

T.C
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARABALAR İÇİN GELİŞTİRİLEN BİR LİTYUM
İYON BATARYA PAKETİNİN ISIL YÖNETİMİ VE
OPTİMİZASYONU

YUNUS KILIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2020

T.C
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARABALAR İÇİN
GELİŞTİRİLEN BİR LİTYUM İYON
BATARYA PAKETİNİN ISIL YÖNETİMİ VE
OPTİMİZASYONU

YUNUS KILIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**THERMAL MANAGEMENT AND
OPTIMIZATION OF A LITHIUM-ION
BATTERY PACK FOR ELECTRIC CARS**

YUNUS KILIÇ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE

2020

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10/07/2020 tarih ve 2020/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/08/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yunus KILIÇ'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE

: Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Günümüzde fosil yakıtların hızla tüketimi ve sınırlı miktarda olması insanları alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Lityum iyon bataryalar bu ihtiyaca cevap verebilmesi bakımından kullanım alanları giderek yaygınlaşmaktadır. Yüksek güç ve performans gerektiren elektrikli arabalarda kullanılmaktadır. Yüksek akım ve voltaj değerlerinde belirli bir ısı üreten bu bataryalar için soğutma yönetimi batarya ömrü ve kullanıldığı makine açısından çok önemlidir. Çünkü bu batarya içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar belirli bir kritik sıcaklığın üzerinde daha hızlı oluşup daha çok ısı üretmesi sonucunu doğurur. Bunun sonucunda hücre sıcaklığı sürekli artar. Doğru bir soğutma tasarımı yapılamazsa bataryada hacimsel genleşme, patlama veya yanma olması muhtemeldir. Bu sonuç tüm sistemin yanması ve bataryanın çalıştırdığı makinenin bir daha hiç kullanılamaması anlamına gelir ve güvenlik açısından bir tehdit unsurudur.

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılacak bir lityum iyon batarya paketinin su soğutmalı ısı tasarımı yapılmıştır. Farklı çalışma durumlarına göre açığa çıkan ısı miktarı analitik olarak belirlenmiştir. Yüksek performans ihtiyacında bataryadan yüksek kapasite oranlarında akım çekilmesi durumunda oluşacak ısı üretimi en kötü senaryo olarak seçilip soğutma kanal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için soğutma kanalları ve bataryalarda ortaya çıkan ısı-akışkan olaylarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçların değerlendirilmesi ve optimizasyonu sonrasında en uygun soğutma tasarımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lityum iyon bataryalar, ısı yönetim, tasarım, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, optimizasyon.

SUMMARY

In today's world, fossil fuels are consumed rapidly and they will waste eventually due to their limited sources. This situation causes the people to find alternative energy resources. Lithium Ion Batteries become more and more common to respond this situation. In addition, they are used in the electric vehicle which needs high power and performance. Cooling Method is very important for Lithium Ion Batteries which generate heat at high current and voltage, also battery life, because the chemical reactions in the battery cause more heat production when the critical temperature is exceeded, therefore the cell temperature constantly increases. If the cooling system does not design properly, the battery will burst and burn due to volumetric expansion. This means burning of the entire system, so the battery operated machine will never be used again and also it is a security threat to users.

In this study, liquid water-cooling thermal design has been developed for a lithium battery pack which is used in electric vehicle. The amount of heat release has been defined under different working conditions. When the system works at high performance, it draws current at high speed from battery, so it causes an increase in heat. In this reason, the parameters are chosen in order to design the proper cooling-system while considering these situations. Computational fluid dynamics (CFD) method is used to define cooling channel and heat-fluid connections in the battery. As a result of this method, the optimal cooling design is obtained thanks to an optimization.

Keywords: Lithium Ion Battery, Thermal Management, Cooling Design, CFD, Optimization

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince desteğini esirgemeyen tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Fevzi Bedir'e, bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan ve ilerleten değerli hocam Doç. Dr. M. Fazıl Serincan'a, değerli görüş ve önerileriyle eğitim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Şaban Güneç'e, labartuvar çalışmalarını yürüten Fatih Fahreddin Öngül, Bora Saban, Eda Güzel ve Halis Kılıç'a, her zaman desteğini hissettiğim ve kıymetli görüşlerinden faydalandığım değerli arkadaşlarım Doğukan Arslan, Can Saf ve Işıl Ünal'a ve son olarak bu süreçte her zaman yanımda olan değerli aileme hoşgörü ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim. Bu tez TÜBİTAK tarafından desteklenen Mustafa Fazıl Serincan'ın yürütücüsü olduğu 114M774 nolu "Lityum İyon Bataryaların Su soğutmalı Isıl Yönetimi" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında çalışmalarımın oluşması bu tez süresince sunduğu fırsatlar sayesinde elde ettiğim bilgi birikimi ve tecrübe için Tübitak'a ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Hava İle BTYS	3
1.2. Sıvı İle BTYS	6
1.3. (Sıvı-Gaz) Faz Değişim Materyalleri ile BTYS	8
1.4. (Katı-Sıvı) Faz Değişim Materyalleri ile BTYS	11
2. LİTYUM-İYON BATARYALAR	17
2.1. Li-İyon Bataryaların Yapısı	17
2.2. Lityum-İyon Bataryaların Çalışma Prensibi	17
2.3. Lityum İyon Bataryalarda Isı Üretimi	21
2.4. Lityum-İyon Bataryaların Matematiksel Alt Yapısı	30
3.BTYS İÇİN SOĞUTMA KANALI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU	37
3.1. Soğutma Kanalı Ölçülerinin Belirlenmesi	38
3.2. Su Ortalama Giriş Hızı Ve Reynolds Sayısının Saptanması	41
3.3. Kanal Sayısının Belirlenmesi	43
3.4. Isı Transferini İyileştirme Çalışmaları	47
4.SOĞUTMA PLAKASININ TERMAL SİMÜLASYON SONUÇLARI VE OPTİMİZASYONU	59
4.1. Suyun Kanal İçerisine Eşit Hızla Girmesi Modellenen Yaklaşım	59
4.2. Suyun Manifold İçerisine Eşit Debiyle Girmesi Modeli Yaklaşımı	68
4.3. Geliştirilmiş Nihai Soğutma Plakası Modelinin Seri Bağlı Batarya Paketi İle Ortak Çalıştırılmış Simülasyon Sonuçları	73

5. TEST SONUÇLARI	79
5.1. Doğal Konveksiyonel Soğuma Etkisinde Test Sonuçları	79
5.2. Soğutma Sistemi Etkisinde Test Sonuçları	85
5.3. Değerlendirme	87
6.SONUÇ VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kisaltmalar</u>	
A	:Alan (m^2)
α	: Lityum transfer katsayısı
c	: Lityum konsantrasyonu (mol dm^{-3})
c_p	: Sabit basınçta özel ısı iletim katsayısı ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_e	: Elektrolit içi lityum konsantrasyonu (mol dm^{-3})
c_{sp}	: Pozitif elektrot lityum konsantrasyonu (mol dm^{-3})
c_{sn}	: Negatif elektrot lityum konsantrasyonu (mol dm^{-3})
D	: Çap (m)
D_e	: Difüzyon sabiti ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)
e	: Temel yük sayısı
E_a	: Aktivasyon enerjisi (J mol^{-1})
g	: Yerçekimi ivmesi (m s^{-2})
f	: Sürtünme katsayısı
F	: Faraday sabiti (coulomb mol^{-1})
h	: Taşınım ile ısı transfer katsayısı ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
h_k	: Yük kaybı (m)
I	: Akım (A)
j	: Akım yoğunluğu (A cm^{-2})
k	: İletimle ısı transfer katsayısı ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_b	: Boltzman sabiti
L	: Uzunluk (m)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg s^{-1})
M	: Molar kütle (g mol^{-1})
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Basınç (N m^{-2})
Pr	: Prandtl sayısı
S	: Entropi ($\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}$)
Q	: Isı (watt)

\dot{q}	: Isı akısı ($W m^{-2}$)
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık (°C veya K)
t_0^+	: Taşıma katsayısı
Voc	: Açık çevrim voltajı (V)
V	: Anlık voltaj (V)
v	: Hız ($m s^{-1}$)
\dot{w}	: Pompa gücü (W)
R	: Gaz sabiti ($kJ kmol^{-1}K^{-1}$)
R_{SEI}	: SEI direnci (VA^{-1})
z	: Yük numarası
ρ	: Yoğunluk ($kg m^{-3}$)
ν	: Kinematik viskozite ($m^2 s^{-1}$)
N_a	: Avagadro sayısı
ε	: Gözeneklilik katsayısı
η_D	: Over potansiyel (V)
ϕ_1	: Katı faz potansiyeli(V)
ϕ_2	: Solüsyon voltajı (V)
σ_e	: Elektrolit iyonik iletkenliği (Scm^{-1})
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
BTYS	: Batarya termal yönetim sistemi
FDM	: Faz değişim materyali
SEI	: Solid elektrot interfazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Hava ile üniform soğutma sağlanabilmesi için hazırlanmış 2 boyutlu manifold tasarımları.	4
1.2: Hava kanallarında ısı transferini artırmak için uygulanan pin eklenmiş kanallar.	5
1.3: Hava kanallarında ısı transferini artırmak için hazırlanmış gözenekli metal köpük uygulaması.	5
1.4: Batarya paketi boyunca sıcaklık farkını azaltmak için kurgulanmış 2 fanlı, 2 ayrı kanallı soğutma bloğu tasarımı.	6
1.5: Isı borusunun yapısı.	10
1.6: Isı borusunda kullanılan fitil yapılar.	10
1.7: Kanatlı ısı borusu ve salınımlı ısı borusu.	14
1.8: Fan destekli bir ısı borusunun batarya paketinde kullanımı.	15
1.9: 20 ah LiFePO4 prizmatik Li-iyon bataryanın 3C deşarj akımında sıcaklık- performans ilişkisi.	15
2.1: Lityum iyon bataryaların bazı tasarımları (prizmatik-silindir).	19
2.2: Lityum-iyon bataryanın yapısı.	20
2.3: Lityum-iyon bataryalarda şarj ve deşarj sırasında oluşan reaksiyonlar.	21
2.4: 70 A deşarj akımında elde edilen bölgesel kayıplar.	23
2.5: Açık anahtar voltajının orantısal zamana göre değişimi.	25
2.6: Batarya test cihazı.	25
2.7: Bir lityum-iyon bataryanın yüksek kapasite oranlarında simüle edilmiş ısı üretim değişimleri.	26
2.8: 11 Amper-saat bir lityum iyon bataryanın 2c kapasite oranında test edilmiş bölgesel sıcaklık değişimi.	26
2.9: 30 Amper-saat kapasiteye sahip bir lityum-iyon bataryanın farklı kapasite oranlarında simüle edilmiş sıcaklık değişimleri.	27
2.10: 11 Ah bataryanın şarj- deşarj sırasında elde edilen voltaj-zaman eğrisi.	27

2.11:	11 Ah bataryanın şarj- deşarj sırasında elde edilen sıcaklık-zaman eğrisi.	28
2.12:	Simülasyonu yapılan li-ion batarya modelinde oluşan bölgesel ısı kaynakları.	28
2.13:	3C deşarj durumunda kalan li-ion bataryanın voltaj-zaman grafiği.	29
2.14:	300 K ortam sıcaklığında 3C deşarj durumunda kalan bataryanın bölgesel sıcaklık dağılımı.	29
2.15:	3C deşarj durumunda kalan li-ion bataryanın sıcaklık-zaman grafiği.	30
2.16 :	Anot ve katot malzemelerindeki lityum konsantrasyonun fabrika çıkışı ve ilk kullanım sonrasındaki durumu.	34
2.17:	intercalasyon ve SEI modeli.	35
3.1:	Bir batarya soğutma plakasının kesit görünümü.	38
3.2:	Sonlu kesitteki kanal akışındaki enerji verileri.	41
3.3:	Alüminyum plakanın batarya ile temas eden yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.	45
3.4:	Kanal akışı orta düzlemindeki basınç dağılımı.	45
3.5:	Kanal akışı orta düzlemindeki sıcaklık dağılımı.	46
3.6:	Kanal akışı yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.	46
3.7:	Dörtgen ve bombeli kanal içi suyun ağ yapısı.	47
3.8:	Sonlu hacimdeki kanal akışındaki ısı akısına maruz kalan yüzey konumları.	48
3.9:	Bir kanal akışında bölgesel sıcaklık farkı.	49
3.10:	Bir akışkanda ısı ve hız sınır tabakası gelişimi.	51
3.11:	Isı transferini artırmak amacıyla modellenmiş 2 boyutlu farklı kanal geometrileri.	51
3.12:	Dalgalı tip kanal geometrisinin perpektif görünümü.	52
3.13:	Düz yapıdaki kanal akışında gerçekleşen sıcaklık dağılımı.	53
3.14:	Dalgalı yapıdaki kanal akışının sıcaklık dağılımı.	53
3.15:	Düz ve dalgalı tip modellerin sıcaklık dağılımları.	55
3.16:	Düz ve dalgalı tip modellerin hız dağılımları.	56
3.17:	Dalgalı tip modelin hız kesit görünümü.	57
4.1:	1.5x3mm su girişı kesitine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.	60
4.2:	1.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları.	60

4.3:	1x3mm su girişi kesitine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.	62
4.4:	1x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülatoörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları	62
4.5:	0.5x3mm su girişi kesitine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.	64
4.6:	0.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülatoörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları.	64
4.7:	Türbülatoör sayısı ve konumunun bölgesel olarak sıcaklık üzerine etkisi.	67
4.8:	Su soğutmalı seri bağlı 8 batarya paketi.	69
4.9:	Eşit debilerde su girişine sahip 1x3 mm kanal kesitine sahip soğutma plakalarının Türbülatoör sayısı ve konumuna göre hazırlanmış modellerin basınç ve sıcaklık dağılımları.	69
4.10:	Eşit debilerde su girişine sahip Soğutma plakalarının kanal derinliğine bağlı (0.5, 1, 1,5 mm) basınç ve sıcaklık dağılımları.	72
4.11:	Soğutma plakası modellerinin saat bazında enerji tüketimi.	74
4.12:	Soğutma plakası modellerinin bölgesel maksimum sıcaklık artışı.	74
4.13:	Batarya paketi-soğutma plakası dizilimi.	75
4.14:	Tasarlanan Batarya Paketinin Montaj Resmi.	75
4.15:	Tasarlanan batarya soğutma sisteminin prototipi.	76
4.16:	Tasarım ve modellemesi yapılan 30Ah li-ion batarya.	76
4.17:	2 seri bağlı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının kesit görünümleri.	77
4.18:	2 seri bağlı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının 3D görünümü.	77
4.19:	8 seri bağlı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının 3D görünümü.	78
5.1:	10A-30A-70A Deşarj Kapasitesi-Gerilim.	79
5.2:	70A Deşarj Kapasitesi-Sıcaklık (T1-T2-T3).	80
5.3:	10A-30A-70A Deşarj Kapasitesi-Sıcaklık (T1-T2-T3).	80
5.4:	10 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.	81
5.5:	30 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.	81

5.6:	70 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.	82
5.7:	25 °C’de 2.5V’a inmeden akım grafiği.	83
5.8:	25 °C’de 2.5V’a inmeden sıcaklık grafiği.	83
5.9:	25 °C’de 2.5V’a inmeden gerilim grafiği.	84
5.10:	Test sırasında hücrenin ısınmasının termal kamera ile görüntülenmesi.	84
5.11:	Gerilim / Akım Grafiği.	85
5.12:	Batarya ve Kapak Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.	85
5.13:	6-7 batarya Arası Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.	86
5.14:	2-3 Hücre Arası Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.	86
5.15:	1. Batarya ve Kapak Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.	86

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Bataryaların karakteristik özellikleri.	2
1.2: Soğutma uygulamaları için kullanılan alkan zincirlerinin karakteristik özellikleri.	12
2.1: Isı üretiminde etken olan voltaj-sıcaklık gradyentinin (dVoc)/dT farklı şarj yüzdeleri ve sıcaklık parametreleri altındaki sayısal değerleri.	24
3.1: Kanal sayısı parametresine bağlı simülasyon değerleri.	44
3.2: Isı transferini artırmak için modellenmiş kanal yapılarının geometrik ölçüleri.	52
3.3: Düz ve dalgalı kanal modellerinin sayısal analizleri.	58
4.1: 1.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.	61
4.2: 1x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.	63
4.3: 0.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.	65
4.4: Soğutma plakasının kanal içi dengelenmiş su giriş basınçları.	68
4.5: Tasarlanan modellerin kanal giriş basınçları ve maksimum yüzey sıcaklıkları.	73

1.GİRİŞ

Fosil yakıtların çevre kirliliğine yol açtığı, bu kirliliğin insan sağlığına çok zarar verdiğinin ve fosil yakıtların yanması sonucu oluşan atık gazların sera etkisi göstererek küresel ısınmaya sebep olduğunun 21. Yüzyılın başlarından itibaren farkındalığı artmış durumdadır. Bu etkileriyle beraber fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması gelecek zamanda bu yakıtlardan güç elde eden santrallerin veya sanayilerin işleyişinin durmasına sebep olacak ve bu da dünyamızı ciddi krizlere sürükleyecektir. Bununla beraber günden güne her açıdan gelişen ve ihtiyaçları artan dünyamızda fosil yakıtlara olan talep de küresel olarak hızla artmaktadır. Bu bağlamda British petroleum tarafından yapılan araştırma neticesinde BP Statistical Review of World Energy 2016 ve BP Energy Outlook 2016 başlıklı istatistiklerde, küresel dünyamızın ihtiyaç duyduğu fosil yakıt günde 1.9 milyon varil artmış olup bu artışın 3'te 2'si ulaşım sektörüne aittir [1], [2].

