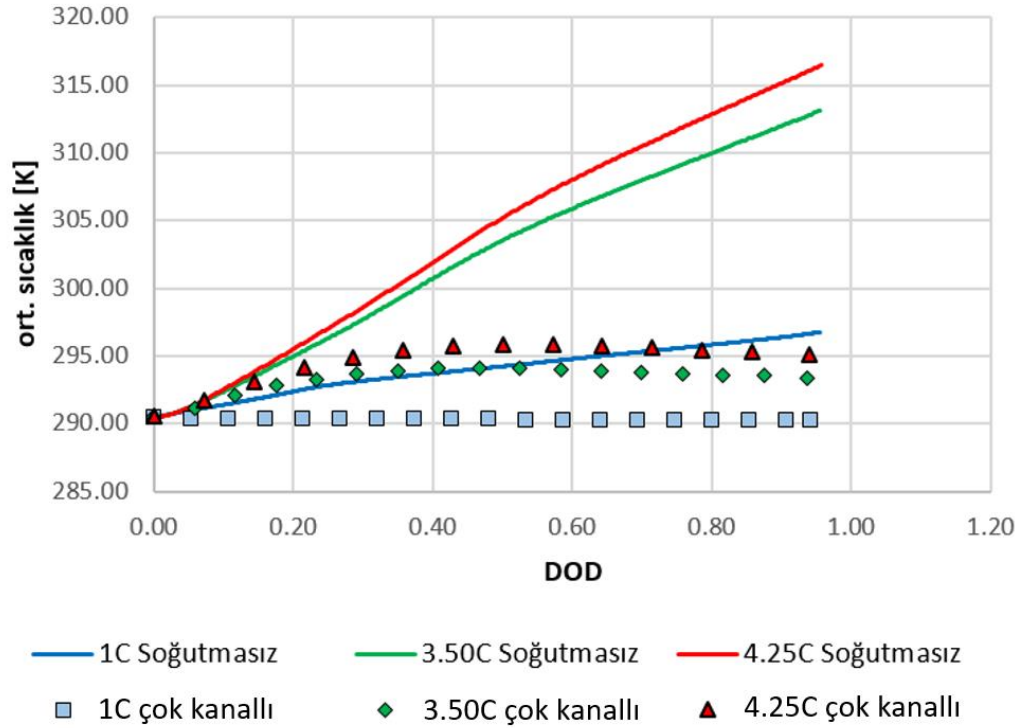
Şekil 4. 27. Soğutmasız ve Çok kanallı soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28, soğutmasız ve çok kanallı soğutucu plaka kullanılarak elde edilen farklı deşarj oranlarına göre ortalama sıcaklık-zaman ve ortalama sıcaklık-DOD grafiklerini sunmaktadır. Bu grafikler, batarya modülünün ısı performansının deşarj oranlarına ve soğutma sistemine bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

Öncelikle, 1C deşarj oranı için soğutmasız durumda elde edilen ortalama sıcaklık, 295,70 K'dir. Bu durumda, çok kanallı soğutucu plaka kullanıldığında, sıcaklığın neredeyse başlangıç seviyesinde tutulduğunu görüyoruz. Bu durum, yaklaşık 5 K seviyesinde bir ortalama soğutma etkisi olduğunu gösterir.

3,50 C deşarj oranında, soğutma olmadığı durumda ortalama sıcaklık yaklaşık 310 K seviyesine ulaşmaktadır. Ancak çok kanallı soğutucu plaka devreye girdiğinde, ortalama sıcaklık 293,6 K seviyesine kadar düşmüştür. Çok kanallı soğutucu plaka, ortalama sıcaklığı 16 K'den daha fazla düşürerek bataryanın aşırı ısınmasını önlemiştir.

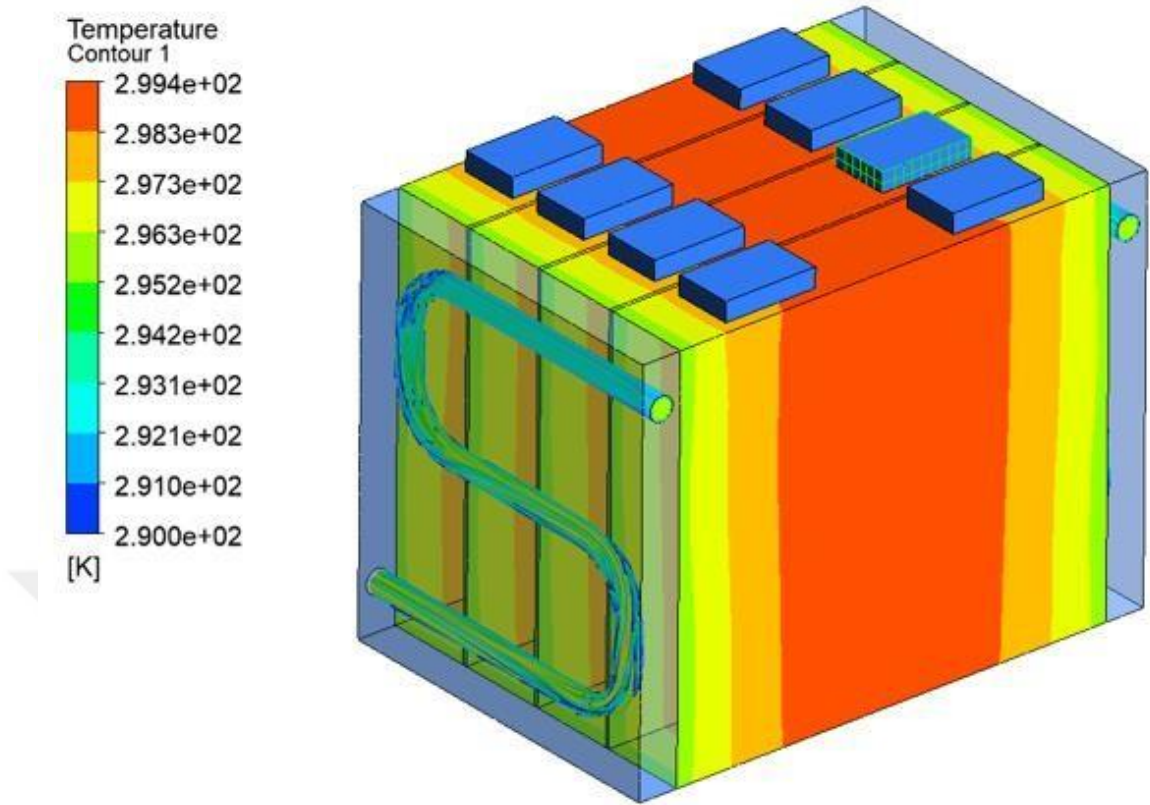
Son olarak, 4,25C deşarj oranında, soğutmasız durumda ortalama sıcaklık yaklaşık 315 K'dir. Ancak çok kanallı soğutucu plaka kullanıldığında, ortalama sıcaklıklar yaklaşık 20 K kadar düşmüş ve yaklaşık 295 K sabitlenmiştir.



Şekil 4. 28. Soğutmasız ve soğutucu plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

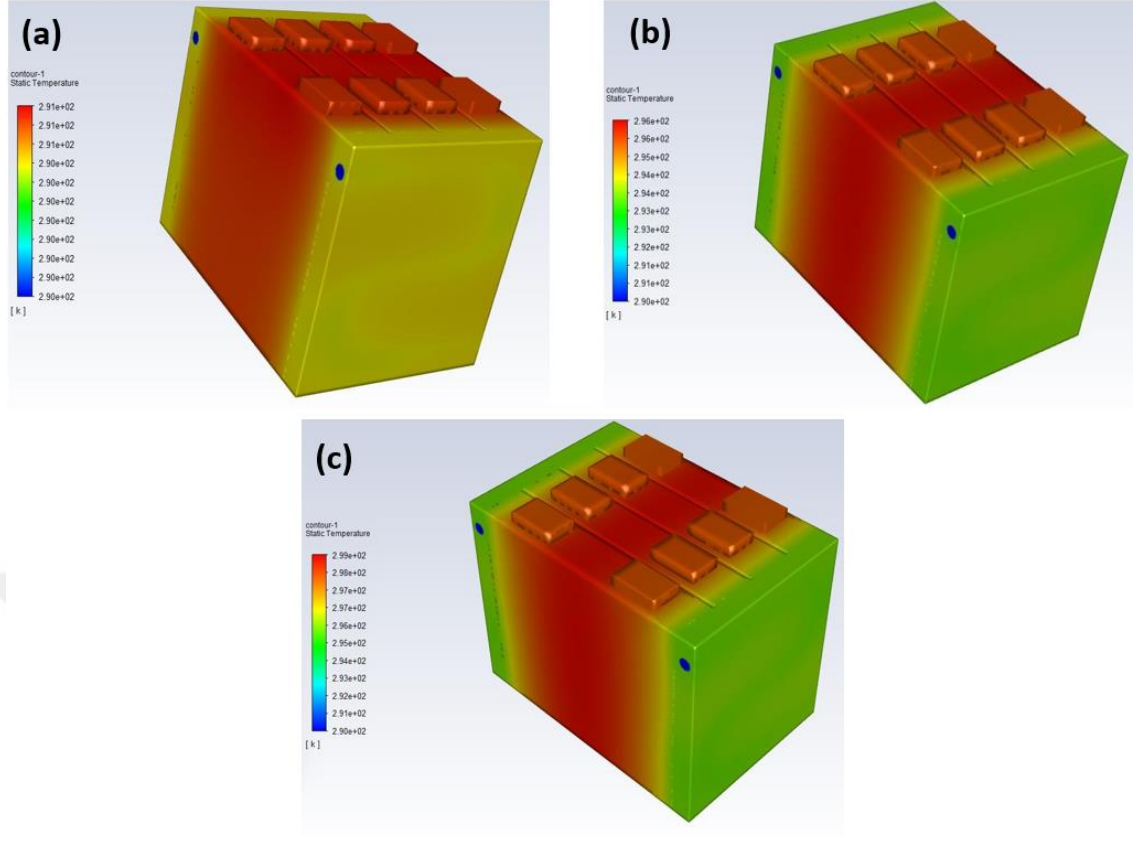
Tüm bu sonuçlar, çok kanallı soğutucu plakanın düşük ve yüksek güç gerektiren durumlarda bile bataryanın istenmeyen şekilde ısınmasını engellediğini ve bataryayı istenmeyen yüksek sıcaklıklardan koruduğunu göstermektedir. Bu durum, batarya modülünün stabil sıcaklıkta çalışmasını sağlayarak performansını arttırmaktadır.

Bu veriler, çok kanallı soğutucu plakanın, farklı deşarj oranlarında dahi istenilen sıcaklık seviyelerini korumada etkili olduğunu ve batarya modülünün ısıl yönetimini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 4. 29. Serpantin plakalı batarya modülü yüzey sıcaklığı ve akış çizgileri

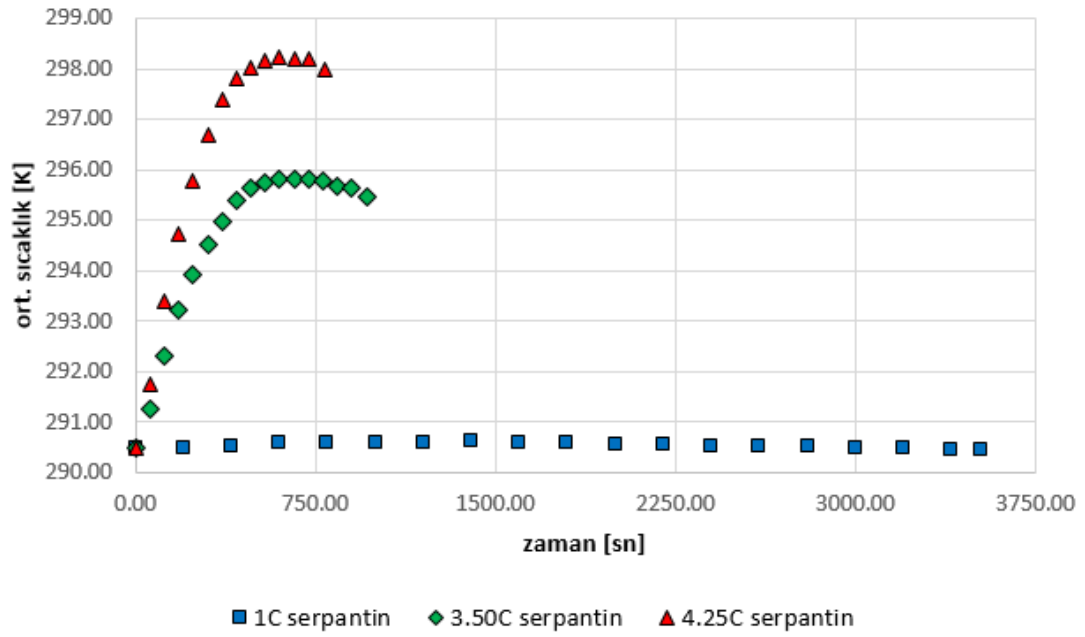
Şekil 4.29 serpantin plakalı batarya modülünün yüzey sıcaklığını ve akış çizgilerini göstermektedir. Şekilden de rahatlıkla anlaşılabileceği ve beklendiği gibi sıcaklık serpantin soğutucu plakasına yakın bölgelerde düşük iken soğutucudan uzaklaştıkça sıcaklık artmakta ve en yüksek sıcaklığa batarya modülünün orta bölgesinde ulaşmaktadır.



Şekil 4. 30. Serpantin plaka ile sıcaklık dağılımları **a)** 1 C deşarj oranında, **b)** 3,50 C deşarj oranında, **c)** 4,25 C deşarj oranında

Şekil 4.30’da üç farklı deşarj oranına ait serpantin soğutucu plaka ile yapılan simülasyonların sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Sıcaklık dağılım farklılıklarının kolayca ayırt edilebilmesi için tüm deşarj oranlarının skalaları sıcaklık farklarına uyumlu şekilde düzenlenmiştir.

1 C deşarj oranı için sıcaklık dağılımındaki maksimum fark yaklaşık 1 K’dir. Dolayısıyla serpantin soğutucu plakanın 1 C deşarj oranı için etkili bir soğutma metodu olduğu rahatlıkla söylenebilir. 3,50 C deşarj oranı için ise bu fark yaklaşık 3 K’dir. Bu sıcaklık farkı değeri, homojen bir soğutma istenildiği göz önüne alındığında nispeten iyi bir soğutma yapıldığını ispatlamaktadır. 4,25 C deşarj oranında sıcaklık dağılımındaki maksimum fark ise yaklaşık 5 K olup bir homojen sıcaklık dağılımı açısından sınırda olduğuna işaret etmektedir.

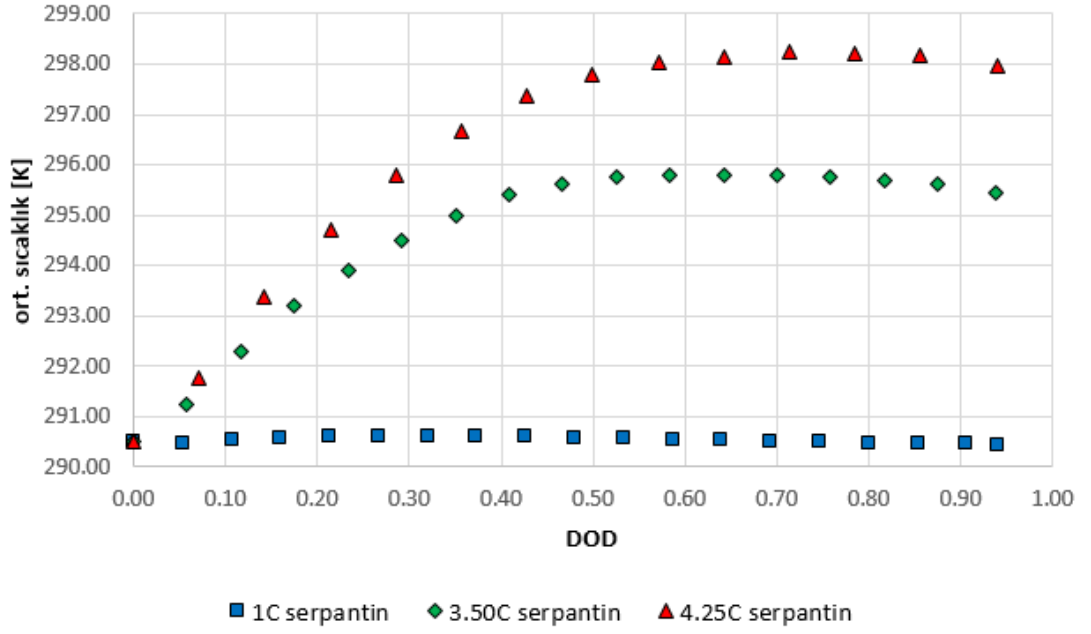


Şekil 4. 31. Serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32, üç farklı deşarj oranı için serpantin soğutucuya sahip batarya grubunun hacimsel ortalama sıcaklıklarını göstermektedir. Bu grafikler, farklı deşarj oranlarının bataryanın ortalama sıcaklık profiline nasıl etki ettiğini göstermektedir.

1 C deşarj oranında yapılan sayısal analizler, ortalama sıcaklığın bir süre boyunca sınırlı bir şekilde arttığını ve ardından bir düşüş yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, bataryanın belirli bir süre boyunca ısındığını, ancak sonrasında soğutucu sistemin etkisiyle sıcaklığın tekrar düşüşe geçtiğini göstermektedir.