Atmosferi kirleten ve sera etkisi oluşturan gazları azaltmak için artık dikkatler geleneksel içten yanmalı motorlara sahip araçlardan daha çok enerji verimliliğine sahip ve çevre dostu elektrikli araçlara, hibrit araçlara ve plug-in hibrit araçlara yoğunlaşmıştır [3]. Anderson ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada elektrikli araçların kullanacağı enerji güneş veya rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanabilirse fosil yakıtlardan dolayı oluşan hava kirliliği yüzde 40 oranında azaltılabilir [4].

Çevre dostu elektrikli araçları geliştirme hedefinde anahtar rol oynayan durum ise bu araçların yüksek hızlarda seyrini, uzun mesafeler gidebilmesini ve hızlı ivmelenmesini sağlayacak uygun enerji depolama sistemleri tasarlamaktır. Bu sistemlerin depolama görevini üstlenecek şimdiye kadar kurşun asit, nikel bazlı, sodyum bazlı veya lityum-iyon bataryalar gibi çeşitli bataryalar sunuldu [5]. Bu bataryalar karakteristik özellikleriyle birlikte tablo 1.1'de gösterilmiştir. Bu tablodan, tüm bu elektrokimyasal sistemlerin arasında lityum-iyon bataryalar elektrikli ve hibrit araçlar için yüksek özgül enerjisi, yüksek özgül gücü, uzun ömürlülüğü ve kendi kendine düşük seviyede deşarj olması gibi özelliklerinden dolayı en uygun batarya çeşitidir. Bu sebeple lityum-iyon bataryalar günlük hayatta kendine yaygın bir yer edinmiş olup saatlerde, akıllı telefonlarda, laptoplarda ve daha birçok taşınabilir elektrikli cihazlarda kullanılmaktadır [6].

Tablo 1.1: Bataryaların karakteristik özellikleri.

Batarya Çeşidi	Özgül enerji (Wh/kg)	Özgül Güç (Wh/kg)	Nominal hücre voltajı (V)	Sayısal çevrim ömrü	Şarj süresi (saat)	Kendiliğinden deşarj olma yüzdesi
Lead-Acid	25~40	150~250	2	200~700	8	5
Nickel-Cadmium	45~80	200	1.2	500~2000	1	20
Nickel-Metal Hydride	60~120	200	1.2	500~1000	1	30
Nickel-iron	50	100	1.2	2000	/	20~40
Nickel-Zinc	70	150	1.7	300	/	20
Sodium-Sulphur	100	150~200	2	≪ 1000	8	1
Sodium metal chloride	100	150	2	≫ 1000	8	/
Lithium-ion	110~180	300	3.6	≫ 1000	2~3	10
Lithium-Polymer	100~130	300	3.6	300~500	2~4	10

Bununla birlikte; elektrikli araçlarda kullanılabilirliği açısından en uygun batarya çeşidi olan lityum-iyon bataryaların tüm ilgi çekici karakteristik özelliklerinin aksine halen tüketici açısından tam olarak benimsenmiş değildir. Tüketici açısından tam anlamıyla geniş kabul görülememesinde en büyük sebep bu bataryaların pahalı olması, kullanım ömrünün kısıtlı olması, tüketicinin güvenlik endişesi, ve sıcaklık artışı sebebiyle bataryadaki bozulmalardır [7]. Bataryaların ömrünü uzatmak ve daha yüksek özgül enerji ve özgül güce sahip bataryalar üretmek amacıyla daha iyi elektrot malzemeleri bulmak için aşırı çaba sarfedilmektedir. Bununla beraber, çeşitli koşullar altında batarya termal yönetim sistemi geliştirilmesi için yapılan termal konulu araştırmalarda, sıcaklık şartlarının bataryanın performansına, ömrüne ve güvenliğine ciddi etkisi olmasına rağmen bu konu yeterince ele alınmamıştır. Bu bataryaların kabul edilebilir çalışma sıcaklık aralığı -20'den 60°C'ye kadardır [8]. Ancak optimum performansını sürdürebilmesi için peseran ve arkadaşları biraz daha dar aralık olan 15°C ila 35°C arasında çalışmasını önermişlerdir [9]. Arzu edilen sıcaklığın dışına çıkılması bataryada muazzam kapasite kayıplarına neden olacaktır. Motloch ve arkadaşları 30°C ila 40°C arasındaki çalışma sıcaklığında her bir derece artış batarya ömrünü yaklaşık olarak 2 ay azalttığını gösterebilmişlerdir [10]. Buna ek olarak tek bir batarya hücresinde veya batarya paketinde, hem performans hem ömür açısından olumlu sonuçlar

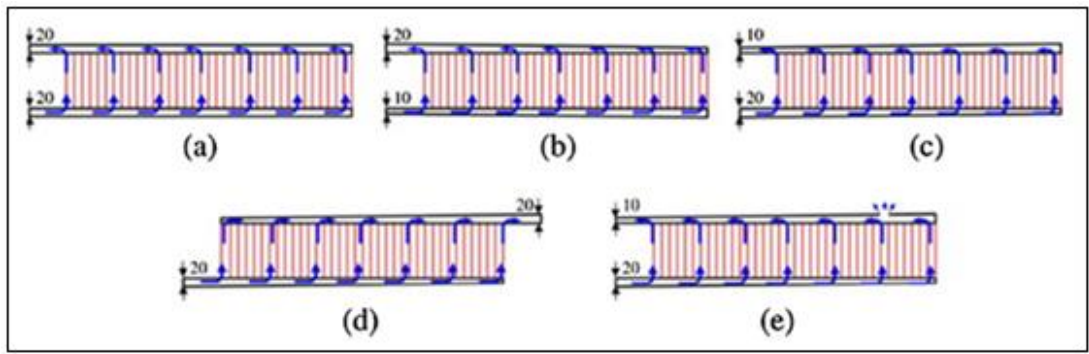
vereceğinden dolayı yerel olarak sıcaklık farkı 5°'den fazla olmaması istenilmektedir [11]. Bu veriler doğrultusunda bataryayı optimum sıcaklık aralığında tutmak için termal yönetim sistemi geliştirmek zorunlu hale gelmiştir.

Sıvı soğutmalı sistemlerde ayarlanabilir akışkan debisi ile bataryada oluşabilecek yüksek ısılar verimli şekilde çekilebilir. Su soğutmalı sistemler hava ile soğutma sistemlerine göre daha yüksek ısı kapasiteye sahiptir. Faz değişim metalleri ile soğutma yöntemine göre ise su soğutmalı sistemlerle bataryada oluşan sıcaklık artışına daha hızlı müdahale edilebilir. Faz değişim yöntemi sadece kısıtlı sıcaklık aralıklarında etkili olabilirken su ile soğutma yönteminde ise suyun donma sıcaklığının üstünde olmak koşuluyla böyle kısıtlamalar yoktur. Bu çalışma kapsamında 30 amper saat kapasiteye ve 3C kapasite oranına sahip bipolar prizmatik bir lityum-iyon batarya paketinin su soğutmalı termal yönetimi üzerine çalışılmıştır. Bu bataryaların hem matematiksel hesaplamalardan hem bilgisayar ortamında oluşturulan simülasyonlardan elde edilen ısı üretimi değerleri batarya test cihazında değişik koşullar altında testleri yapılarak doğrulanmıştır. Bataryada oluşabilecek maksimum ısı referans alınarak batarya sıcaklığının 40°C altında optimum seviyede tutulması için kanal tasarımları ile optimizasyon yapılmıştır. Literatürde batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) uygulamaları için hava ile soğutma, faz değişim materyalleri ile soğutma, sıvı ile soğutma sistemleri ve bunların kombinasyonları halinde sistemler denenmiştir.

1.1 Hava İle BTYS

En geleneksel yöntem olan hava ile soğutma sistemi üzerinde çok yoğun bir şekilde çalışılmış ve ticari uygulamalar olarak da benimsenmiştir. Örnek olarak Honda Insight ve Toyota Prius'a ait hibrit elektrikli araçlardaki bataryalar doğrudan klima ayarlı kabin havası ile soğutuldu [12]. Doğal ve zorlanmış konveksiyonel soğutma yöntemlerinin her ikisi de hava ile soğutma için kullanılabilirdi ancak konvektif ısı iletim katsayısı zorlanmış konveksiyonel hava ile soğutma yönteminde daha fazla olduğu için bu uygulamada zorlanmış konveksiyonel soğutma yöntemi geniş yer buldu. Doğal konveksiyonel soğutma yöntemi ise düşük enerji yoğunluklu bataryalarda etkili olabilir [13]. Mobil telefonlar düşük enerji yoğunluklu lityum-iyon bataryalara örnek gösterilebilir. Hava ile soğutma yöntemi sadelik, hafiflik, düşük maliyetli olması gibi farklı avantajları olmasına rağmen şimdilerde üzerinde çok çalışılmayan konudur [14]. Son dönemlerde hava ile aktif soğutmanın

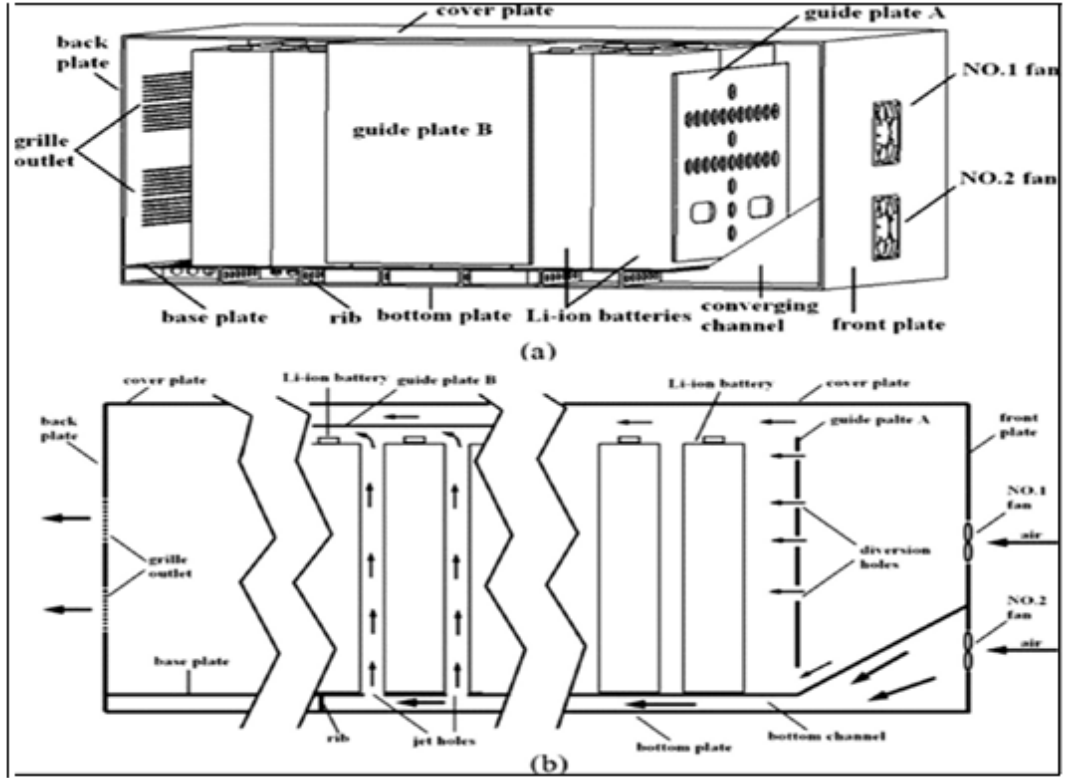
geliştirilmesi için sistemin geometrik yapısı, parametrik optimizasyon, termal model geliştirme gibi özel konular üzerinde çalışıldı. Park hava girişi ve hava çıkışı taraflarını konumlandırarak ve de manifold kesitini sabit tutup veya daraltarak ısı direnç karşılaştırmaları yaptı. Bataryanın maksimum sıcaklığı şekil 1.1’de e seçeneğinde gösterilen çıkış tarafına doğru daralan kesit kullanılmış geometrik yapıda en düşük çıkmıştır. Çıkış havası kanalında bir basınç tahliyesi uygulanması, maksimum sıcaklığı daha da azaltabilir ve sıcaklık bütünlüğünü arttırabilir. Ayrıca e seçeneğindeki çıkış tarafında oluşturulan tahliye hattı bataryadan salınabilecek tehlikeli gazlar için de kullanışlı ek bir tasarımdır [15].



Şekil 1.1: Hava ile üniform soğutma sağlanabilmesi için hazırlanmış 2 boyutlu manifold tasarımları.

Bu çalışmanın sonuçları Sun ve Dixon’un çalışmasında değerlendirilmiş olup ayrıca çalışmalarında batarya paketinin 3 boyutlu termal modelini oluşturup simülasyonlarını elde etmişlerdir. Sonuçları göstermiştir ki; manifold kesitini çıkış tarafına doğru daraltmak, çıkış tarafında tahliye hattı açmak ve soğutma plakaları arasında oluşan dalgalanmalar batarya sıcaklığını önemli derece düşürmüş ve üniform bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır [16]. Mohammadian ve Zhang hava akışı kanallarına şekil 1.2’de gösterilen çeşitli ölçülerde pinler yerleştirerek hava soğutmalı sistemler için özel tasarımlar sunmuşlardır. Daha düşük ve daha üniform sıcaklık dağılımı elde etmişlerdir [17]. Daha sonra yine bataryanın termal performansını daha da iyileştirmek için hava akışını sağlayan kanallara şekil 1.3’te gösterilen gözenekli alüminyum metal köpük yerleştirip sonuçları irdelemişlerdir[18,19]. Bu gözenekli yapılar 1. Durumda hiç kullanılmamış, 2.durumda 4’te 1 oranında, 3.durumda 4’te 3 oranında ve 4.durumda ise tam kanal boyutunda kullanılmıştır. Farklı dizayn durumları, kanallardaki pinlerin düzenlemeleri, batarya deşarj oranları, giriş havası

numaralı fan aşağı taraftan yol izlemektedir. 2 numaralı fandan gönderilen hava uç bölgelerdeki yakın bölgelere göre soğutulması daha zor olan bataryalara ulaştığı zaman dikey boşluklardan yukarı doğru yönlenecektir. Bu tasarım sonucunda bataryaların maksimum sıcaklıkları 33.1°C ile 42.3°C arasında olup yerel sıcaklık farkları 5°C ile 10°C arasındadır. Böylelikle diğer tasarımlara göre ciddi derecede daha üniform sıcaklık dağılımı elde edildi [20].