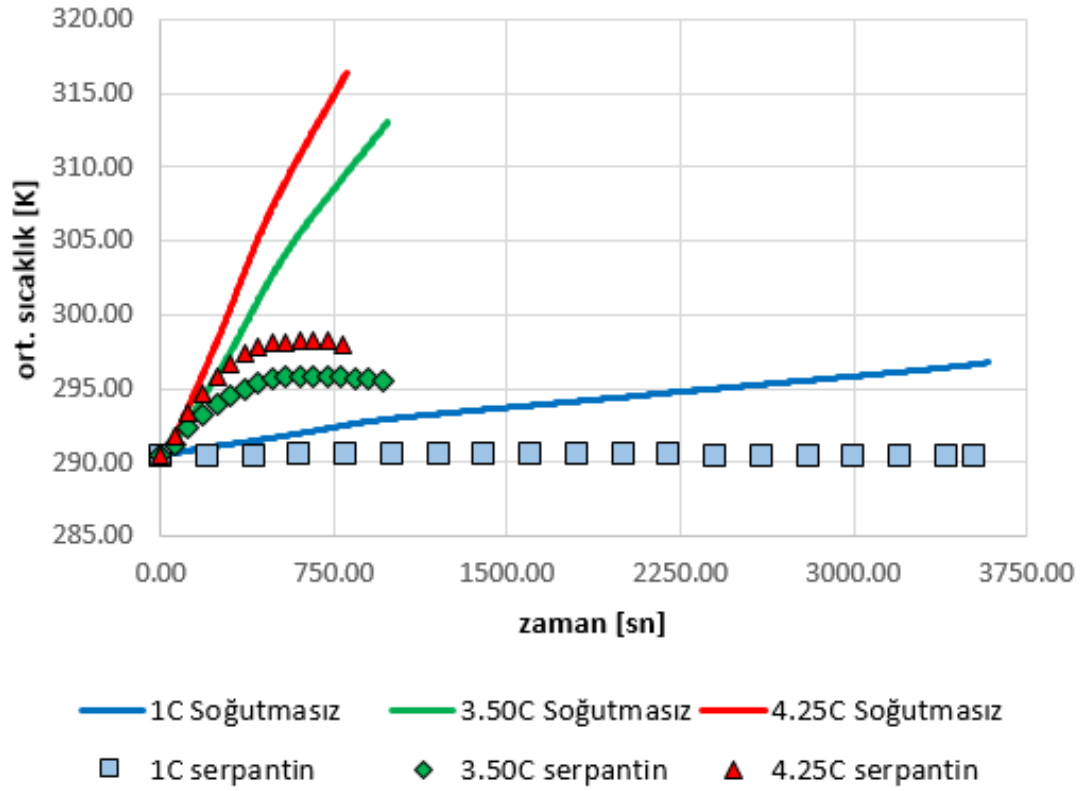
3,50 C deşarj oranında ise bataryanın çalışmaya başlamasıyla hızlı bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 5,50 K artışın ardından sıcaklıklar bir süreliğine istikrarlı hale gelmiş ve daha sonra yaklaşık 0,7 K seviyesinde bir düşüş yaşanmıştır. Bu durum, yüksek deşarj oranlarında bataryanın hızlı bir şekilde ısındığını, ancak soğutma sistemine bağlı olarak sıcaklığın daha sonra düşüşe geçtiğini göstermektedir.



Şekil 4. 32. Serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

4,25 C deşarj oranında elde edilen ortalama sıcaklıklar, en yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği durumu yansıtmaktadır. Batarya çalışmaya başladığında ortalama sıcaklık yüksek bir ivmeyle artmıştır. Yaklaşık 8 K seviyesinde bir artışın ardından sıcaklık, dengeye ulaşp nispeten sabitlenmiş ve daha sonra yaklaşık 0,3 K mertebesinde bir düşüş yaşamıştır.

Bu veriler, değişen deşarj oranlarının bataryanın ortalama sıcaklık profiline farklı şekillerde etki ettiğini göstermektedir. Farklı deşarj oranları, bataryanın ısınma hızı ve sonrasında sabitlenen sıcaklık seviyeleri açısından önemli farklılıklar sunmaktadır. Bu analizler, bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde çalışması için soğutma sistemlerinin etkili bir şekilde kullanılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.



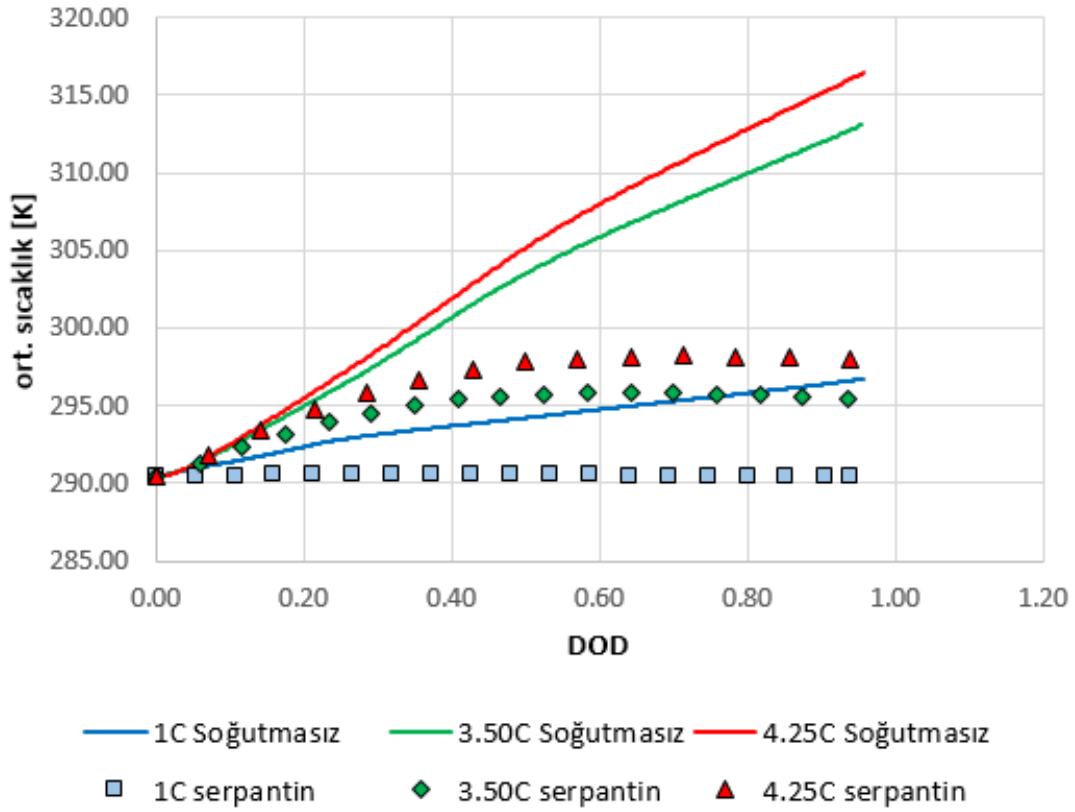
Şekil 4. 33. Soğutmasız ve serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34, soğutmasız ve serpantin soğutucu plaka kullanılarak elde edilen farklı deşarj oranlarına göre ortalama sıcaklık-zaman ve ortalama sıcaklık-DOD grafiklerini göstermektedir. Bu grafikler, batarya modülünün ısıl performansının deşarj oranlarına ve serpantin soğutma sistemi olup olmamasına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

Soğutmasız durumdaki batarya ortalama sıcaklığı 1C deşarj oranı için 295,70 K iken serpantin soğutucu aktif durumda olduğunda neredeyse hiç sıcaklık artışı yaşanmamıştır. Dolayısıyla, sıcaklığı yaklaşık 5 K bir soğutma sağlanmıştır.

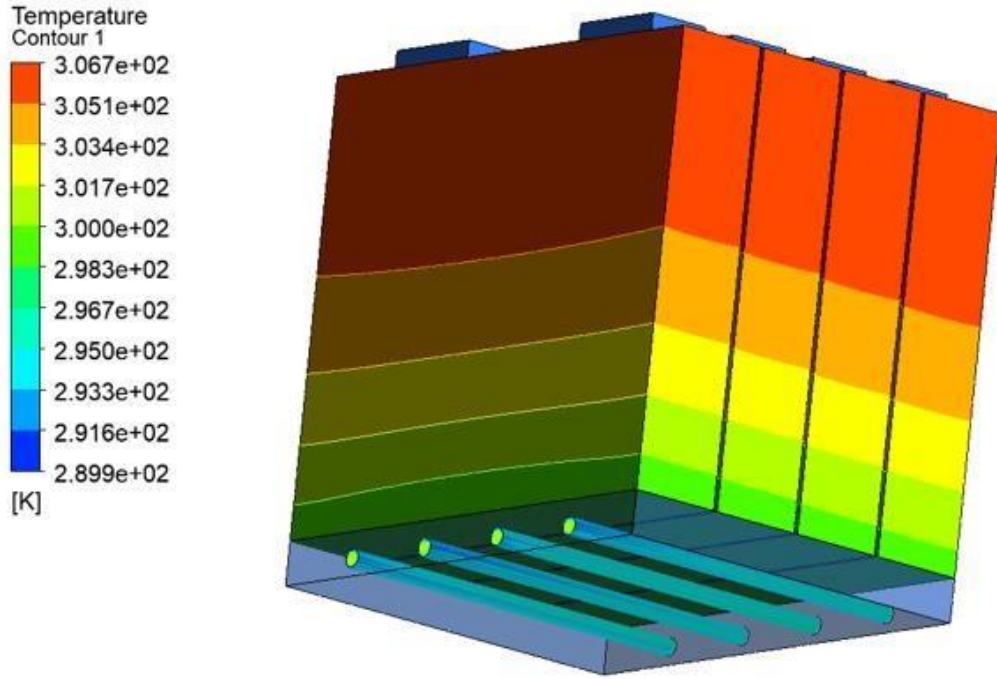
3,50C deşarj oranında ise soğutma olmadığı durum ile serpantin soğutmalı durum arasında ortalama sıcaklık olarak yaklaşık 14 K mertebesinde bir soğutma sağlanmıştır. Bu da sıcaklığın 296 K civarında stabil hale gelmesini sağlamıştır. Serpantin soğutucunun 3,50 C deşarj oranı için verimliliği yeterli olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmadaki en yüksek deşarj oranı olan 4,25C deşarj oranında ise soğutmasız durumda ortalama sıcaklık yaklaşık 315 K'dir. Ancak serpantin soğutucu plaka ile soğutma sağlandığında ortalama sıcaklıklar yaklaşık 16 K kadar düşmüş ve yaklaşık 298 K değerinde stabil hale gelmiştir.



Şekil 4. 34. Soğutmasız ve serpantin plaka ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

Soğutmasız ve serpantin soğutucu plaka ile yapılan sayısal analizler göz önüne alındığında, serpantin plaka ile soğutma düşük ve orta seviyeli güç gerektiren uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Ancak yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırken etkisinin çok kanallı plakalı soğutma metoduna göre daha sınırlı olduğu görülmüştür.



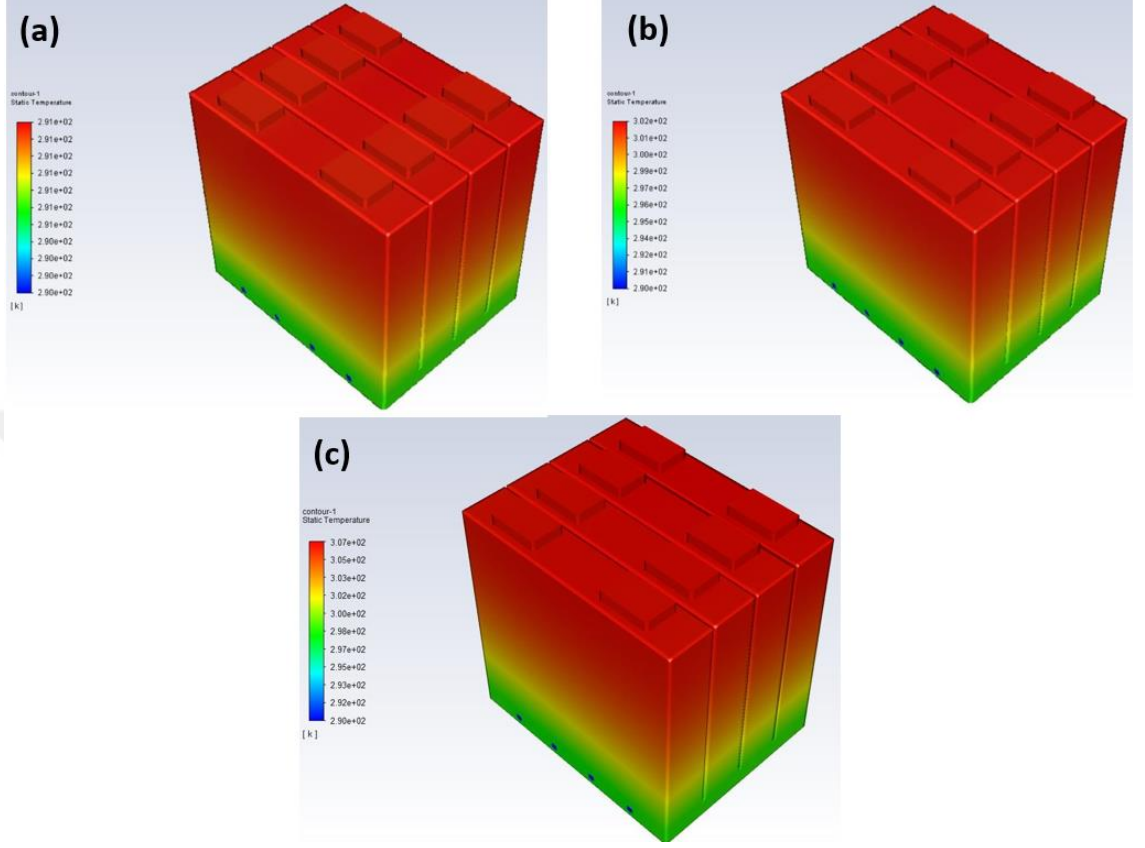
Şekil 4. 35. Alttan soğutmalı batarya modülü mesh yapısı ve soğutucu akış çizgileri

Alttan soğutma metodu içerisinde bulunan dört adet boru sayesinde dörder adet giriş ve çıkışa sahiptir ve batarya grubunu alttan soğutmaktadır. Şekil 4.35'te alttan soğutma metodu ile meydana gelen batarya modülünün yüzey sıcaklığı ve akış çizgileri görülmektedir. Bu metotta diğer iki metottan farklı olarak soğutma, batarya sisteminin altından sağlanmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık sınırları alt bölgelerde daha yoğundur. Sıcaklık değerleri alt soğutucudan uzaklaştıkça artmakta ve dolayısıyla en yüksek sıcaklıklar bataryanın üst bölgesinde elde edilmektedir.

Şekil 4.36'da üç farklı deşarj oranı için alttan soğutma metodu kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir. Sıcaklık dağılımının daha kolay anlaşılabilmesi için her bir deşarj oranının skalası farklıdır. Homojen sıcaklık dağılımı açısından kontrol edildiğinde 1 C deşarj oranı için maksimum sıcaklık farkı 1 K civarındadır. Alttan soğutma metodundaki sıcaklık dağılımı arasındaki maksimum farkın 1 C deşarj oranı için yeterli olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir.

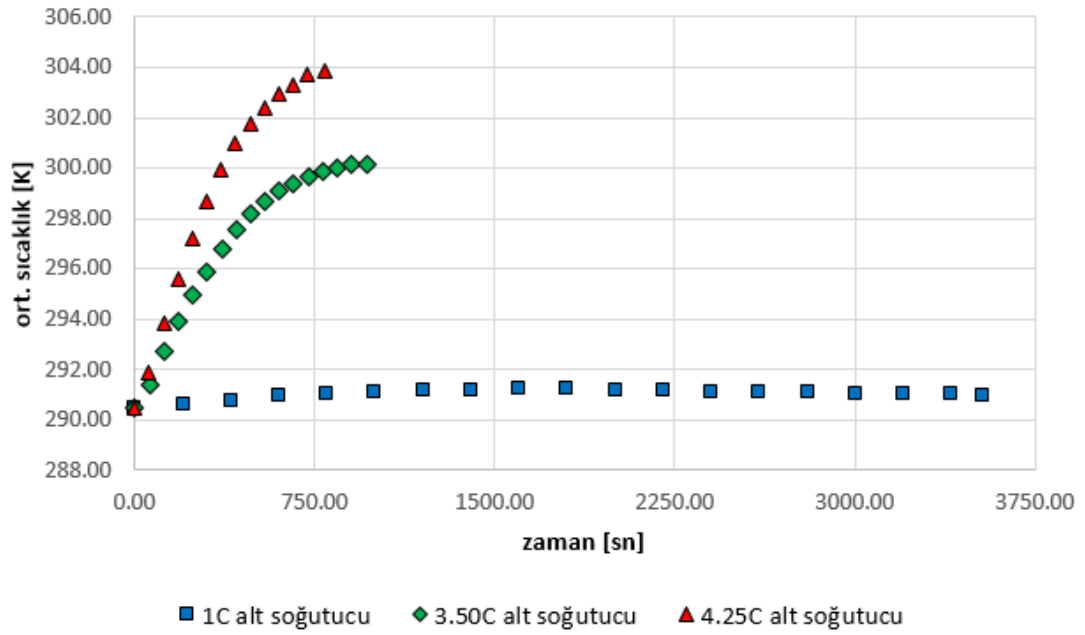
Çalışmada uygulanan ikinci deşarj oranı olan 3,50 C sonuçlarını inceleyecek olursak maksimum sıcaklık farkının 7 K civarında olduğu saptanmaktadır. Batarya üzerindeki

maksimum sıcaklık farkının 7 K olması altta soğutma metodunun 3,50 C deşarj oranında kullanılmasının verimlilik açısından uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 4. 36. Alttan soğutma ile meydana gelen sıcaklık dağılımları **a)** 1 C deşarj oranında, **b)** 3,50 C deşarj oranında, **c)** 4,25 C deşarj oranında