Şekil 1.4: Batarya paketi boyunca sıcaklık farkını azaltmak için kurgulanmış 2 fanlı, 2 ayırık kanallı soğutma bloğu tasarımı.

1.2 Sıvı İle BTYS

Doğal veya zorlamalı hava soğutmasına kıyasla, sıvı soğutucu, soğutma ortamı olarak daha cazip bir seçenek haline getiren özelliği daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Sıvı soğutma sistemleri doğrudan soğutma ve dolaylı soğutma olarak sınıflandırılabilir. Doğrudan sıvı soğutma, batarya modülünü doğrudan mineral yağları gibi dielektrik soğutucunun içine daldırmaktır; dolaylı soğutma ise, bataryanın temas ettirildiği bir plakanın içerisinden geçirilen akışkan sayesinde gerçekleştirilen soğutmadır [21]. Isı, soğutma sıvısı tarafından alınmadan önce plakaların içinden geçmesi gerektiğinden, dolaylı soğutmanın termal direnci

kaçınılmaz daha fazladır. Tersine, doğrudan sıvı soğutmadaki ısı transfer işlemi, soğutucu ve piller arasındaki doğrudan temastan dolayı daha verimlidir. Bununla birlikte, mineral yağ gibi dielektrik akışkanların yüksek viskozitesi, yüksek zorlamalı akış hızına ihtiyaç duyulduğunda fazla güç tüketimine yol açar. Su gibi düşük viskoziteli sıvılar kullanabilen dolaylı soğutma uygulaması bu açıdan daha pratiktir. Chen ve arkadaşları, dört soğutma stratejisinin termal performansını, yani zorlamalı hava soğutma, kanatla destekli doğal soğutma, dolaylı sıvı soğutma ve doğrudan sıvı soğutmaya karşılaştırmıştır [22]. Hava soğutma yönteminin en yüksek parazitik güç maliyetini, daha doğru olarak, diğerlerinden 2–3 kat daha fazla gerektirdiği bildirilmiştir. Ek olarak, dolaylı sıvı soğutma, taşıt uygulamalarında doğrudan soğutmadan daha iyi bir seçenek olarak bulunmuştur. Bu nedenle, dolaylı sıvı soğutma daha pratik olduğundan, doğrudan sıvı soğutma nadiren incelenir. Lan ve arkadaşları prizmatik hücrelerin etrafından dolanan ayrı alüminyum düz tüplerle yeni bir tasarım ortaya koydu [23]. Her bir boru, ısı transfer veriminin iyileştirilmesi için su akışının geçmesi için bir dizi minikanal ihtiva etmiştir. Sonuçlar, hem maksimum sıcaklık hem de sıcaklık farkının, sadece birkaç parazit güç tüketimi ile iyi kontrol edildiğini gösterdi. Mini kanallar kullanılmasına ek olarak, Zhang ve arkadaşları alüminyum tüpü prizmatik hücrelerin etrafına sargılı düzenlemeyle sardı. Daha da önemlisi, hücre duvarı ve tüpler arasında yüksek termal iletkenliğe sahip bir esnek grafit levhası yerleştirdiler. Esnek grafitin eklenmesi, düz tüplere zayıf temas eden yerlerde bile ısıyı hücre yüzeyinden hızla uzaklaştırır. Sonuç olarak, sıcaklık parametresi önemli ölçüde geliştirilmiştir. Esnek grafit kullanılarak maksimum sıcaklık farkı 7°C'den 2°C'ye düşmüştür [24]. Sıklıkla benimsenen bir başka düşünce ise, Li-iyon hücrelerini, su gibi sıvı soğutucu ihtiva eden mini kanalların içinde dolaştığı soğuk plakalar ile temas halinde tutmaktır. Prizmatik bipolar Li-ion batarya paketi için su soğutmalı termal yönetim sistemi Tong ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. İki soğutma plakası arasında konulmuş batarya ve sıralı olarak bunlardan bir dizi halindeki modeli araştırmışlardır. Soğutucu akış hızını veya plaka çeper kalınlığını artırarak, daha yüksek bir pompalama gücü pahasına ortalama sıcaklık değerini ve sıcaklığın üniform yapısını iyileştirmeye çalışmışlardır [25]. Elektrikli araçlardaki gerekli voltaj değerine ulaşmak için soğutma plakası ve batarya ile oluşturulan paketteki yığın sayısını yükseltmek, daha kötü bir termal performansa neden olacaktır. Soğutma sıvısı akacağı kanal geometrisinin, bataryanın termal sistemine büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmek gerekir. Bu nedenle, mikro

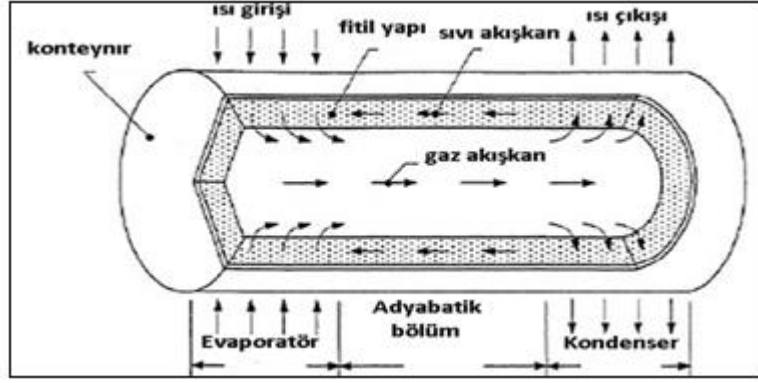
kanal yapının optimizasyonuna son yıllarda odaklanılmıştır. Huo ve arkadaşları düz mikro kanallı bir alüminyum plakanın batarya termal sistemine etkisini analiz etti. Soğutma suyu kanallarının sayısı, akış yönü, giriş sıvı su hızı ve ortam sıcaklığının 5 C deşarj hızında parametrik analizi yapılmıştır [26]. İki kutuplu bataryalarda optimum akış yönü bir elektrot tarafından diğer elektrot tarafına doğrudur. Ayrıca kanal sayısı veya sıvı debisi ne kadar fazla olursa batarya sıcaklığı da o denli düşük kalmıştır. Çalışmalarında minimum sıvı debisi 5×10^{-4} kg/s referans tutularak farklı debiler de analizler yapmışlardır. Qian ve arkadaşları sadece bir sıvı giriş portu kullanarak düz bir tasarım geliştirdi [27]. Su giriş portundan içeri yönelerek kanallara ayrılır ve bu kanallar da mikro kanallara ayrılır. Yaptıkları tasarımlarda merkeze yakın kanallarda sıvı debilerinin yüksek olduğunu göstermişler ve bu durum da elektrota yakın bölgelerde oluşan fazla ısıyı güçlü bir şekilde taşıyarak üniform bir sıcaklık dağılımına yardımcı bir etken olacaktır. Önerilen sistem sadece iki mini kanal kullanılmasına rağmen farklı deşarj sürelerinde test edilmesi durumunda bile batarya sıcaklığı 40°C'yi geçmediği şartlarda kontrol edilebilir bir sistemdir. Jin ve arkadaşları, sınır tabakasını bozmak ve böylece ısı transferi katsayısını arttırmak için düzenli düz kanal duvarları boyunca eğik kesimler ekleyerek yeni bir U-şekilli soğuk plaka tasarımı sundu. Deneysel sonuçlar, önerilen parçalanmış mini kanal yapısının soğutma performansının, geleneksel düz mini kanallı soğuk levhaya kıyasla önemli ölçüde arttığını göstermiştir [28]. Jarrett ve Kim, bir kıvrımlı kanallara sahip soğutma plakası tasarımının geometrik optimizasyonunu, bir matematik algoritması kullanarak kanal genişliğini ve yerini ayarlayarak ele almıştır [29]. Kanal geometrisi ve sistem tasarımlarının ilerlemesi dışında, kullanılan suyun termal özelliklerin geliştirilmesi de araştırılmıştır. Huo ve Zhao tarafından soğutucunun kullanılması için suya bir miktar Al₂O₃ nanopartikülleri eklenmiştir [30]. Simülasyon sonuçları ısı transferini saf suya göre yüzde 7 kadar artırdığını göstermiştir.

1.3 (Sıvı-Gaz) Faz Değişim Materyalleri ile BTYS

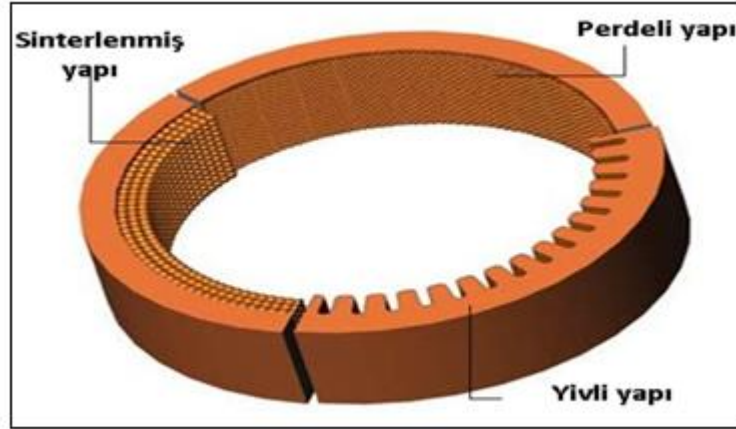
Son yıllarda üzerinde daha çok çalışılan bir diğer yöntem faz değişim materyalleri yardımıyla bataryanın sıcaklığını dengelemektir. Faz değişimi sırasında katı halden sıvı hale geçişte ya da sıvı halden gaz hale geçişte büyük miktarda enerji depolanır. Bu durum bataryada oluşan ısıyı çekmek için ideal yöntem olabilirdi. Bu yöntemde ilk olarak sıvı halden gaz hale geçiş durumundaki faz değişim sürecini

hem kaynama hem de ısı nakil boruları ile bataryadan nasıl ısı çekildiği üzerinde yoğunlaşıldı. Faz değişim süreciyle termal yönetim aslında pasif soğutma yöntemidir. Bandhauer ve Garimella ilk olarak sıvı haldeki bu maddeleri özgün olarak mikrokanallarda denenmesi üzerinde çalışmıştır [31]. Bataryada oluşan ısı mikrokanal buharlaştırıcılarıyla taşındı. Mikrokanal buharlaştırıcılar bu çalışmada R134a akışkanını buhar fazına döndürmek için akım kollektörlerine entegre edildi. Oluşan buhar ise yoğuşma işlemi için kondensere yükselerek bir termodinamik çevrim oluşturuldu. Daha sonra Van Gils ve arkadaşları yalıtkan ve soğutma kabiliyeti yüksek bir madde olan Novec7000 sıvısının içerisine batarya yerleştirmiş ve testlerini yapmışlardır [32]. Hirano ve arkadaşları prizmatik lityum iyon piller için doğrudan kaynatma ile soğutma sistemi geliştirdi. Onların deneylerinde, Li-iyon hücreleri ile gözenekli materyaller, mikro fiberler veya plastikler içinden geçirilecek hidrofloreter sıvısı ve buhar sıvısı için sıkıştırıldı [33]. Sonuçlar ise arzu edilen 20 C şarj/deşarj durumunda çalışma halinde bile batarya çalışma sıcaklığını yaklaşık olarak 35°C civarında muhafaza edebilmiştir. Gözenekli malzemeler kullanmak yerine, An ve arkadaşları son zamanlarda bir pil modülünü soğutmak için mini kanallarda akışı kaynatma işleminden faydalandı. Aynı zamanda, kaynama sıcaklığı faz değişim sıvısı olarak 34°C olan hidrofloreter seçtiler. Batarya sıcaklığı, sıvı kaynama prosesi ile ısı taşınımı sayesinde 4 ° C'nin altında yerel sıcaklık farkı ile 40 ° C civarında tutulmuştur [34].

Yine faz değişim yöntemi ile soğutmada kullanılan ısı borusu Şekil 1.5 'te görülebileceği gibi, tipik bir kılcal ısı borusu iki bileşenden, yani çalışma sıvısından ve iç yüzeyde fitil yapıları bir kaptan oluşur. Isı borularında benimsenen fitil yapıları, sinterlenmiş metal tozu, elek, oluklu veya ağ tasarımı olabilir [35]. Isı pompasında kullanılan bazı fitil yapıları şekil 1.6'da gösterilmiştir. Bir ısı borusu: evaporatör bölümü, adyabatik bölüm ve kondenser bölümü olarak üç bölgeye ayrılabilir. Çalışma prensibi ise ısı akışı öncelikle çalışma akışkanını buhar fazına dönüştürmek için konteynirden buharlaştırıcıya taşınır. Daha sonra buhar, soğutulma işleminin gerçekleşeceği kondansatöre kendiliğinden geçer ve borudaki basınç farkından dolayı içerisinde depoladığı ısıyı serbest bırakır. Buhar daha sonra tekrar kılcal kuvvetin etkisi altında fitil yapısının içinden buharlaştırıcı bölümüne geri hareket eden sıvı duruma dönüştürülür. Hafif, düşük maliyetli, bakım gerektirmeyen, esneklik ve özellikle yüksek termal iletkenlik dahil olmak üzere bu avantajlarıyla ısı borusu sistemi soğutma uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahiptir.



Şekil 1.5: Isı borusunun yapısı.



Şekil 1.6: Isı borusunda kullanılan fitil yapılar.

Isı boruları elektronikte, uzay aracında, güneş enerjisi kollektörlerinde ve nükleer santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ısı borusu bazlı termal yönetim sistemi tam olarak araştırılmamıştır. Rao ve arkadaşları elektrikli araçlarda batarya termal yönetimi için ısı borusunun kullanımının fizibilitesini deneysel olarak araştırmışlardır [36]. Bu çalışmalarında iki adet batarya tipi prizmatik ısıtıcı arasına dört adet bakır ısı borusu konulmuş ve kondenser bölümü su banyosu ile soğutulmuştur. Batarya ısısının 50 W'dan fazla olmaması durumunda, verilen sistem için batarya sıcaklığının 50°C'nin altında tutulabileceği bulunmuştur. Bu uygulamalarında maksimum 30 W ısı üretimi için bataryadaki sıcaklık farkını 5°C'nin altında tutabilmişlerdir. Isı pompalarında kilit rollere sahip biri olarak, çalışma sıvısı seçeneği, ısı borularının soğutma etkisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Putra ve arkadaşları tarafından farklı çalışma sıvıları, yani damıtılmış su, alkol ve aseton kullanıldı ve deneysel olarak karşılaştırıldı [37]. Düz plakaya sahip çevrimli ısı borusunu kullanan bir sistem için sonuçlar şöyleydi. Çalışma sıvısı olarak asetonun kullanılmasının, giriş ısısı yükünün 1,61 W cm⁻² olması durumunda

diğer seçeneklerden daha iyi termal performans elde ettiğini gösterdi. Burban ve arkadaşları farklı giriş ısı güçlerinde (25-550 W) aseton, metanol, su ve n-pentan performansını test etmiştir [38]. Düşük ısı üretim oranı ve düşük ortam için aseton ve npentan önerdiler. Su ve metanol farklı koşullar altında örneğin yüksek termal güç yükü veya yüksek ortam sıcaklığı gibi durumlarda daha iyi seçimlerdir. Çalışma sıvısının yanında kondenser bölümünün çıkış tarafı da termal performansı etkileyen bir diğer önemli faktördür. Zhao ve arkadaşları kondenser bölgesine su püskürterek diğer kondenser soğutma yöntemleriyle karşılaştırdı [39]. Su püskürtmeli yöntemin, termostat tipi soğutma ile zorlanmış hava püskürtmeli yöntemden daha iyi sonuçlar verdiğini gösterebilmişlerdir. Böylece kondenser bölümünü ıslak soğutmanın diğer stratejilerden üstün olduğunu kanıtlamışlardır. Ye ve arkadaşları ısı transfer katsayısını daha da artırmak için soğutma kanatçıkları yerleştirmiş ve soğutma yüzeylerine lehimlemişlerdir [40]. Batarya sıcaklığı en uygun 25–40°C aralığında tutulmuş ve çalışmalarında su ve metanolün ısı borusu uygulamaları için uygun çalışma sıvıları olduğu etanolün ise uygun çalışma sıvısı olmadığı bulunmuştur.