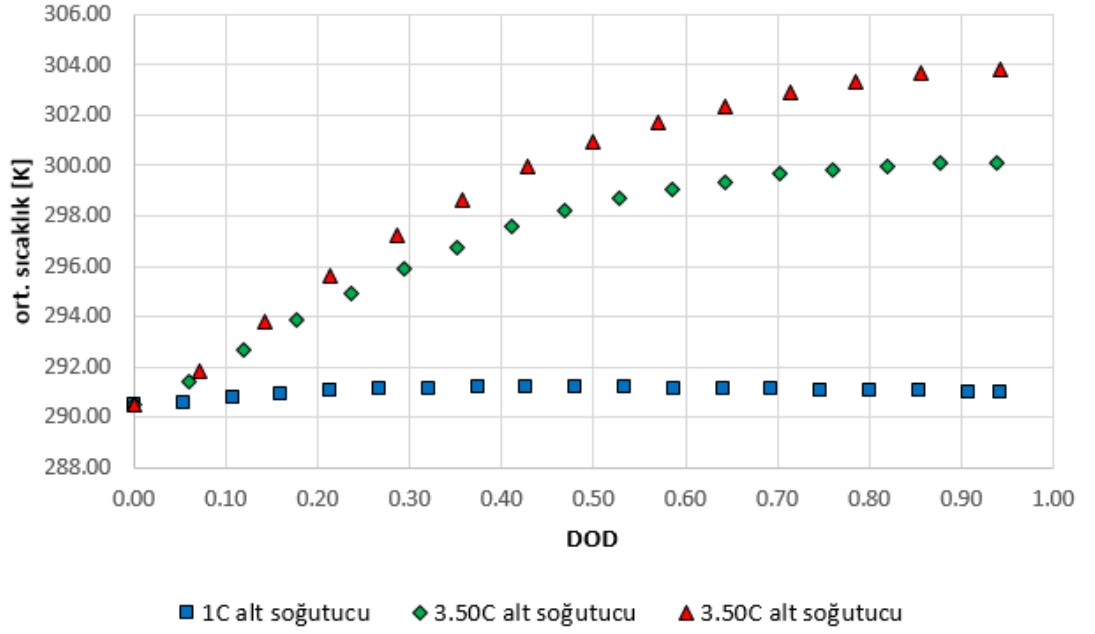
Son olarak 4,25 C deşarj oranında yapılan sayısal çalışmanın sıcaklık sonuçlarına bakıldığında, batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık farkı 13 K seviyesinde elde edilmiştir. Bu sıcaklık farkı önerilen maksimum sıcaklık farkından oldukça yüksek olup bataryanın çalışma güvenliğini de riske atma potansiyeli ortaya çıkabilir. Dolayısıyla alttan soğutma metodu 4,25 C deşarj oranı için yeterli bir soğutma yöntemi değildir.



Şekil 4. 37. Altan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık – zaman grafiği

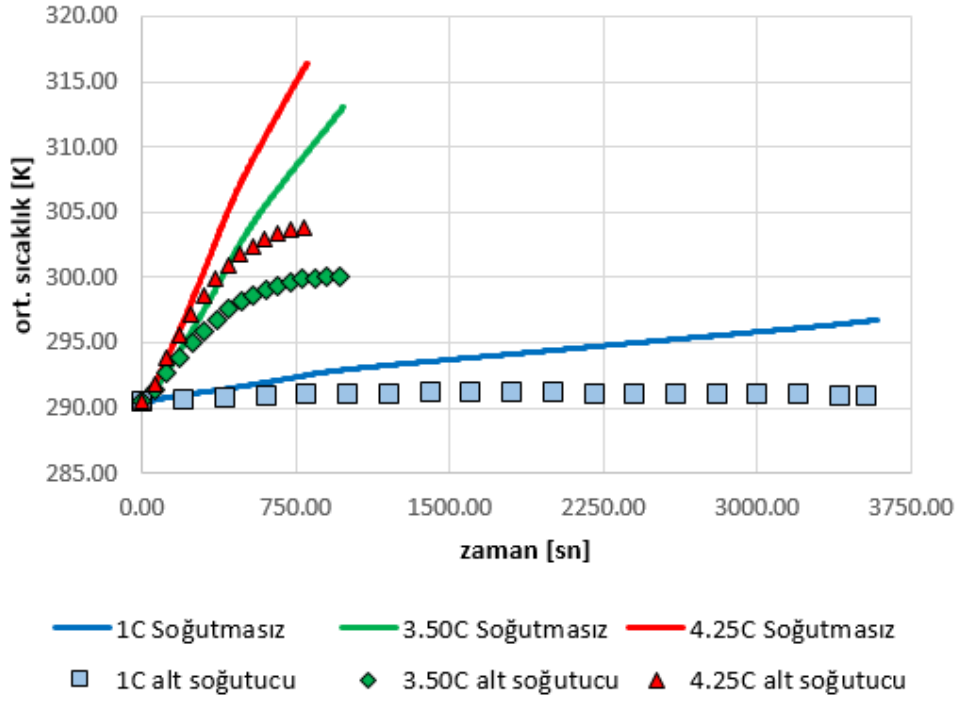
Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de üç farklı deşarj oranı için alttan soğutma metodu ile soğutulan batarya grubunun hacimsel ortalama sıcaklıkları verilmiştir. Diğer soğutma yöntemlerinden farklı olarak, 1 C deşarj oranında alttan soğutma metodunda batarya çalışmaya başladığında sıcaklık direkt olarak yukarı yönlü hareket etmiştir. Yaklaşık 15 dakikanın ardından sıcaklık dengelenmeye başlamış ve ardından sıcaklık seviyesi aşağıya doğru yönlenmiştir. 1 C deşarj oranında batarya sistemi ortalama sıcaklığı yaklaşık 1 K kadar artmıştır. Ortalama sıcaklık bazında incelendiğinde alttan soğutma sistemi düşük güç gerektiren uygulamalarda yeterli soğutmayı sağladığı görülmektedir.

3,50 C deşarj oranında meydana gelen ortalama sıcaklık değişimleri incelendiğinde batarya çalışması ile yüksek ivmeli bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Başlangıç değerine kıyasla 10 K civarında bir sıcaklık yükselişinin ardından ortalama sıcaklıklar dengeye gelmiş ve sabit kalmıştır. 3,50 C deşarj oranı için elde edilen maksimum sıcaklık altta soğutma metodunda elde edilmiştir. Bu da diğer soğutma metotları ile kıyaslandığında daha düşük bir performans göstermesi anlamına gelmektedir.



Şekil 4. 38. Altan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

En yüksek sıcaklığın beklendiği 4,25 C deşarj oranında ortaya çıkan ortalama sıcaklıklar değerlendirildiğinde sıcaklık artış hızının elde edilen en yüksek ivmeli artış olduğu rahatlıkla söylenebilir. Sıcaklık değerleri, alttan soğutma olmasına rağmen yaklaşık 14 K yükselmiştir. Bu da orta ve yüksek deşarj oranları için ortalama sıcaklıkların yeterli sürelerle verilse dahi sağlanamaması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla da güvenlik, verimlilik ve çalışma fonksiyonlarının devamı açısından orta ve yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılması önerilmez.



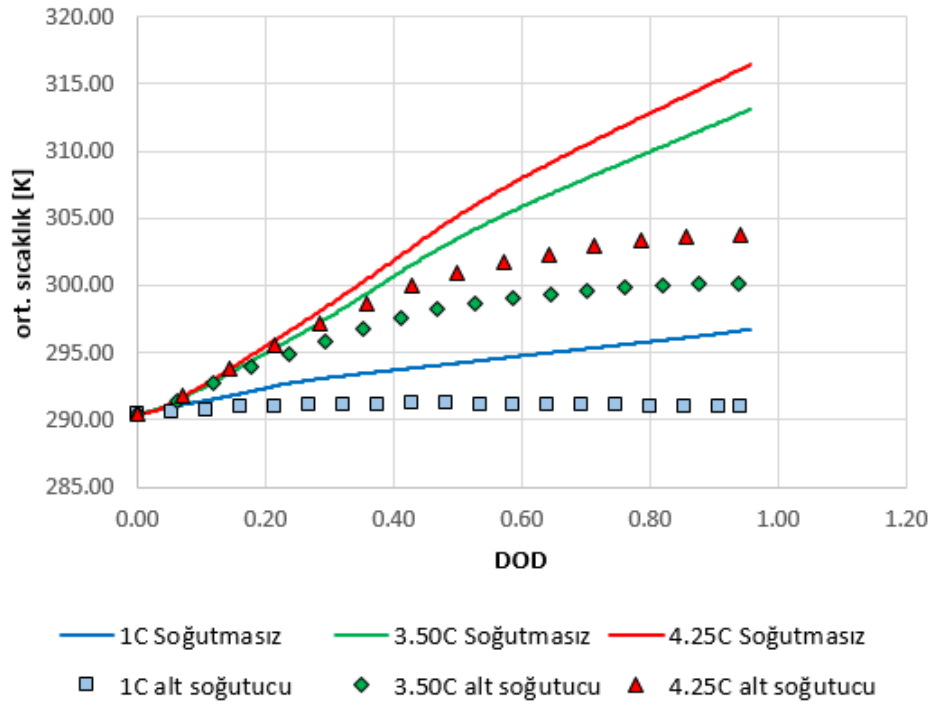
Şekil 4. 39. Soğutmasız ve alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - zaman grafiği

Şekil 4.39 ve Şekil 4.40, farklı deşarj oranlarına göre ortalama sıcaklık-zaman ve ortalama sıcaklık-DOD grafiklerinin soğutmasız ve alttan soğutma metodu ile değişimini vermektedir. İlk olarak, düşük yük olarak kabul edilen 1 C deşarj oranı için soğutmasız durumda elde edilen ortalama sıcaklık 295,70 K'dir ve alttan soğutmalı yöntem kullanıldığında ise 291 K olarak elde edilmiştir. Bu durum, alttan soğutma yönteminin 1 C deşarj oranı için etkili olduğunu ve yaklaşık 4 K gibi bir ortalama soğutma etkisi olduğunu gösterir.

3,50 C deşarj oranında, soğutma olmadığı durumda ortalama sıcaklık yaklaşık 310 K mertebesine ulaşırken alttan soğutma metodu çalışırken ortalama sıcaklık yaklaşık 300 K seviyesine kadar düşmüştür. Alttan soğutma metodu ile ortalama sıcaklığı 10 K civarında bir düşüş sağlanmıştır.

Bu çalışmadaki en yüksek deşarj oranı olan 4,25 C deşarj oranında ise soğutmasız durumda ortalama sıcaklık yaklaşık 315 K iken alttan soğutma yöntemi ile sıcaklık değeri 304 K mertebesine düşürerek 11 K bir soğutma sağlamıştır. Ancak yine de 304 K değeri

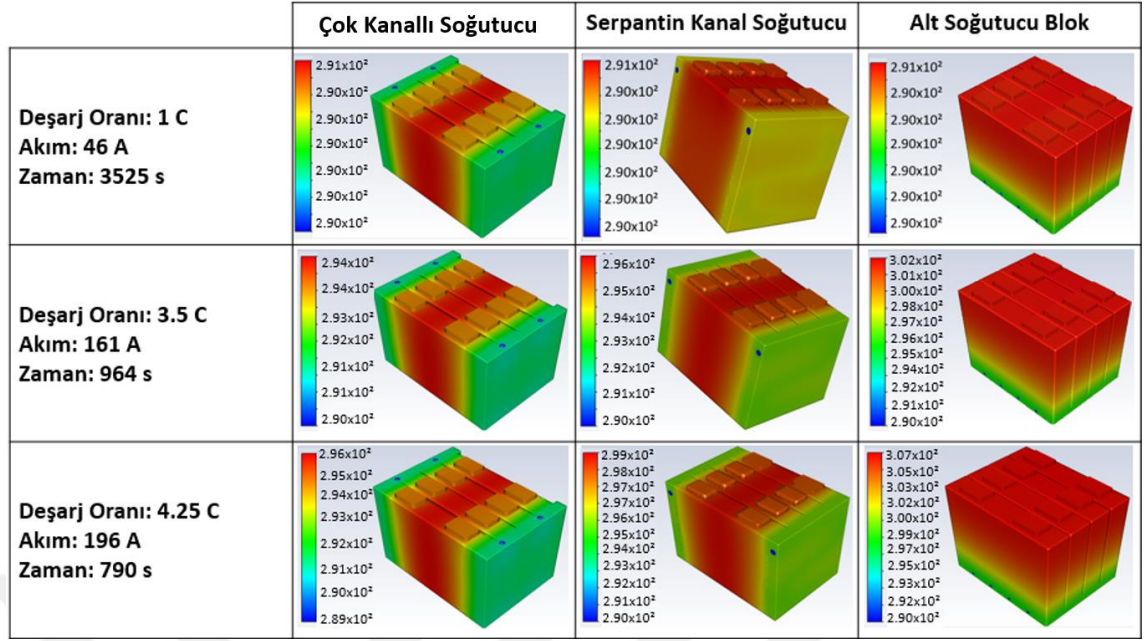
daha uzun çalışma süreleri düşünüldüğünde beklentinin üzerinde bir sıcaklıktır.



Şekil 4. 40. Soğutmasız ve alttan soğutma ile üç farklı deşarj oranı için ortalama sıcaklık - DOD grafiği

Altan soğutma yöntemi için elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, düşük deşarj oranları için verimli ve kullanışlı olduğu rahatlıkla söylenebilir. Ancak orta ve yüksek deşarj oranı gerektiren uygulamalardaki performansı çok kanallı ve serpantin soğutucu plakalara göre oldukça düşüktür.

Hem homojen soğutma bakış açısı ile hem de ortalama sıcaklık seviyesi açısından düşük deşarj oranlarında rahatlıkla kullanılabileceği ancak orta ve yüksek deşarj oranı ile çalışılan uygulamalarda kullanılmasının güvenlik, verimlilik ve batarya ömür süresine etkisinin negatif yönde olabileceği söylenebilir.



Şekil 4. 41. Soğutma gruplarının tüm deşarj değerlerinde oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 4.41’de üç farklı soğutucu bloğun sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Üç farklı soğutucu blok için elde edilen tüm veriler dikkate alınarak karşılaştırma tablosu hazırlanmış ve Çizelge 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4. 3. Soğutmasız ve soğutmalı simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

	Deşarj Oranı	Ort. Sıcaklık [K]	Sıcaklık Düşüşü [K]
Soğutmasız	1 C	295,70	-
	3,50 C	309,89	-
	4,25 C	314,57	-
Çok Kanallı Plaka	1 C	290,44	5,26
	3,50 C	293,60	16,29
	4,25 C	295,27	19,30
Serpantin Plaka	1 C	290,60	5,10
	3,50 C	295,70	14,19
	4,25 C	298,20	16,37
Alttan Soğutucu Plaka	1 C	291,19	4,51
	3,50 C	300,41	9,48
	4,25 C	304,09	10,48

HAD analizi ve deneysel sonuçlar incelendiğinde, yeni tasarlanan soğutucu plakanın tüm deşarj oranlarında daha etkili olduğu kolaylıkla görülebilmektedir. 1 C deşarj oranı için tüm soğutucular etkili bir performans göstermiştir ve sıcaklık artışını engellemiştir.

3,50 C deşarj oranı için, soğutucu plaka hücreleri ortalama 16 K kadar soğuturken, serpantin plaka ise 14 K soğutabilmiştir. Alttan soğutma durumunda ise yaklaşık 9,50 K'lık bir soğutma gözlemlenmiştir. Tüm plakaların 3,50 C deşarj oranındaki soğutmaları incelendiğinde en iyi performansı yeni tasarıma sahip prototip imalatı yapılan soğutucu plaka göstermiştir. En kötü soğutma performansı ise alttan soğutmada gerçekleşmiştir.

4,25 C deşarj oranında soğutucu plaka yaklaşık 19 K soğuturken serpantin plaka yaklaşık 16 K soğutmuştur ve sıcaklığı 298 K değerinde tutabilmiştir. Alttan soğutmada ise sıcaklık 300 K değerini aşarak 304 K civarında tutulmuştur. Bu da yaklaşık 10,50 K bir soğutma yaptığı anlamına gelmektedir.

Öncelikle tekil batarya hücresinin farklı akımlarda deşarj sürecine ilişkin tedarikçi firmanın sağladığı test verileri ile sayısal model sonuçları karşılaştırılarak modelde kullanılan batarya hücresinin istenilen voltaj aralığında çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Daha sonra ise bataryalar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ile batarya modülüne soğutucu blok ilave ederek çalışma performansı açısından literatürde yaygın olarak kullanılan serpantin kanal geometrili soğutucu blok sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak elde edilen sayısal veriler dikkate alınarak ısı performans ve basınç düşümü açısından en uygun soğutucu blok tasarımı yapılmıştır. Kanal içi akış sürecinde basınç düşümü ve ısı performans açısından hesaplamalarda kullanılacak metodoloji belirlenerek HAD ile elde edilen toplam basınç düşümü ile teorik hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

Son dönemde ise elektrikli taşıt üzerinde gerçek koşullarda soğutucu bloğun performansını irdeleyebilmek ve batarya modülünün gerçek koşullarda çalışmasına yönelik daha detaylı performans verisi alabilmek için yeni bir deney düzeneği ilave edilmiştir. Batarya yönetim sistemi ve algoritmaları kullanılarak tez çalışmasında geliştirilen soğutucu plakanın

batarya yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini detaylı olarak inceleme imkânı sağlamıştır. 4,25 C gibi yüksek akımlarda dahi geliştirilen soğutucu bloğun batarya yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak 40 °C'den yaklaşık olarak 20 °C mertebesine düşürdüğü ve homojen sıcaklık elde edildiği gösterilmiştir. Ayrıca elektrikli taşıtlarda fiziki olarak sıklıkla kullanılan Batarya soğutucu blok tasarımları için üç boyutlu HAD simülasyonları gerçekleştirilerek yeni tasarlanan ve prototip imalatı gerçekleştirilen soğutucu plakanın diğer geleneksel soğutucu kanallarından daha etkili olduğu ifade edilebilir. Yeni tasarlanan plaka elektrikli taşıtlar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalar için daha uygundur. Serpantin plakalı soğutucu ise ortalama güç gerektiren uygulamalar için ideal olduğu ifade edilebilir. Alttan soğutmalı plaka yüksek deşarj oranlarında yeterince etkili olamamakla birlikte heterojen bir soğutma yapmaktadır. Dolayısıyla orta ya da yüksek güç gerektiren uygulamalar için yeterince etkili olmayacağı öngörülmektedir.