1.4 (Katı-Sıvı) Faz Değişim Materyalleri ile BTYS

Sıvı-buharlı soğutma sisteminden ayrı olarak, katı halden sıvı haline faz değişim süreci de bir termal yönetim stratejisi olarak benimsenmiştir. Maddenin buharlaşma sürecinde sıcaklığının sabit kalmasından dolayı geliştirilen faz değişim materyalleri bir önceki bölümde ısı tahliye borularında kullanılmış ve bu yöntem pasif soğutma olarak birçok araştırmacı tarafından adlandırılmaktadır. Pasif bir soğutma yöntemi olarak, faz değişim materyalleri ile termal yönetim sistemleri, basitlik, hafiflik, yüksek verimlilik ve fan gibi ekstra bileşenlere gerek olmaksızın birçok istenilen özelliğe sahiptir. Sıvı-buhar sistemleri ile karşılaştırıldığında, katı-sıvı faz değişim sistemleri daha kompakt ve pratiktir, bu da araç uygulamalarında daha çekici hale getirir. Bu nedenle, bu soğutma yöntemi son dönemlerde daha kapsamlı biçimde dikkat çekmiştir. Açıkçası, bu sistemi oluşturmanın ilk adımı bir faz değişim maddesi seçmektir. Rao ve Wang aşağıdaki gibi termal yönetim için uygun bir malzeme seçmek için altı farklı gereksinimleri listeledi [41].

- İstenilen sıcaklık kapsamındaki erime noktası;
- Yüksek gizli ısı, özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenlik;

- Faz değişim işleminden sonra düşük hacimli genleşme;
- Donma sırasında ihmal edilebilir alt soğutma etkisi;
- Stabil olmayan, toksik olmayan, yanmaz ve patlayıcı içermeyen özellikler;
- Ticari olarak ekonomik

Faz değişim noktasından önce ısı, katı FDM tarafından iletim ile ısı transferi yoluyla taşınır. Sıcaklık geçiş noktasına ulaştığında, FDM erimeye başlar ve tüm bu süreç içerisinde bataryada oluşan ısıyı çeker. Bu nedenle, faz değişim sıcaklığı önemli faktörlerden biridir. Yan ve arkadaşları sayısal olarak bir ısı iletme plakası ve bir yalıtım panelinden oluşan bir kompozit levha bazlı FDM kullanarak termal durumlarını araştırmıştır [42]. Lityum-iyon pillerin termal yönetimi için istenen faz geçiş sıcaklık aralığının 30–50°C olduğu bildirilmiştir. Ayrıca sonuçlar, önerilen Batarya termal yönetim sistemi 'nin iyi termal performansa ve zor koşullar altında ısının yayılmasını önleme yeteneğine sahip olduğunu ima etmiştir. Parafin mumu, korozyon etkisinin olmaması, düşük maliyet ve büyük miktarlarda kullanılabilirliği nedeniyle batarya termal yönetimi için en yaygın kullanılan FDM'dir. Ayrıca daha farklı koşullardaki soğutma uygulamaları için tablo1.2'de gösterilen alkan zincirleri kullanılmaktadır. Farklı parafinlerin karıştırılmasıyla daha geniş bir faz değişimi sıcaklık aralığı ve daha yüksek bir ısı depolama kapasitesi elde edilebileceği bildirilmiştir [43]. Böylece, parafin karışımları da batarya termal yönetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

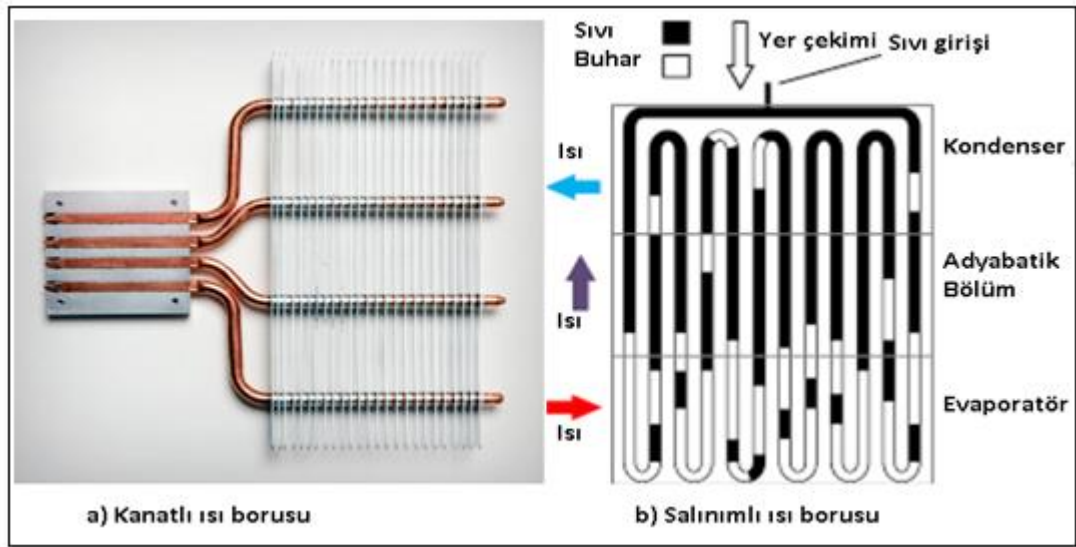
Tablo 1.2: Soğutma uygulamaları için kullanılan alkan zincirlerinin karakteristik özellikleri.

Madde	Erime noktası°C	Gizli ısı kj/kg	Isı iletim katsayısı w/m.K	Yoğunluk Katı- Sıvı kg/m ³	Özgül ısı kj/kgK
Hexadecane	18	236	0.21	770	2.2
Heptadecane	22	213	0.21	778	2.2
Oktadecane	28	244	0.21	814-774	1.9
Nanodecane	32	222	0.21	782	1.91
Eicosane	37	246	0.21	778	1.92
Docosane	44	249	0.21	791	1.93
Tricosane	48	232	0.21	764	1.93
Tetracosane	51	255	0.21	796	1.93

Bahsedilen avantajlarına rağmen FDM'lerin en büyük dezavantajlarından birisi de ısı iletim katsayılarının yetersiz oluşudur. Tablo 1.2'de görüldüğü gibi ideal ısı iletim katsayısı olan $0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ değerinden daha düşüklere düşmektedir. Isı iletim katsayılarının düşük oluşu ani ısı değişikliklerine cevap verememelerine sebep olduğundan dolayı FDM'lerin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu problemi çözmek için son yıllarda genel ısıl iletkenliği geliştirmek için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bunlardan ilki karbon fiberler, grafen, nanopartiküller ve karbon nanotüpler gibi termal olarak daha iletken dolgu maddelerinin FDM'lere süspanse edilmesi; ikincisi FDM'leri poliüretan köpük, metal köpükler ve genişletilmiş grafit dahil olmak üzere gözenekli ortamlara gömmek; üçüncüsü ise bu malzemeleri metal ağ yapılarıyla , grafit tabaka veya soğutma kanatçıklarıyla güçlendirmektir [44].

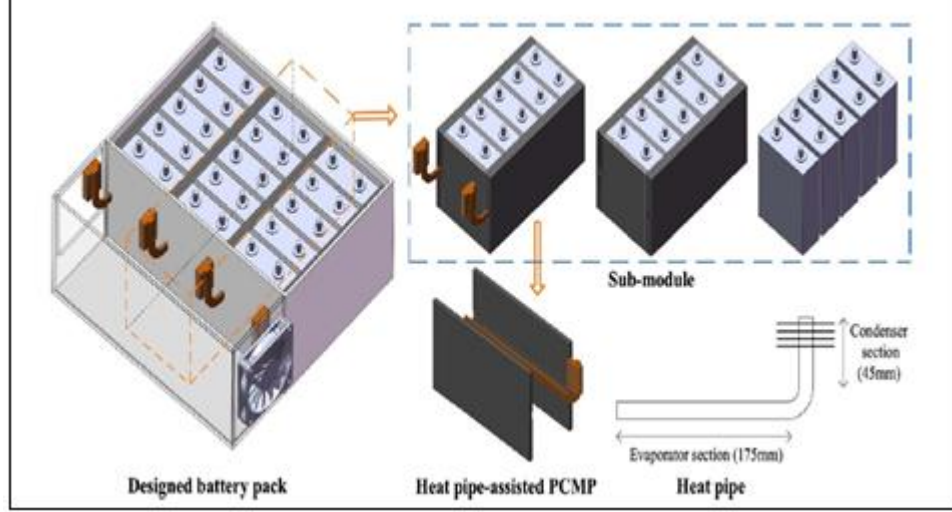
Dikkat edilmesi gereken diğer bir potansiyel sorun, FDM'lerin tamamen eridikten sonra ortaya çıkan sonuçtur. Yukarıda belirtildiği gibi, faz değişimi ile soğutma yöntemleri, ısıyı absorbe etmek için faz değişim prosesi sırasında gizli ısının avantajlarından yararlanır. Li-ion pillerin ısı yükleri, FDM'nin emilen ısıyı zamanında dağıtması için çok yüksekse, FDM'lerde enerji birikecektir. Tüm katı FDM'ler sıvı haline dönüştüğünde, hücreler ve çevre ortamı arasında daha yüksek bir termal direnç meydana gelebilir. Bu durumda soğutma performansı direkt hava soğutmasından daha da kötü olacaktır. Bu nedenle, FDM'leri katılaştırmak ve gizli ısını geri kazanmak için FDM sistemlerine her zaman cebri hava soğutma ve sıvı soğutma gibi diğer soğutma teknikleri dahil edilir. Ling ve arkadaşları Lityum-iyon batarya paketi için bir FDM termal yönetim sisteminin soğutma etkisini iyileştirmek için cebri hava yöntemini tanıttı [45]. FDM sistemindeki güvenlik ve güvenilirliği güçlendiren cebri hava soğutma uygulamasının yanında doğal hava konveksiyonunun FDM'de biriken ısıyı gidermek için yeterli olmadığı bildirilmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçlar, hava hızı değişiminin batarya sıcaklık dağılımı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir, bu da cebri hava akışının işlevinin sadece FDM'nin gizli ısını geri kazandırdığı anlamına gelir. FDM sistemini cebri sıvı soğutma sistemi ile entegre eden hibrit termal yönetim sistemi, Hémerly ve arkadaşları tarafından araştırılmış olup Lityum-iyon hücreler ve FDM alüminyum bir kutu içine yerleştirilir [46]. Bu kutular FDM'yi katılaştırmak için içinde dolaşan soğutucu akışkan bulunan sıvı soğutma plakaları ile temas halindedir. Daha sonra Rao ve arkadaşları prizmatik pillerin termal yönetimi için FDM'yi

minikanallar ile birleştirdi ve önerilen sistemin performansını sayısal olarak araştırdı. Birleřmiř FDM-minikanal uygulaması için maksimum 320.6 K'lık bir sıcaklık tahmin edildi, maksimum sıcaklık ise saf FDM sistemi için 335.4 K olup yaklaşık 14.8°C iyileştirme sağlanmıştır. Sıvı kütle akış hızı ve kanal sayılarının her ikisinin de soğutma etkileri üzerinde etkileri olmuştur [47]. Ek olarak, FDM sistemlerini ısı boruları ile birleştirmenin fizibilitesi şekil 1.7'de gösterilen kanatlı ısı borusu [48] ve salınımlı ısı boruları [49], [50] dahil olmak üzere deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. FDM-kanatlı ısı borusu ortaklığında sıcaklık farkı, saf FDM sistemininkinden % 28.9 daha dūřüktü.



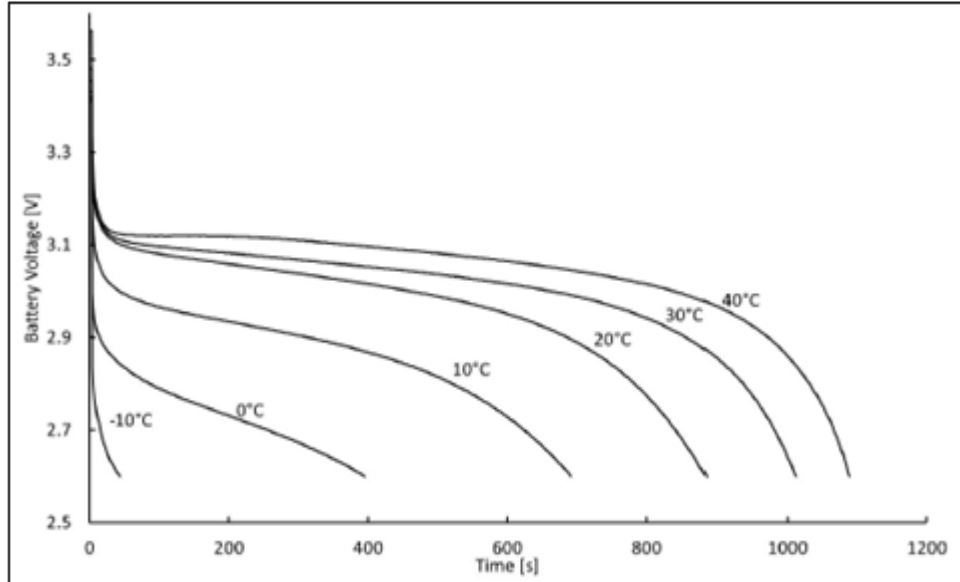
şekil 1.7: Kanatlı ısı borusu ve salınımlı ısı borusu.

Sistemin 50°C'den daha az tutulması için gereken süre, ısı borusunun dairesel kanatlarla entegrasyonu nedeniyle daha uzun tutulabilmēřtir. Daha yakın zamanlarda Wu ve arkadaşları ayrıca, batarya paketini ısı borusuyla birleştirerek FDM'nin termal performansını analiz etti [50]. Isı boruları, şekil 1.7'8e gösterildiği gibi Li-iyon hücreleri arasına yerleştirilen FDM plakaları ile sıkıştırılmıştır. Hücre sıcaklığı, 5 C deşarj oranında bile 50°C'nin altında tutulabildiğini göstermişlerdir. Salınımlı ısı borusu destekli FDM sistemleri ile ilgili olarak, FDM'nin ısı akısına tepki süresi önemli ölçüde azalmıştır.



Şekil 1.8: Fan destekli bir ısı borusunun batarya paketinde kullanımı.

Anlatılan bu soğutma sistemlerinde bataryanın belirli sıcaklık aralığında tutulması hedeflenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi sıcaklık batarya performansını ciddi derecede etkilemektedir. Kaiwei Chen yaptığı tez çalışmasında 20 amper-saat LiFePO₄ tabanlı prizmatik bir lityum-iyon bataryayı 3C (60 amper) deşarj akımı altında farklı sıcaklık aralıklarında performans testi yapmıştır. Elde edilen sonuçların grafiği şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9: 20 ah LiFePO₄ prizmatik Li-iyon bataryanın 3C deşarj akımında sıcaklık-performans ilişkisi.

Bu grafiğe göre 30°C civarında optimum performans gösteren batarya -10°C altında %95 kapasite kaybına uğradığı görülmektedir. Her bir 10 derecelik etkinin

hissedilir bir oranda kapasiteyi etkilediği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra 2°C kadar düşük bir azalma bile bataryada yaklaşık %2.3 kadar kapasite kaybına sebep olmaktadır [61].

2. LİTYUM-İYON BATARYALAR

Son yüzyılın enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtların yanında güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretilmiştir. Ancak üretilen enerjinin sonradan kullanılabilmesi için enerji depolama araçlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda elektrokimyasal olarak elektrik enerjisini depolayan ve bu depolanan enerjinin verimli şekilde kullanıldığı bataryalar geliştirilmiştir. Elektrik enerjisini depolama ve ihtiyaç dahilinde kullanılması bataryanın ihtiva ettiği elektron ve iyonlar sayesinde olmuştur. Voltaik pil olarak bilinen ilk batarya Volta tarafından 1800 yılında keşfedilmiştir. Bu voltaik pil tuz çözeltisiyle nemlendirilmiş karton levhalar ile ayrılan bir dizi bakır ve çinko diskten oluşur. 200 yılı aşkın süredir geliştirilen batarya teknolojisi artık fazla ısı kayıpları olmaksızın güvenli bir şekilde elektriğin taşınabildiği bir dönemindedir. Lityum-iyon bataryalar bu teknoloji içerisinde yüksek özgül enerjiye ve yüksek özgül güce sahip olması, uzun ömürlü oluşu, diğer bataryalara göre daha hızlı şarj olması, kendi kendine çok daha yavaş deşarj olması ve hafıza etkisinin olmayışı gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1 Li-İyon Bataryaların Yapısı

Bir lityum iyon hücresi tipik olarak pozitif elektrot, negatif elektrot, elektrolit, ayırıcı, akım kollektörü ve bir kılıftan oluşur. Elektrotlar, batarya kapasitesini ve enerji yoğunluğunu belirleyen bileşenleridir. Çeşitli pozitif elektrot malzemeleri geliştirilmiştir ve bu malzemeler yapılarına göre katmanlı yapı, spinel yapı ve olivin yapısı olarak üç tipe ayrılabilir [51]. LiCoO_2 , LiNiO_2 katmanlı yapıdaki; LiMn_2O_4 spinel yapıdaki; LiFePO_4 , LiMnPO_4 olivin yapıdaki lityum iyon batarya bileşiklerine örnek verilebilir. Bu malzemeler arasında ilk Li-ion pil pazarlanmasından beri LiCoO_2 en yaygın tercih olmuştur [52]. Yüksek kapasite değeri ve üretim süreci yaygın kullanılmasında etkili olmuştur. Ancak yüksek maliyetli oluşu, zehirli içerik limitleri, zayıf termal dengesi sebebiyle LiCoO_2 popülerliğini yitirmiş ve ibreler LiFePO_4 bileşenine çevrilmiştir. LiFePO_4 etkin kapasiteye sahip ve termal tahriklere karşı dirençli bir bileşendir. Pozitif elektrotların aksine, negatif elektrotlar genellikle kok, grafit ve Mesocarbon Microbeads dahil olmak üzere karbonlu bileşiklerden yapılır.

Ticari olarak en popüler olanı grafit tabanlı karbon olan $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ negatif elektrot malzemesi olarak uygulamaya konmuştur, ancak elektrolit ile olası istenilmeyen reaksiyon problemiyle karşılaşmaktadır [53]. Araştırmacılar batarya performansını geliştirebilmek için çok yoğun bir şekilde yeni malzemeler araştırmaktadırlar. Grafit karbon yerine silikon kullanmak araştırmacıların ilgisini çekmiştir [54]. Lityum iyon bataryaların bir parçası olan elektrolit sıvısı, içerisinde LiPF_6 gibi lityum ihtiva eden ve su içermeyen tuzların etilen karbonat, propilen karbonat, dietil karbonat veya etil metil karbonat gibi organik sıvı karışımlarının içerisinde çözülmüş bir yapıdır. Seperatör ise bataryanın kısa devresini önlemek amacıyla pozitif ve negatif elektrotları birbirinden ayırır [55]. Lityum iyonları seperatör içerisinden hiçbir engel olmaksızın geçebilirken, elektronların bu yapı tarafından geçmesi engellenir. Elektriksel yalıtımı sağlayan seperatör bu sayede elektronların iki kutup başları arasında oluşturulan normal rotasında hareket etmesini sağlayacaktır. Üstelik bataryada sıcaklık aşırı yükseldiğinde seperatör açıklıkları kapanarak termal kaçakları önleyen bir sigorta görevi görür [56]. Akım kollektörlerinin görevi ise bataryada oluşan akımı bünyesinde toplamaktır. Pozitif akım kollektörü bakır malzemedden negatif akım kollektörü ise alüminyum malzemedden üretilir. Bataryaların dış kısmı ise hücre içerisini termofiziksel ve mekanik olarak sağlam bir şekilde koruyabilmesi için çelik veya alüminyum malzemedden üretilir. Elektrikli araçlarda, Li-iyon hücrelerinin anot-separatör-katot tabakasının sarılması ve istiflenmesiyle iki normal konfigürasyonu silindirik şekil ve prizmatik şekildir. Şekil 2.1 de çeşitli ölçülerde prizmatik ve silindirik lityum-iyon bataryalar gösterilmiştir.

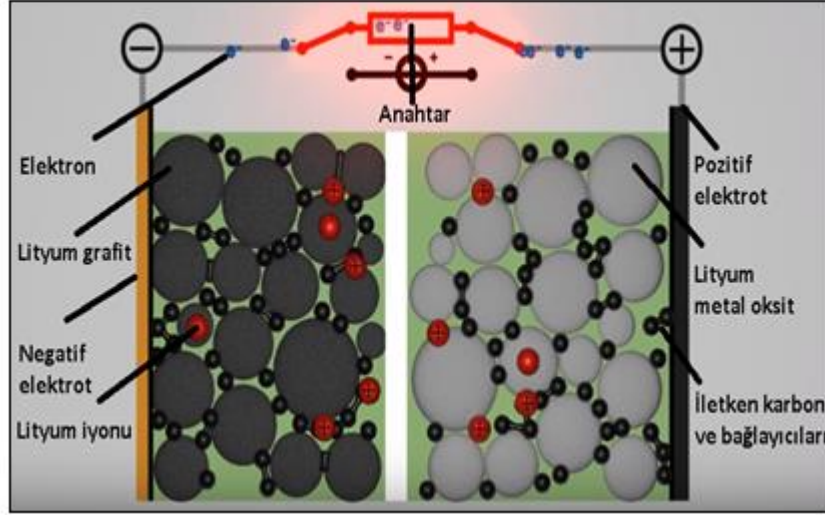


Şekil 2.1: Lityum iyon bataryaların bazı tasarımları (prizmatik-silindir).

Prizmatik tasarım, alan kullanımını iyileştirir ve esnekliği artırırken silindirik hücreler, düşük alan verimliliği pahasına olsa bile, üretim kolaylığından dolayı daha ekonomik ve üretilmesi kolaydır [57]. Otomotiv üreticileri, özel taleplerine göre farklı pil şekilleri seçecekler. Dahası, pratik uygulamalarda, tek bir hücre, araç kullanımı için yeterli enerji ve güç sağlamak için yeterli değildir. Bu nedenle, çok sayıda hücre, batarya modüllerini oluşturmak için seri olarak veya paralel olarak bağlanır ve daha sonra, modüllerin miktarları, bir batarya paketini oluşturmak için elektrik kablolarıyla bağlanır.

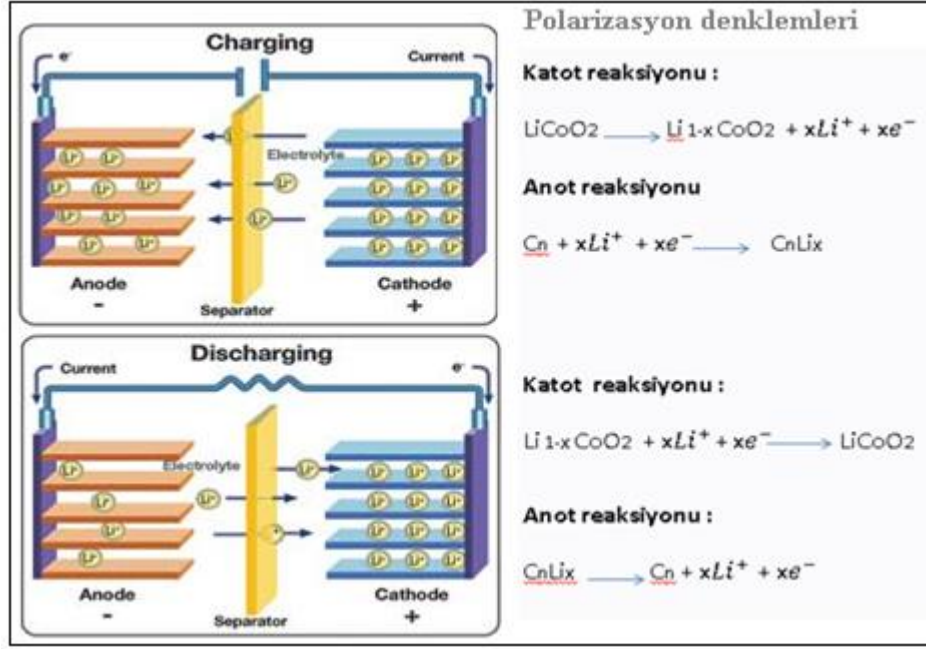
2.2 Lityum-İyon Bataryaların Çalışma Prensibi

Pozitif ve negatif elektrotlar elektron yükü bakımından bir potansiyel farka sahiptir. Seperatör tarafından ayrılan Lityum metal oksit ve lityum grafit bileşikleri içerisinde ihtiva ettiği lityum bileşenleri sayesinde tersinir olarak elektron alışverişinde bulunabilen yapılardır. Şekil 2.2’de lityum-iyon batarya içeriği temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Lityum-iyon bataryanın yapısı

Lityum-iyon bataryalar şarj edilmeye başlandığında lityum metal oksit bileşiği parçalanarak serbest elektron ve serbest lityum iyonları açığa çıkar. Açığa çıkan bu elektronlar potansiyel fark sebebiyle pozitif elektrottan negatif elektroda doğru hareket ederek akım oluşturur. Fazlaşan lityum iyonları ise konsantrasyon dengesizliği sebebiyle yine pozitif taraftan negatif tarafa doğru seperatördeki mikro gözeneklerden geçerek serbest haldeki grafitlerle bileşik oluşturur. Deşarj durumunda ise lityum grafit parçalanarak serbest elektron ve lityum iyonları açığa çıkar. Oluşan fazla elektron pozitif elektrodada doğru hareket ederek akım oluşturur. Lityum iyonları ise yine seperatördeki mikro gözeneklerden geçerek karşı tarafta serbest halde bulunan metal oksitlerin yapısına katılır. Şekil 2.3'te LiCoO_2 metal oksit bileşiği ve siyenitten oluşan bir grafitte sahip lityum-iyon bataryada bu polarizasyon tepkimeleri şarj veya deşarj durumlarında anot ve katot reaksiyonları belirtilerek gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Lityum-iyon bataryalarda şarj ve deşarj sırasında oluşan reaksiyonlar.

2.3 Lityum İyon Bataryalarda Isı Üretimi

Lityum iyon bataryalar şarj ve deşarj fonksiyonunda çeşitli kimyasal tepkimelerle karşılaşır. Bu tepkimeler sonucunda bataryanın seperatör, elektrot ve akım kollektörü gibi bölümlerinde farklı miktarlarda ısı üretilir. Akım kollektörlerinden elektronlar geçerken bir dirençle karşılaşır bu da omik direnç yaratıp ısı üretimine sebep olur. Elektrolit sıvısından lityum iyonlarının seperatör yapısının mikro gözeneklerinden karşıya geçme aşamasında tekrar omik dirençle karşılaşır ve ısı üretimine sebep olur. Elektrotlarda ise, iletken malzemedan geçen elektronların omik direnci, elektrolitten geçen lityum iyonlarının omik direnci ve elektrokimyasal reaksiyonların meydana geldiği elektrotların aktif bölgelerindeki aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonları nedeniyle ısı üretilir. Sonuç olarak bataryada elektrokimyasal reaksiyonlar, karışım etkileri, faz değişim etkileri sebebiyle bir ısı üretimi olur [58]. Farklı sayısal ölçülerde açığa çıkan bu ısı termodinamik perspektif ile genelleştirilmiş ve literatürde çokça kullanılan, aşağıda gösterilen bir denklemlerle sayısal olarak hesaplanabilmektedir.

$$Q = I(V_{OC} - V) - T_b \left(\frac{dV_{OC}}{dT} \right) \quad (2.1)$$

Bataryada üretilen ısı bataryada meydana gelen reaksiyonlar sonucu entropi üretiminden kaynaklı ve elektron hareketleri sonucu iç dirençten kaynaklı ısı üretimi şeklinde düşünülebilir. İç dirençten kaynaklı ısı üretimi de polarizasyon ve joule ısınması diye ayrılabilir. O halde bataryada üretilen ısı 3 ana faktörün toplamı olarak düşünülürse ;

$$Q_{\dot{u}} = Q_r + Q_p + Q_j \quad (2.2)$$

Reaksiyon sonucu oluşan ısı üretimi;

$$Q_r = -I T_b \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) \quad (2.3)$$

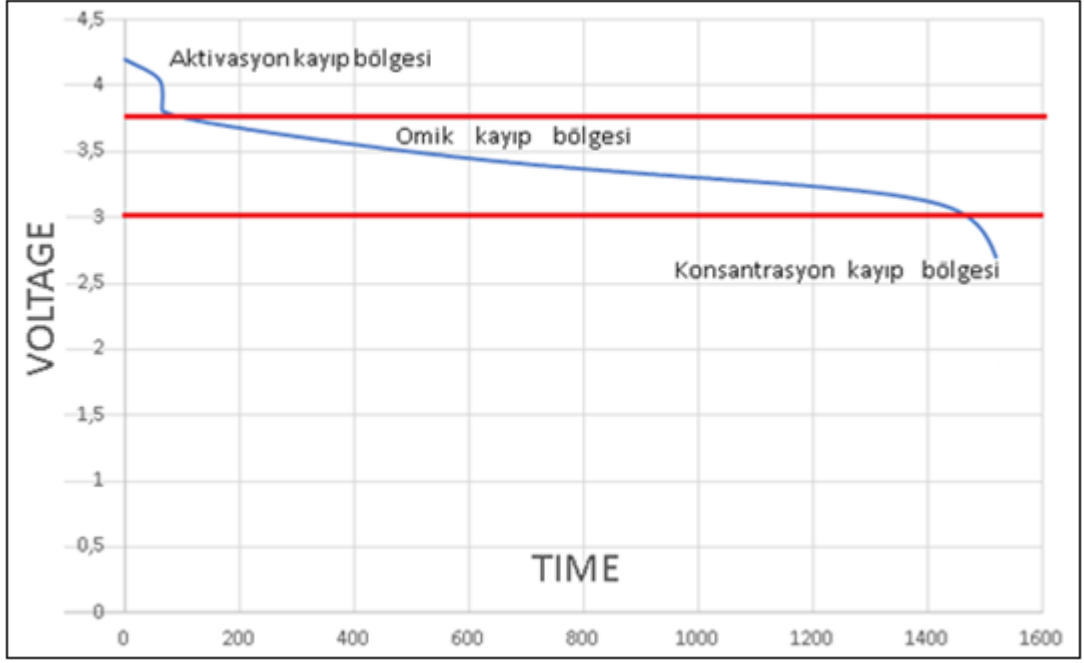
Aynı zamanda birim zamanda entropi değişimi ;

$$\Delta S = -I \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) \quad (2.4)$$

Q_r formülü entropi değişimi ile tekrar düzenlenirse;

$$Q_r = T_b \Delta S \quad (2.5)$$

Denklemleri elde edilir. Akım sıfır olduğunda akünün direncine saf direnç (R_s) denir. Akünün deşarj işlemi sırasında, aküden akım geçer ve akü voltajı elektrot potansiyelinin denge potansiyelinden sapması nedeniyle açık devre potansiyelinden daha büyüktür. Bu olaya polarizasyon da denebilir. Aşağıda şekil 2.4'te 30 amper-saatlik bir bataryanın 70A deşarj testinde elde edilen polarizasyon ve konsantrasyon sebebiyle oluşan kayıp bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4: 70 A deşarj akımında elde edilen bölgesel kayıplar.