5. SONUÇ

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, yeni tasarlanan soğutucu plakanın diğer geleneksel soğutuculardan daha etkili olduğu ifade edilebilir. Yeni tasarlanan plaka elektrikli taşıtlar gibiyüksek güç gerektiren uygulamalar için daha uygundur. Serpantin plakalı soğutucu ise ortalama güç gerektiren uygulamalar için ideal olduğu ifade edilebilir. Alttan soğutmalı plakayüksek deşarj oranlarında yeterince etkili olamamakla birlikte heterojen bir soğutma yapmaktadır. Dolayısıyla orta ya da yüksek güç gerektiren uygulamalar için yeterince etkili olmayacağı öngörülmektedir.

Bu araştırmada üç farklı soğutucu plaka, üç farklı deşarj oranı için termal olarak karşılaştırıldı. Sıvı soğutma plakalı batarya modüllerinin ısı performansının değerlendirilmesi için farklı deşarj oranları dikkate alınarak deneysel ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı deşarj hızlarında elde edilen sıcaklık değerleri dikkate alındığında yeni tasarlanan çok kanallı soğutucu plakanın diğer geleneksel tasarımlara göre termal açıdan daha etkili olduğu görülmektedir. Batarya modülünün farklı yerlerindeki sıcaklık farkı açısından çok kanallı soğutucu plaka, diğer soğutucu plaka tasarımlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek deşarj oranı açısından daha fazla homojenliğe sahiptir. Sonuç olarak, çok kanallı soğutucu plaka, batarya modülünün yüksek güçlü uygulamaları için daha uygundur. Batarya modüllerinin termal yönetimi, elektrikli araçlara yönelik batarya paketlerinin yaşam döngüsü ve araç sürüş menzili üzerinde büyük bir etkiye sahiptir; dolayısıyla otomotiv endüstrisi için sürdürülebilir teknoloji sağlayarak batarya paketi geri dönüşüm hedeflerine ulaşılmasını sağlar ve aynı zamanda enerji verimliliğini artırır.

Serpantin soğutucu plakanın sayısal sonuçlarından orta düzeyde elektrik gücü gerektiren uygulamalara uygun olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz. Alt soğutucu plaka, çok kanallı ve serpantin soğutucu plakalara göre daha düşük performansa sahip olup, aynı zamanda heterojen bir sıcaklık dağılımına da sahiptir. Bu nedenle alt soğutucu plaka tasarımı orta veya yüksek elektrik gücü gerektiren uygulamalar için yeterince etkili değildir.

Çok kanallı ve serpantin soğutucu plakalar çok benzer hesaplanmış maksimum sıcaklık farklarına sahipti ve bu değerler 3 K ila 4 K arasında değişiyordu. Ancak alt soğutucu plaka için 4,25'in altında 8 K değerinde daha yüksek sıcaklık farkları elde edildi. C deşarj akımı. Öte yandan çok kanallı soğutucu plakanın, serpantin soğutucu plakaya göre makul bir basınç düşüşü ile daha iyi soğutma performansı sağladığı, aynı zamanda sıcaklık homojenliğinin sağlanması açısından da avantajlara sahip olduğu ifade edilebilir.

Batarya modülünün farklı deşarj hızlarını kullanarak sıvı soğutucu plakalar arasında termal bir karşılaştırma elde etmek için ayrıntılı bir sayısal ve deneysel analiz yapıldı. Yukarıda verilen değerlendirmelerden yola çıkarak şu sonuçları belirtmek mümkündür:

1. Bu çalışmada prizmatik Li-ion batarya hücrelerinin termal yönetimi için paralel su akış kanallarına sahip yeni, yüksek performanslı bir soğutucu plaka tasarlandı.
2. Bu çalışmada geliştirilen çok kanallı soğutucu plaka kullanılarak, daha yüksek boşaltma hızları için sıcaklık önemli ölçüde düşürüldü.
3. Üç farklı sıvı soğutucu plakanın ısı performansının değerlendirilmesi için geçici koşullar altında akış ve ısı transferi analizini içeren üç boyutlu bir elektro-termal model geliştirilmiştir.
4. Sayısal simülasyon sonuçları deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğundan NTGK alt modeline sahip batarya modülü için, ısı üretim modellerinden ayrı olarak soğutma performansı için geçici sayısal hesaplamalarda akış ve ısı transferi analizleri eş zamanlı olarak gerçekleştirildi. literatürde anlatılmıştır.
5. Bu çalışmanın sonuçları, özellikle elektrikli araçlarda kullanılan LTO batarya hücreleri gibi prizmatik hücreler için laboratuvar ortamında dikkate alınan deney düzeneklerine katkıda bulunmaktadır.
6. Soğutma performansı ve sıcaklık homojenliği dikkate alınarak prizmatik Li-ion batarya hücrelerinin termal yönetimi için daha yüksek performanslı yeni bir soğutucu plaka tasarlandı.

KAYNAKLAR

- Ahmed, R., Sayed, M. E., Arasaratnam, I., Tjong, J., & Habibi, S. (2014). Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and State of Charge Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries—Part II: Aged Battery Model and State of Charge Estimation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 678-690. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2331062>
- Aktas, A., Kircicek, Y., & Ozkaymak, M. (2020). Modeling and validation analysis according to temperature effect of different type batteries. *Thermal Science*, 24(2 Part A), 1031-1043. <https://doi.org/10.2298/TSCI190401331A>
- Albatayneh, A., Assaf, M., Alterman, D., & Jaradat, M. (2020). Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 24, 669-680. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0041>
- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. (2018). A review of novel thermal management systems for batteries. *International Journal of Energy Research*, 42. <https://doi.org/10.1002/er.4095>
- Amini, M. R., Wang, H., Gong, X., Liao-McPherson, D., Kolmanovsky, I., & Sun, J. (2019). Cabin and Battery Thermal Management of Connected and Automated HEVs for Improved Energy Efficiency Using Hierarchical Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, PP, 1-16. <https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2923792>
- Baazouzi, S., Feistel, N., Wanner, J., Landwehr, I., Fill, A., & Birke, K. P. (2023). Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells—A Generic Overview. *Batteries*, 9(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/batteries9060309>
- Benabdelaziz, K., Lebrouhi, B. E., Anas, M., & Maaroufi, M. (2020). Novel external cooling solution for electric vehicle battery pack. *Energy Reports*, 6, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.043>
- Chawla, N., Bharti, N., & Singh, S. (2019). Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *Batteries*, 5. <https://doi.org/10.3390/batteries5010019>
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G.-H., Yang, C., & Pesaran, A. (2015). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015>
- Deka, R., Saikia, S., Biswakarma, N., Gour, Dr. N., & Deka, A. (2022). *Nanocatalysts for exhaust emissions reduction* (ss. 511-527). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00024-4>
- Dell, R. M., Rand, D. a. J., Connor, P., & Bailey, R. (Bob) D. (2001). *Understanding Batteries*. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781847552228>
- Dubey, P., Pulugundla, G., & Srouji, A. (2021). Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules. *Energies*, 14, 1259. <https://doi.org/10.3390/en14051259>
- El Baghdadi, M., De Vroey, L., Coosemans, T., Van Mierlo, J., Foubert, W., & Jahn, R. (2013). Electric Vehicle Performance and Consumption Evaluation. *World Electric Vehicle Journal*, 6, 30-37. <https://doi.org/10.3390/wevj6010030>
- Elshurafa, & Aldubyan, M. (2019). State-of-Charge Effects on Standalone Solar-Storage

- Systems in Hot Climates: A Case Study in Saudi Arabia. *Sustainability*, 11, 3471. <https://doi.org/10.3390/su11123471>
- Garud, K., Tai, L., Hwang, S.-G., Nghia, N., & Lee, M.-Y. (2023). A Review of Advanced Cooling Strategies for Battery Thermal Management Systems in Electric Vehicles. *Symmetry*, 15, 1322. <https://doi.org/10.3390/sym15071322>
- Gelmanova, Z., Zhabalova, G., Sivyakova, G., Lelikova, O., Onishchenko, O., Smailova, A., & Kamarova, S. (2018). Electric cars. Advantages and disadvantages. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015, 052029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/5/052029>
- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J. (2018). State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEE Access*, 6, 19362-19378. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2817655>
- Helmers, E., & Marx, P. (2012). Electric cars: Technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*, 24. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>
- Hidrué, M., Parsons, G., Kempton, W., & Gardner, M. (2011). Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource and Energy Economics*, 33, 686-705. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.02.002>
- Ho, T., Chang, K., Lee, S., & Kim, S. (2020). Transient Thermal Analysis of a Li-Ion Battery Module for Electric Cars Based on Various Cooling Fan Arrangements. *Energies*, 13, 2387. <https://doi.org/10.3390/en13092387>
- Hong, J., Wang, Z., & Liu, P. (2017). Big-Data-Based Thermal Runaway Prognosis of Battery Systems for Electric Vehicles. *Energies*, 10, 919. <https://doi.org/10.3390/en10070919>
- Hordé, T., Achard, P., & Metkemeijer, R. (2012). PEMFC application for aviation: Experimental and numerical study of sensitivity to altitude. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 10818-10829. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.085>
- Hosen, M. S., Pirooz, A., Kalogiannis, T., He, J., Van Mierlo, J., & Bercebar, M. (2022). A Strategic Pathway from Cell to Pack-Level Battery Lifetime Model Development. *Applied Sciences*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app12094781>
- Immonen, E., & Hurri, J. (2021). Incremental thermo-electric CFD modeling of a high-energy Lithium-Titanate Oxide battery cell in different temperatures: A comparative study. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117260. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117260>
- Kennedy, B., Patterson, D., & Camilleri, S. (2000). Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 90, 156-162. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00402-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00402-X)
- Kim, D., Koo, K., Jeong, J., Goh, T., & Kim, S. W. (2013). Second-Order Discrete-Time Sliding Mode Observer for State of Charge Determination Based on a Dynamic Resistance Li-Ion Battery Model. *Energies*, 6, 5538-5551. <https://doi.org/10.3390/en6105538>
- Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2018). Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>
- Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C.-S. (2008). Effect of electrode configuration on the

- thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 180(2), 909-916. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.054>
- Kök, C., & ALKAYA, A. (2020). Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads. *European Mechanical Science*, 4, 96-102. <https://doi.org/10.26701/ems.635707>
- Kurfer, J., Westermeier, M., Tammer, C., & Reinhart, G. (2012). Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. *CIRP Annals*, 61(1), 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.101>
- Kwon, K., Shin, C. B., Kang, T., & Kim, C.-S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 163, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012>
- Lebrouhi, B. E., Schall, E., Lamrani, B., Chaibi, Y., & Kousksou, T. (2022). Energy Transition in France. *Sustainability*, 14(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su14105818>
- Lemian, D., & Bode, F. (2022). Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*, 15, 5683. <https://doi.org/10.3390/en15155683>
- Linden, D., & Reddy, T. B. (Ed.). (2002). *Handbook of batteries* (3rd ed). McGraw-Hill.
- Liu, J., & Peng, H. (2008). Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 16, 1242-1251. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.919447>
- Liu, Y., Liao, Y. G., & Lai, M.-C. (2019). Transient Temperature Distributions on Lithium-Ion Polymer SLI Battery. *Vehicles*, 1, 127-137. <https://doi.org/10.3390/vehicles1010008>
- Lu, J., Zhou, Y., Jiang, T., Tian, X., Tu, X., & Wang, P. (2015). Synthesis and optimization of three-dimensional lamellar LiFePO₄ and nanocarbon composite cathode materials by polyol process. *Ceramics International*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.063>
- Lu, R., Yang, A., Xue, Y., Xu, L., & Zhu, C. (2011). Analysis of the key factors affecting the energy efficiency of batteries in electric vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, 4, 9-13. <https://doi.org/10.3390/wevj4010009>
- Lu, T., Dai, F., Zhang, J., & Wu, M. (2012). Optimal control of dry clutch engagement based on the driver's starting intentions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226, 1048-1057. <https://doi.org/10.1177/0954407011435465>
- Lv, S., Wang, X., Lu, W., Jiaqiao, Z., & Ni, H. (2021). The Influence of Temperature on the Capacity of Lithium Ion Batteries with Different Anodes. *Energies*, 15, 60. <https://doi.org/10.3390/en15010060>
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653-666. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- Madani, S. S., Swierczynski, M., & Kær, S. (2017). *The discharge behavior of lithium-ion batteries using the Dual-Potential Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) Battery Model*. 1-14. <https://doi.org/10.1109/EVER.2017.7935915>
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Foua, B., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*, 9. <https://doi.org/10.3390/app9112296>

- Mcculloch, M., Bishop, J., & Doucette, R. (2012). Using Electric Vehicles for Road Transport. *İçinde Energy, Transport, & the Environment: Addressing the Sustainable Mobility Paradigm* (ss. 223-252). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2717-8_12
- Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12, 1074-1094. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
- Morali, U. (2022). A numerical and statistical implementation of a thermal model for a lithium-ion battery. *Energy*, 240, 122486. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122486>
- Oliveira, D., Saavedra, O., Santos-Pereira, K., Pereira, J., Cosme, D., Veras, L., Bento, R., & Riboldi, V. (2021). A critical review of energy storage technologies for microgrids. *Energy Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12667-021-00464-6>
- Omar, N., Al Sakka, M., Daowd, M., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2012). Development of a Thermal Model for Lithium-Ion Batteries for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 5, 300-306. <https://doi.org/10.3390/wevj5020300>
- Omariba, Z., Zhang, L., & Sun, D. (2018). Review on Health Management System for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles. *Electronics*, 7. <https://doi.org/10.3390/electronics7050072>
- Ouyang, D., Weng, J., Chen, M., & Wang, J. (2020). Impact of high-temperature environment on the optimal cycle rate of lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, 28, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101242>
- Paccha-Herrera, E., Calderón-Muñoz, W., Orchard, M., Jaramillo Montoya, F., & Medjaher, K. (2020). Thermal Modeling Approaches for a LiCoO₂ Lithium-ion Battery—A Comparative Study with Experimental Validation. *Batteries*, 6, 40. <https://doi.org/10.3390/batteries6030040>
- Peng, X., Chen, S., Garg, A., Bao, N., & Panda, B. (2019). A review of the estimation and heating methods for lithium-ion batteries pack at the cold environment. *Energy Science and Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1002/ese3.279>
- Pisu, P., Rizzoni, G., Musardo, C., & Staccia, B. (2004, Ocak 1). A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-59996>
- Plett, G. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background. *Journal of Power Sources*, 134, 252-261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031>
- Previati, G., Mastinu, G., & Gobbi, M. (2022). Thermal Management of Electrified Vehicles—A Review. *Energies*, 15, 1326. <https://doi.org/10.3390/en15041326>
- Saldaña, G., Martín, J., Zamora, I., Asensio, F., & Oñederra, O. (2019). Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation. *Energies*, 12, 2750. <https://doi.org/10.3390/en12142750>
- Sevilgen, G., Dursun, H., & Kılıç, M. (2023). Experimental and Numerical Investigations on the Thermal Performance of Three Different Cold Plates Designed for the Electrical Vehicle Battery Module. *Sustainability*, 15, 14162. <https://doi.org/10.3390/su151914162>
- Shukla, A. K., Venugopalan, S., & Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 100(1), 125-148. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00890-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00890-4)

- Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *Journal of Power Sources*, 401, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.094>
- Smith, A. J., Burns, J., Zhao, X., Xiong, D., & Dahn, J. (2011). A High Precision Coulometry Study of the SEI Growth in Li/Graphite Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 158, A447-A452. <https://doi.org/10.1149/1.3557892>
- Sobol, Ł., & Dyjakon, A. (2020). The Influence of Power Sources for Charging the Batteries of Electric Cars on CO2 Emissions During Daily Driving: A Case Study from Poland. *Energies*, 13, 4267. <https://doi.org/10.3390/en13164267>
- Song, J.-H., You, S.-J., & Jeon, D. H. (2014). Numerical modeling and experimental validation of pouch-type lithium-ion battery. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44(9), 1013-1023. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0723-x>
- Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., Li, Y., Zheng, S., Vetterlein, S., Gao, M., Du, J., Parkes, M., Ouyang, M., Marinescu, M., Offer, G., & Wu, B. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>
- Wang, J., Huang, W., Pei, A., Li, Y., Yu, X., & Cui, Y. (2019). Improving cyclability of Li metal batteries at elevated temperatures and its origin revealed by cryo-electron microscopy. *Nature Energy*, 4, 1. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0413-3>
- Wellings, J., Greenwood, D., & Coles, S. R. (2021). Understanding the Future Impacts of Electric Vehicles—An Analysis of Multiple Factors That Influence the Market. *Vehicles*, 3(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040051>
- Wong, K., & Chow, W. (2020). Principle for the Working of the Lithium-Ion Battery. *Journal of Modern Physics*, 11, 1743-1750. <https://doi.org/10.4236/jmp.2020.1111107>
- Yang, G., Yim, Y.-J., Lee, J. W., Heo, Y.-J., & Park, S.-J. (2019). Carbon-Filled Organic Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage: A Review. *Molecules*, 24(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/molecules24112055>
- Yeow, K., Teng, H., Thelliez, M., & Tan, E. (2012, Haziran 18). *Comparative Study on Thermal Behavior of Lithium-Ion Battery Systems With Indirect Air Cooling and Indirect Liquid Cooling*. <https://doi.org/10.1115/ISFA2012-7196>
- Zhang, Z., Zhang, Q., Chen, Y., Bao, J., Xianlong, Z., Xie, Z., Wei, J., & Zhou, Z. (2015). The first introduction of graphene to rechargeable Li-CO2 batteries. *Angewandte Chemie - International Edition*, 54, 6550-6553. <https://doi.org/10.1002/anie.201501214>
- Zhu, L., Xu, X., Zhao, L., & Yuan, Q. (2021). Comparative analysis of thermal runaway characteristics of lithium-ion battery under oven test and local high temperature. *Fire and Materials*, 46. <https://doi.org/10.1002/fam.2976>