Polarizasyon resistansı R_p olarak simgelenirse, batarya ve açık devre potansiyeli arasındaki fark ;

$$Q_p = I^2 R_p = I^2 (R_t - R_s) \quad (2.6)$$

Denklem 2.6' da R_t toplam direnci temsil etmektedir. Bataryadan akım çekilirken gösterdiği gerçek direnç R_t ' dir. Bunun yanında Joule ısısı;

$$Q_j = I^2 R_s \quad (2.7)$$

Elektrotlara yakın bölgelerdeki kimyasal reaksiyonlar diğer bölgelere göre daha yoğundur. Bu sebeple li-iyon bataryalarda üniform olmayan sıcaklık dağılımları elde edilir. Bataryada üretilen birim hacimdeki ısı denklem 2.1 tekrar düzenlenerek tekrar yazılırsa;

$$q_{\dot{u}} = I^2 R_t - I T_b \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) \quad (2.8)$$

Açığa çıkan bu ısı sebebiyle batarya üzerinde enerjinin korunumu denklemi yazılırsa;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b c_p T_b) = \nabla \cdot (k_b T_b) + q_{\dot{u}} \quad (2.9)$$

Oluşan ısıyı sistemden çekecek olan soğutma plakasındaki enerjinin korunum denklemi ;

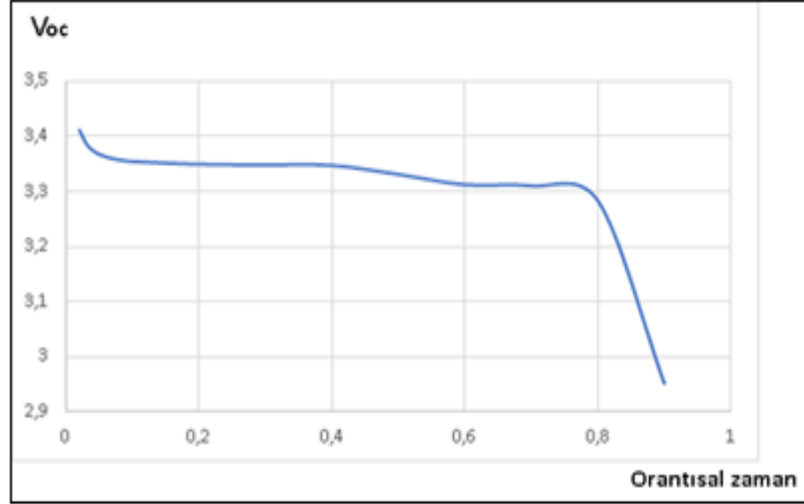
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p c_p T_p) = \nabla \cdot (k_p T_p) \quad (2.10)$$

Denklem 2.8’de I amper cinsinden akımı, Voc volt cinsinden bataryanın çalışmazken ölçülen açık anahtar voltaj değerini, V yine volt cinsinden bataryanın anahtar kapalıyken çalışır halde ölçülen voltaj değerini, T_b kelvin cinsinden bataryanın sahip olduğu sıcaklık değerini temsil etmektedir. $(dVoc)/dT$ terimi açık anahtar voltaj değerinin sıcaklıkla değişimini simgeleyen fonksiyondur. Tablo 2.1 de bu terimin değeri, farklı şarj doluluk oranı ve farklı sıcaklık koşullarında deneysel olarak hesaplanmış ve sayısal olarak sergilenmektedir.

Tablo 2.1 Isı üretiminde etken olan voltaj-sıcaklık gradyentinin $(dVoc)/dT$ farklı şarj yüzdeleri ve sıcaklık parametreleri altındaki sayısal değerleri.

Sıcaklık aralığı °C	Bataryanın şarj yüzdesi					
	%100	%80	%60	%40	%20	%0
25-35	-0.13	-0.03	0.06	0.02	-0.07	-0.44
35-45	-0.20	-0.05	0.15	0.14	-0.08	-0.47
45-55	-0.38	-0.08	0.14	0.15	-0.09	-0.48

Şekil 2.5’te Voc teriminin test süresinin tamamı 1 kabul edilerek elde edilmiş orantısal zamana göre değişimi gösterilmektedir.



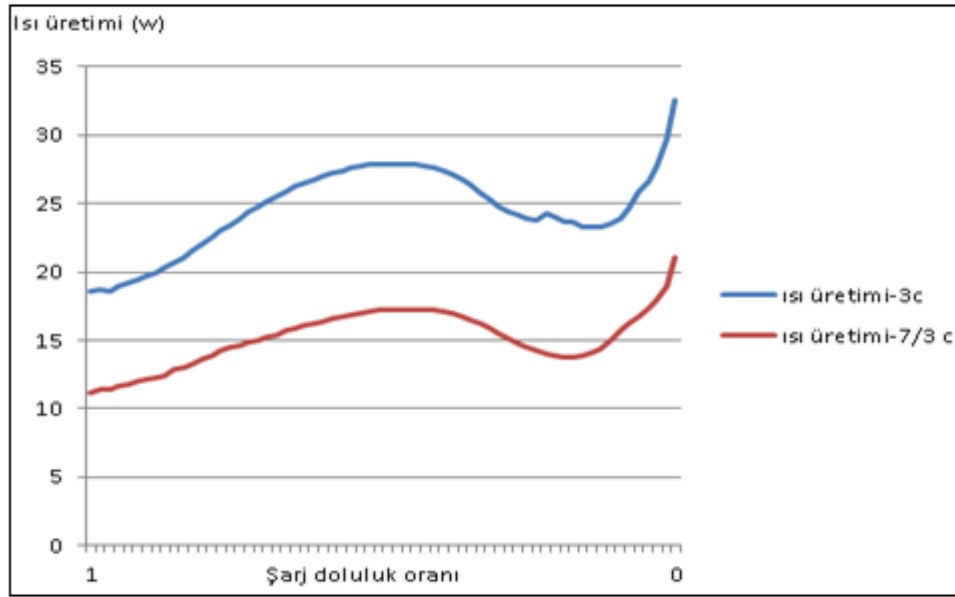
Şekil 2.5: Açık anahtar voltajının orantısal zamana göre değişimi.

Lityum iyon bataryalar 10ampersaat, 20 ampersaat, 30 amper saat gibi belirli kapasitelere sahiptir ve sahip olduğu bu kapasitelere göre yine belirli oranlarda akım çekilebilir. Akım çekme oranı C olarak simgelenirse 30 ampersaat bir batarya için; sırasıyla 7/3C veya 3C akım çekilmesinin anlamı bataryadan 70 amper, 90 amper akım çekmektir. Farklı koşullar altında batarya şarj ve deşarjı için ARBIN BT2000 Batarya Test Cihazı kullanılmıştır. Test cihazı şekil 2.6'da gösterilmiştir.



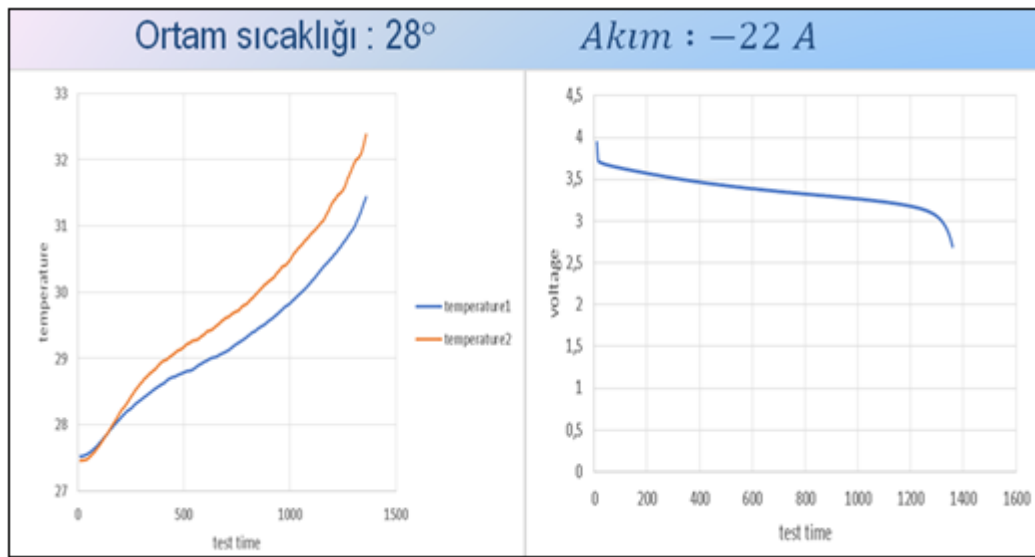
Şekil 2.6: Batarya test cihazı.

30 amper-saat bataryadan üretilen ısı, farklı ısı çekme oranlarında sayısal olarak 2.7’de gösterilmektedir.

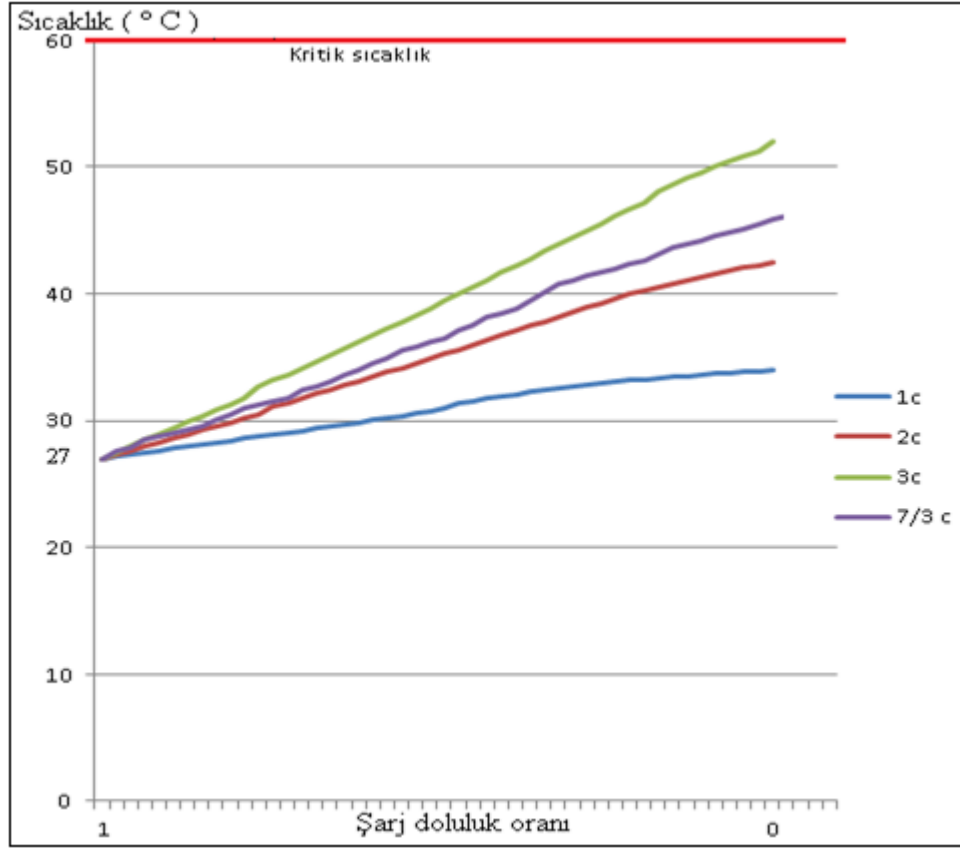


Şekil 2.7: Bir lityum-iyon bataryanın yüksek kapasite oranlarında simüle edilmiş ısı üretim değişimleri.

Şekil 2.8’de ise sabit 28°C ortam sıcaklığında 11 amper-saat bir bataryadan 2C (22 amper) akım çekilmesi sonucu bataryanın farklı 2 bölgesindeki artan sıcaklık gösterilmektedir. Şekil 2.7’de ise farklı akım durumlarına göre bataryanın sıcaklığındaki değişim görülmektedir.

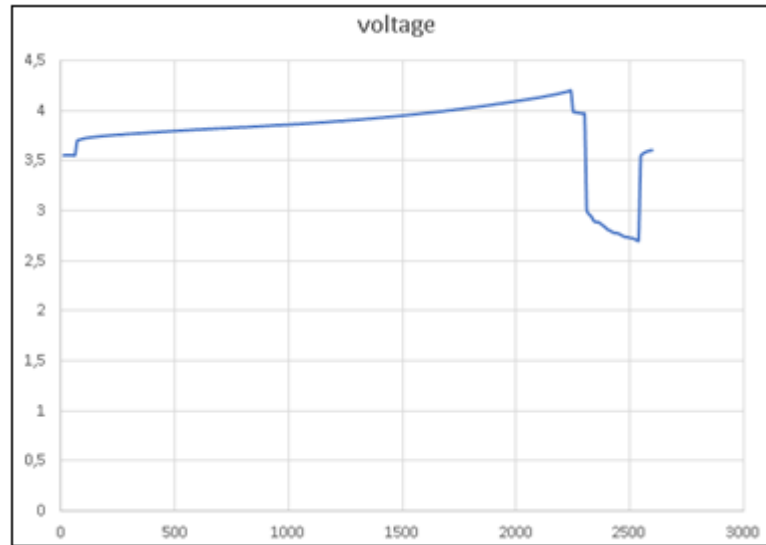


Şekil 2.8: 11 Amper-saat bir lityum iyon bataryanın 2c kapasite oranında test edilmiş bölgesel sıcaklık değişimi.

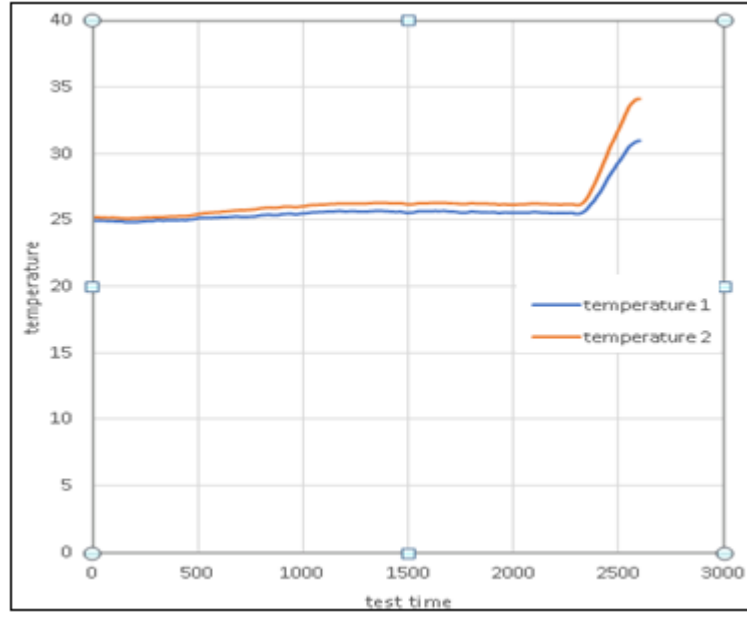


Şekil 2.9: 30 Amper-saat kapasiteye sahip bir lityum-iyon bataryanın farklı kapasite oranlarında simüle edilmiş sıcaklık değişimleri.

Şekil 2.10 ve 2.11’de ise düşük akımla nominal seviyede şarj edilen 11 amper-saatlik bir lityum-iyon bataryadan şarj olduktan sonra ani olarak çekilen 70 amperlik akım sonucunda elde edilen voltaj ve sıcaklık değişimleri sırasıyla gösterilmiştir.

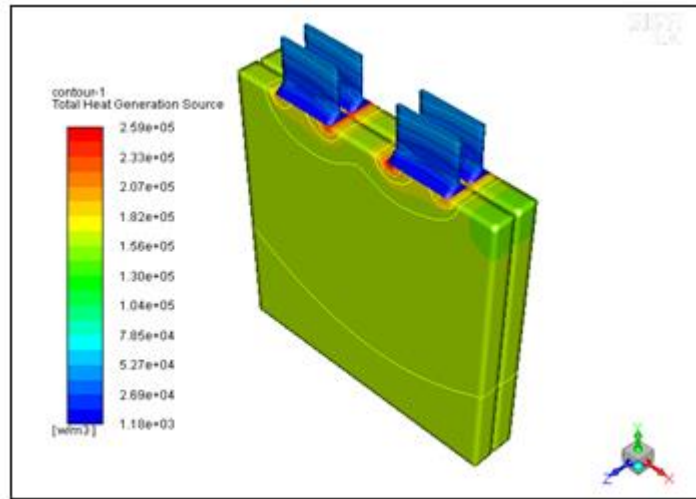


Şekil 2.10: 11 Ah bataryanın şarj- deşarj sırasında elde edilen voltaj-zaman eğrisi.



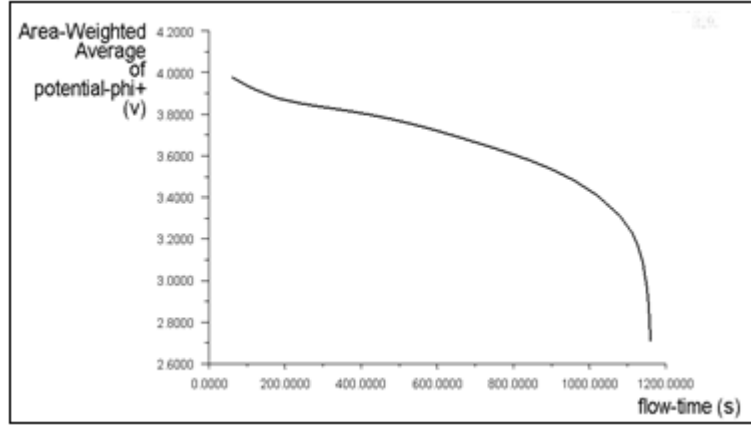
Şekil 2.11: 11 Ah bataryanın şarj-deşarj sırasında elde edilen sıcaklık-zaman eğrisi.

30 amper-saat bir lityum iyon batarya bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. 30 amper-saat bu bataryadan 90 amper akım çekilmiş ve bölgesel ısı üretimi şekil 2.12’de görülmektedir.



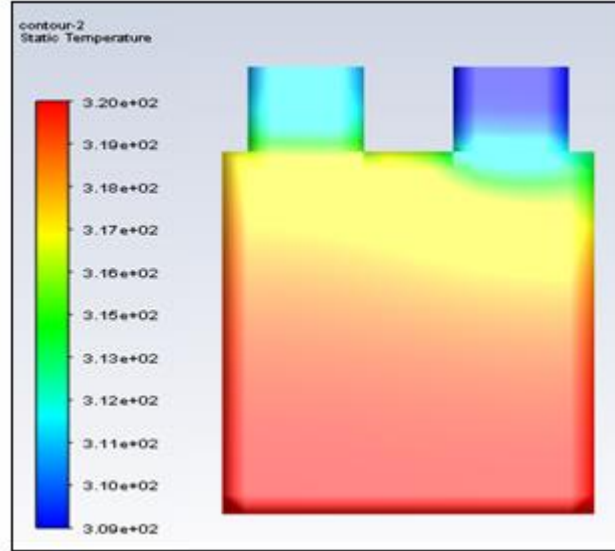
Şekil 2.12: Simülasyonu yapılan li-ion batarya modelinde oluşan bölgesel ısı kaynakları.

Bu ısı üretimine maruz kalan seri bağlı bu batarya 300 K dış ortam sıcaklığında doğal konveksiyon ortamında bırakılmıştır. 90 amper eksi akımla tamdeşarj durumuna gelene kadar geçen süre şekil 2.13’de görülmektedir.

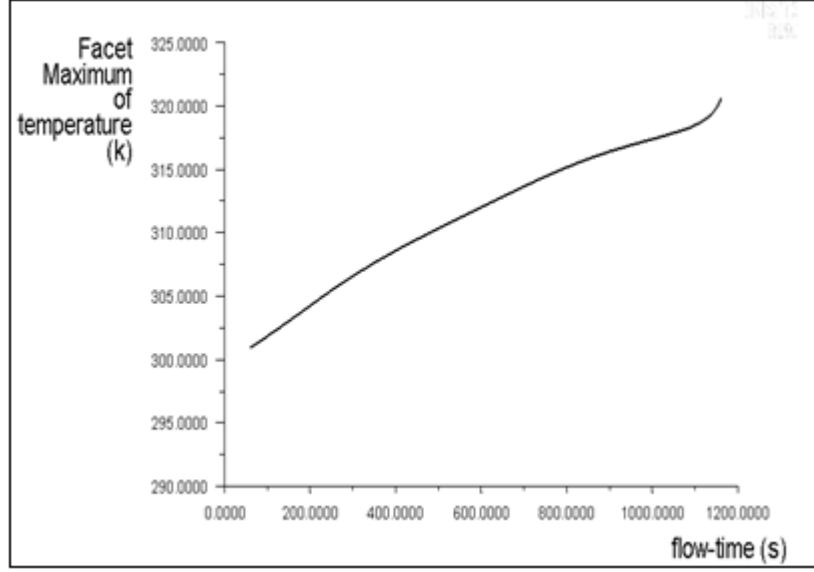


Şekil 2.13: 3C deşarj durumunda kalan li-ion bataryanın voltaj-zaman grafiği.

Bu süre içerisinde oluşacak sıcaklık profili ve zamana bağlı değişimi şekil 2.14 ve 2.15'te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.14: 300 K ortam sıcaklığında 3C deşarj durumunda kalan bataryanın bölgesel sıcaklık dağılımı.



Şekil 2.15: 3C deşarj durumunda kalan li-ion bataryanın sıcaklık-zaman grafiği.

Görüldüğü üzere batarya doğal konveksiyon halinde soğumaya bırakılırsa sıcaklık değişimi çok yüksek olmaktadır. 20 derecelik bir değişim yüksek ortam sıcaklığında tehlike arz edecektir. Bu sıcaklık farkının olabildiğince düşük tutulması gerekmektedir.

2.4 Lityum-İyon Bataryaların Matematiksel Alt Yapısı

Li-İyon bataryaların Fiziksel ve kimyasal matematiksel modeli kütle transferi, difüzyon veya interkalasyon kinetiği süreçleri gibi temel denklem esaslarına dayanır. Bu esaslar batarya içerisinde süregelen fiziksel ve kimyasal süreçlerin daha net algılanmasını sağlarken aynı zamanda batarya gelişimi açısından seçilen materyallerin optimize edilmesinde yardımcı olur.

Bataryanın davranış biçimini etkileyen birçok faktör vardır. En önemlileri bataryanın geometrik yapısı, elektrot ve separatör yapılarının katman sayıları, parçacık ölçütleri, ve elektronik iletkenlikleri, gözeneklilik, pürüzlülük, aktif parçacıkların transfer rota çarpıklığı, elektrolit iletkenliği, difüzyon, aktif parçacık konsantrasyonu, reaksiyon yüzey alanı, sıcaklık ve aktivasyon enerjisidir.

Arrhenius'a göre her molekül çarpışma sonucu reaksiyon vermez ancak yeterli aktivasyon enerjisine sahip moleküller çarpışınca reaksiyon verebilir. Ayrıca reaksiyon için gerekli aktivasyon enerjisine sahip moleküller de sıcaklıkla beraber artar. Dolayısıyla reaksiyon hızı da sıcaklıkla beraber artacaktır. Bu durumu lityum-iyon bataryalarda gösteren arhenius denklemi;

$$\sigma_e = \frac{1}{T} \cdot \sigma_0 e^{\frac{-E_a}{R.T}} \quad (2.11)$$

Elektrolit iletkenliğinden türetilen difüzyon sabiti;

$$D_e = \frac{\sigma_e \cdot k_b \cdot T}{e^2 N_a \cdot c} \quad (2.12)$$

Anot veya katot yapılarında ihtiva ettiği doldurucu veya bağlayıcı gibi aktif olmayan partiküllerin yüzdesi ölçülen kapasite ve teorik kapasitenin fonksiyonu olup bu yüzdeyi veren denklem;

$$\text{inaktif part [\%]} = \left(1 - \frac{C_{ölç}}{C_{teo}}\right) \cdot 100 \quad (2.13)$$

İlgili materyalin teorik kapasitesi ise aşağıdaki denklemle tahmin edilebilir;

$$C_{teo} = \frac{\rho \cdot V \cdot (1 - \varepsilon) \cdot N_a \cdot e}{M} \quad (2.14)$$

Reaksiyon over potansiyeli;

$$\eta_D = \phi_1 - \phi_2 - Voc - i_D \cdot R_{SEI} \quad (2.15)$$

Burada ϕ_1 katı faz potansiyeli olup ohm kanunu ile bulunabilir; j_1 akım yoğunluğu, σ_s katı faz iletkenliği olmak üzere ohm kanunu buna göre yazılırsa ;

$$j_1 = -\sigma_s \cdot \nabla \phi_1 \quad (2.16)$$

ϕ_2 ise çözelti potansiyeli olup aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$\nabla \phi_2 = \frac{j_2}{\sigma_{e,eff}} + \frac{R.T}{z \cdot F} \cdot (1 - t_0^+) \cdot \nabla \ln(c_e) \quad (2.17)$$

Burada ilk terim akım yoğunluğu (j_2) ve iyonik iletkenlikten dolayı ($\sigma_{e,eff}$) potansiyel düşüşü tanımlar. İkinci terim ise elektrolitteki konsantrasyon eğimi sebebiyle konsantrasyon potansiyelini belirler. Diğer sabitler ise; R gaz sabiti, T sıcaklığı, z şarj numarası (lityum-iyon için pil $z = 1$), F Faraday sabiti, t_0^+ taşıma katsayısı ve c_e elektrolit konsantrasyonudur. Efektif iletkenlik $\sigma_{e,eff}$, çarpıklık katsayısı (κ), gözeneklilik ε olmak üzere aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$\sigma_{e,eff} = \frac{\sigma_e \cdot \varepsilon}{\kappa} \quad (2.18)$$

Belirli bir hacimsel bölgede elektrolit ve elektrot arasında temas yüzey alanı oranı α olmak üzere; şarj transfer akım yoğunluğu j_D ve elektrolit içerisinde akım yoğunluğu j_2 aşağıdaki denklemle ilişkilendirilebilir;

$$\alpha \cdot j_D = \nabla j_2 \quad (2.19)$$

Batarya içerisinde oluşan difüzyon ile transfer edilen maddelerin küresel parçacıklar olduğu düşünülürse, Fick kanununun 2. Yasası küresel koordinatlarda dönüştürülürse aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\frac{dc_s}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(D_s (c_s) \cdot r^2 \cdot \frac{dc_s}{dr} \right) \quad (2.20)$$

r transfer edilen parçacık yarıçapı olup, $D_s (c_s)$ denklemde konsantrasyona bağlı difüzyon katsayısıdır. Parçacıkların yüzeyinde konsantrasyon değişimi difüzyonun yanı sıra şarj transfer akım yoğunluğu ile de belirlenebilir. Bu durum için sınır koşulları;

$$\left. \frac{dc_s}{dr} \right|_{r=R} = - \frac{j_D}{D_s \cdot F} \quad ; \quad \left. \frac{dc_s}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (2.21)$$

Gözenekli yapı içerisinde kalan elektrolit içinde kimyasal difüzyon katsayısının efektif değeri ise;

$$D_{eff} = \frac{D \cdot \varepsilon}{\kappa} \quad (2.22)$$

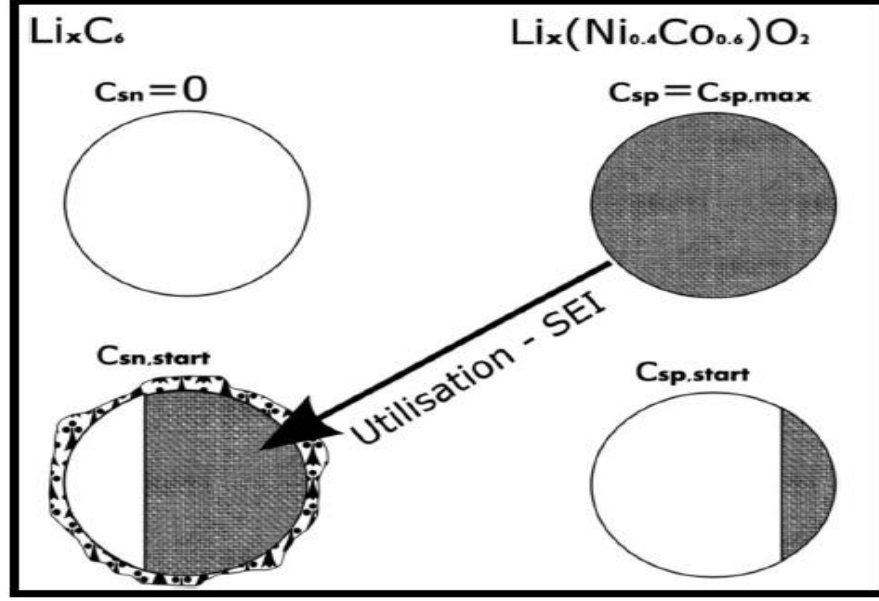
Stefan-Maxwell çok bileşenli difüzyon denklemi, yük ve kütle süreklilik denklemlerinin birlikte uygulanmasıyla türetilir. Bu denklem zaman içerisinde elektrolit çözeltisi içerisinde değişen lityum iyon konsantrasyonu belirler.

$$\frac{dc_e}{dt} = \nabla (D_{eff} \cdot \nabla c_e) + \frac{(1-t_0^+)}{F \cdot \epsilon} \cdot \alpha \cdot j_D \quad (2.23)$$

Sınır koşullar akım sıfırken akım kollektöründe;

$$\left. \frac{dc_e}{dt} \right|_{x=0 \text{ ve } x=L} = 0 \quad (2.24)$$

Lityum-iyon bataryalarda lityum iyonları anot ve katot taraflarında şarj kapasitesine göre denge durumunda kalmaktadır. Bu denge sistemi, anotta başlangıç lityum konsantrasyonu $c_{sn,start}$, katotta başlangıç lityum konsantrasyonu $c_{sp,start}$ terimleriyle görselleştirilmiştir. Üstteki model fabrika çıkışı boş bir batarya modelinde anot malzemesinde hiç lityum iyonu ihtiva etmediğini, katot malzemesinde tam kapasite lityum iyonu olduğu görülmektedir. Alttaki modelde ise ilk şarj durumunda lityum iyonlarının tamamının katot durumuna geçmediği gösterilmiştir. Bunun sebebi lityum iyonlarının transferi sırasında sistemde Li_2O , LiF , Li_2CO_3 gibi iyonik hareketleri engelleyen kütle oluşumları sebebiyle bir başka deyişle istenmeyen tersinmez bileşiklerin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu yapılara literatürde SEI (solid-electrode interface) denir. Ayrıca SEI oluşumu kapasite kayıplarına sebep olmakla beraber bataryanın ömrünü de belirleyen kriterdir. Katot malzemesinde kullanılmış lityum oranına ise literatürde utilization denmektedir



Şekil 2.16 : Anot ve katot malzemelerindeki lityum konsantrasyonun fabrika çıkışı ve ilk kullanım sonrasındaki durumu.

O halde şarj edilmiş durumdaki bataryada pozitif elektrot tarafındaki aktif parçacık konsantrasyonu;

$$c_{sp,start} = (1 - utilization) \cdot c_{sp,max} \quad (2.25)$$

Negatif elektrot tarafındaki aktif parçacık konsantrasyonu;

$$c_{sn,start} = (utilization - c_{SEI}) \cdot c_{sp,max} \cdot \frac{V_p(1-\varepsilon_p)(1-inaktifpart,p)}{V_n(1-\varepsilon_n)(1-inaktifpart,n)} \quad (2.26)$$

V pozitif veya negatif elektrot tabakasının hacmini, ε gözeneklilik oranını inaktif part ise pozitif ve negatif elektrotlardaki aktif olmayan parçacıkların oranını simgelemektedir.

Şarjı bitirilmiş durumdaki pozitif elektrot tarafındaki aktif parçacık konsantrasyonu;

$$c_{sp,start} = (1 - c_{SEI}) \cdot c_{sp,max} \quad (2.27)$$

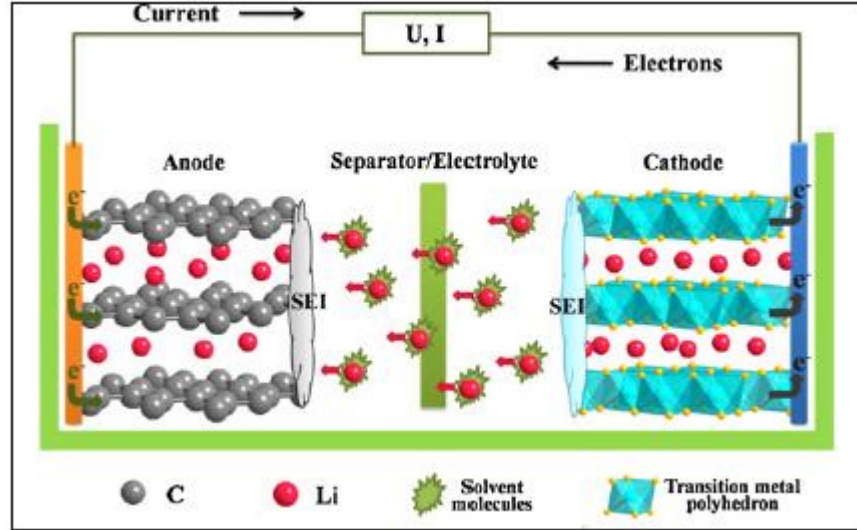
Negatif elektrot tarafındaki aktif parçacık konsantrasyonu;

$$c_{sn,start} = 0 \quad (2.28)$$

Denklemleriyle elde edilir. Teorik olarak aktif materyalin maksimum konsantrasyonu ise molar kütle ve yoğunluğun bir fonksiyonudur.

$$C_{s,max} = \frac{\rho}{M} \quad (2.29)$$

Lityum iyonlarının şarj ve deşarj işlemleri sırasında anot ve katot arasında hareket edip temsili şekil 2.17’de görüldüğü üzere elektrot molekülleri arasında yerleşme işlemine literatürde intercalation denir. Bu prosesin reaksiyon kinetiği Butler-Volmer eşitliği ile hesaplanır. Bu denklem reaksiyona giren akım ile gerilim arasındaki bağlantıyı açıklar.



Şekil 2.17: intercalasyon ve SEI modeli

$$j_D = \frac{i_D}{S} = j_0 \cdot \left(\exp \left[\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{R \cdot T} \eta_D \right] + \exp \left[\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{R \cdot T} \eta_D \right] \right) \quad (2.30)$$

Bu denklemde j_0 akım yoğunluğunu, α transfer katsayısını, z lityum bataryalar için 1 olan yük numarasını, R gaz sabiti ve T sıcaklığı temsil etmektedir.

İnterkalasyon prosesinde gözenekli elektrot parçacıklarının elektrolit solveniyle temas eden yüzey alanı S ile temsil edilirse; Bu yüzey alanı aşağıdaki denklemle yaklaşık hesaplanabilir.

$$S = \frac{V_{elektrot} \cdot (1-\varepsilon)(1-inaktif_{part})}{V_{part}} 4. \pi. r^2 \quad (2.31)$$

Bu denklemde V hacim, r parçacık yarıçapı, ε ise gözenekliliği temsil etmektedir. Bir lityum metal elektrot için reaksiyon yüzeyi, elektrodun saf geometrik alanı olarak verilir. Gözenekli bir interkalasyon elektrodu için, akım yoğunluğu ilişkisi, katı yüzeyindeki ($c_{s,yüzey}$) ve elektrolit içindeki lityum konsantrasyonunun (c_e) bağıntısı ile aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$j_0 = F \cdot k_0 \cdot (c_{s,max} - c_{s,yuzey})^{(1-\alpha)} \cdot (c_{s,yuzey})^\alpha \cdot (c_e)^\alpha \quad (2.32)$$

Bu denklemde ($c_{s,max} - c_{s,yuzey}$) interkalasyon kafesindeki boş alanların konsantrasyonudur. k_0 . Ve α ise orantısal faktörlerdir. Ve son olarak bataryanın sıcaklığı ile akım yoğunluğunu ilişkilendiren arhenius denklemi;

$$j_0(T) = j_0(T = 296.15 K) \cdot e^{\frac{E_a j_0}{R T}} \cdot \left(\frac{1}{296,15 (K)} - \frac{1}{T} \right) \quad (2.33)$$

Burada $E_a j_0$ yük transfer reaksiyonunun aktivasyon enerjisidir 296,15 K ise denklemin referans sıcaklık ölçüsüdür.

3.BTYS İÇİN SOĞUTMA KANALI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

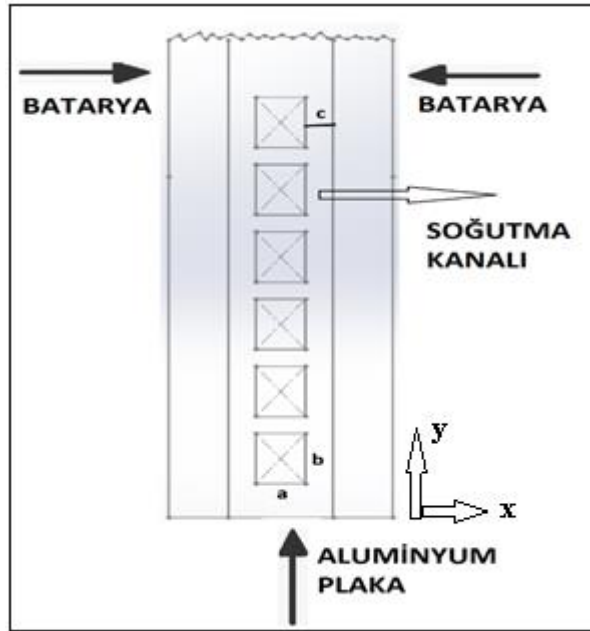
Üzerinde çalışılan lityum-iyon batarya 30 amper saat kapasiteye ve 3C kapasite oranına sahiptir. Bu kapasite oranının anlamı bataryadan 20 dakika boyunca maksimum ve sabit olarak 90 amper akım çekilebilir olmasıdır. Batarya ölçüleriyle birlikte en, boy ve kalınlık sırasıyla 158 mm, 175 mm ve 11.95 mm olarak prizmatik bir bataryadır. Geçen bölümde ısı üretim denklemine ve üzerinde çalışılan bataryanın ısı üretim değerlerine değinilmiştir. Işınım ile ısı transferi diğerlerine göre ihmal edilebilir boyutta olduğundan bu uygulama için üzerinde çok konuşulmayacaktır. Soğutma sistemi olmaksızın bataryada üretilen ısı ortam sıcaklığı ile doğal taşınım ile iletimle ısı transferleri sonucu belirli bir sıcaklık artışı ile termal dengeye ulaşacaktır. Çevre sıcaklığıyla termal dengeye batarya için kritik sıcaklık olan 60 °C 'nin altında ulaşması arzu edilen durumdur fakat çevre sıcaklığı sürekli değişkenlik gösterir ve çevre sıcaklığının çok yüksek olduğu zamanlarda batarya kritik sıcaklığın üzerinde termal dengeye ulaşacaktır. Bataryanın kritik sıcaklığının altında çalışmasının önemli olduğu kadar nominal sıcaklık aralığında çalışması da çok önemlidir. 30°C ile 40°C arasındaki her bir sıcaklık farkı batarya ömrünü 2 ay kısaltmaktadır. Ayrıca kritik sıcaklığa ne kadar yaklaşırsa batarya performansı o derece kötü olacaktır. Tüm bu durumlar dikkate alındığında uygun bir soğutma tasarımı yapılması ihtiyacı doğmuştur. Bu işlem için su soğutmalı tasarım üzerinde çalışılmıştır.

Kurgulanacak su soğutmalı tasarım, batarya sıcaklığının 30-40°C arasında tutulması, üniform bir sıcaklık dağılımının sağlanması amacıyla yerel sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi, elektrikli araca gereksiz ekstra yük olmaması için montaj ağırlığının olabildiğince düşük tutulması, bataryadan sağlanan enerjiyle çalışan pompa'nın harcayacağı gücü minimum tutmak için kanal akışında basınç yüklerinin minimum tutulması, ve maliyet açısından en uygun tasarımların düşünülmesi gibi kısıtlayıcı etkenlere sahiptir. Bu su soğutmalı sistemin minimum performansla daha verimli çalışabilmesi için soğutma kanalı ölçüleri, soğutma plakası kalınlığı, kanal içi akış hızı, kanal sayısı, sistemin basınç yükü, suyun giriş sıcaklığı, bataryada oluşan sıcaklık farkları belirlenmelidir.

3.1 Soğutma Kanalı Ölçülerinin Belirlenmesi

Soğutma uygulamalarında ısı iletim kabiliyetinin yüksek olması, mukavemet açısından dayanıklı olması ve maliyet açısından ucuz olması sebebiyle genel olarak alüminyum malzeme kullanılır. Uygulamada kanal içerisinden geçirilen suyun kanal dışarısında batarya ile temas eden yüzeyde iletimle ısı transferinden dolayı bir sıcaklık dengesi oluşturacağından alüminyum sac kalınlığı, mukavemet açısından yeterli dayanımı sağladığı öngörülebilecek kadar minimum düzeyde tutulmaya çalışılmıştır çünkü iletimle ısı transferi kalınlık ile ters orantılıdır. Sınırlar dahil olmak üzere ortamın herhangi bir yerinde pozitif x yönünde ısı akışı Fourier ısı iletim kanunu ile şöyle ifade edilebilir:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1: Bir batarya soğutma plakasının kesit görünümü.

Bu sebeple plaka kalınlığı etkin olarak soğutma plakasının ortalama sıcaklığını düşürür ve yerel sıcaklık dağılımının üniform olmama durumunu minimize etmede etkilidir [17]. Dolayısıyla şekil.1’de alüminyum plakadaki c ölçüsü 0.5 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca elektrikli araçlarda kullanılacak olan bu sistemi olabildiğince hafif tutmak için gereksiz metal ağırlığından kaçınmak için kullanılacak alüminyum

metalinin kalınlığını yeterli seviyede tutmak da çok önemlidir. Şekil 3.1’de 3 boyutlu analizi yapılacak olan soğutma sistemi ilgili ölçülerin anlaşılabilir olması için 2 boyutlu olarak gösterilmiştir. 2 boyutlu olarak gösterilen alüminyum soğutma plakası her iki yanına konulan bataryayı soğutmaktadır. Alüminyum plaka üzerinde açılan soğutma kanalındaki a ölçüsü 0.5 mm referans alınarak 1mm ve 1.5 mm gibi ölçülerle analiz edilecek ve b ölçüsü ise tüm analizlerde 3mm olarak alınmıştır.

Kanal içerisinde geçen sıvı akışkan ile suyun ıslattığı kanal yüzeyi arasında taşınım ile ısı transferi durumu söz konusudur. Bu sebeple alan konusu dikkate alınarak b mesafesinin olabildiğince yüksek tutulması gerekliliği ortaya çıkar. Ayrıca suyun kanal içerisinde olabildiğince fazla mesafe kat ettikten sonra çıkış portuna ulaşması yine alan ile ilişkilidir. Alan ise hem iletim ile ısı transferi hem de taşınım ile ısı transferi ile doğrusal bağıntıya sahiptir. Taşınımla ısı transferi Newton’un soğutma kanunu ile;

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_p) \quad (3.2)$$

Taşınan bu ısı sonucunda kanal içerisinde akan soğutucu su için enerjinin korunumu denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s c_p T_s) + \nabla \cdot (\rho_s c_p \vec{V} T_s) = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (3.3)$$

Kütle korunum denklemi ;

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

Momentum korunumu denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho_s \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P \quad (3.5)$$

Tasarım kriterlerini etkileyen diğer denklemler ise ;

Basınç kaybı;

$$\Delta P_k = \frac{fL}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.6)$$

Yük kaybı;

$$h_k = \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

Kütlesel debi;

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3.8)$$

Hacimsel debi;

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.9)$$

Basınç kaybı ve kütlesel debi belirlendikten sonra bu kayıpları yenmek için gerekli pompa gücü;

$$\dot{W}_p = \dot{Q} \Delta P_k = \dot{Q} \rho g h_k = \dot{m} g h_k \quad (3.10)$$

Son olarak maddede depolanan ısı;

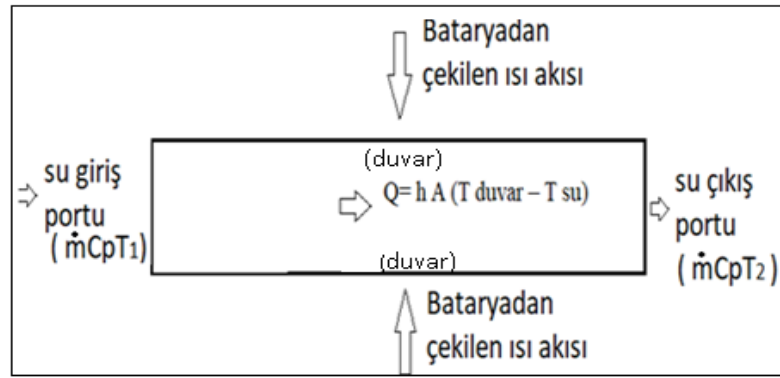
$$Q = mc\Delta T \quad (3.11)$$

Eşitlikleri ile hesaplanabilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait bu denklem sistemleri bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

3.2 Su Ortalama Giriş Hızı Ve Reynolds Sayısının Saptanması

Taşıyım ile ısı transferi sonucu bataryadan çekilen ısı sebebiyle suyun çıkış portundaki sıcaklığı giriş sıcaklığına göre daha fazla olması bu sistemdeki ısı enerji dengesini temsil eder. Şekil.2 de kurgulanan hacimsel bir elemanın giriş portundan belirli bir kütleli debi, sıcaklık ve sabit basınçta ısı transfer katsayısı ile hacimsel elemana iletilen su bataryadan çekilen ısı sebebiyle taşıyım ile ısı transferi sonucu çıkış portunda sıcaklık artışı ile karşılaşacaktır.



Şekil 3.2: Sonlu kesitteki kanal akışındaki enerji verileri.

Sistemin enerji dengesi tekrar yazılacak olursa ;

Suya verilen ısının tamamı taşıyım ile ısı transferi sonucunda olduğundan;

$$\rho v A(\text{giriş}) C_p (T_1 - T_2) = h A(\text{duvar}) (T_{\text{duvar}} - T_{\text{su}}) \quad (3.11)$$

Bataryada oluşan ısının tamamı soğutma suyuna ve soğutma plakasına geçtiği düşünülürse;

$$\rho v A(\text{giriş}) C_p (T_1 - T_2) + m_{(Al)} C_{(Al)} \frac{dT}{dt} = \dot{Q} \quad (3.12)$$

bu eşitlikler elde edilir.

P : Yoğunluk, kg m^{-3}

v : Akış hızı, m/s

A(giriş): Akış yönüne dik kanal kesit alanı, m^2

C_p : Sabit basınçtaki özgül enerji, $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

T_1 : Giriş sıcaklığı, $^{\circ}\text{K}$

T_2 : Çıkış sıcaklığı, $^{\circ}\text{K}$

\dot{Q} : Bataryada üretilen ısı, W

$m_{(\text{Al})}$: İçinden su geçen alüminyum plaka kütlesi, kg

$C_{(\text{Al})}$: Alüminyum özgül enerjisi, $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Eşitlik (3.11)'den anlaşılacağı üzere giriş ve çıkış portları arasındaki sıcaklık farkı kütleli debi ile ters orantılıdır şöyle ki; çekilen belirli değerdeki bir ısı değeri için giriş ve çıkış arasında yüksek sıcaklık farkları var ise kütleli debi artırılarak bu farklar azaltılabilir. Aynı zamanda kütleli debi bataryadan çekilen ısı ile doğru orantılıdır. Ne kadar yüksek debide sıvı var ise o kadar fazla sistemden ısı atılabilir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda soğutma tasarımı uygulamalarında kütleli debi hesabı yapılması birincil öneme sahiptir. Mükemmel bir ısı transferi varsayımı yapıp bataryada üretilen ısının tamamı kanal içinde akan suya iletiildiği düşünülürse (3.4)'teki eşitlikten faydalanılarak olası hız hesabı yapılabilir. Bataryada üretilen ısının tamamı akışkana iletilirse alüminyum plakada bir sıcaklık değişimi olmayacaktır. Dolayısıyla etkisi sıfırlanacak o zaman (3.12)'deki denklem (3.13)'deki gibi şöyle yazılabilir;

$$\rho v A (\text{giriş}) C_p (T_1 - T_2) = \dot{Q} \quad (3.13)$$

Bataryadan transfer edilmesi gereken yaklaşık 30 watt değerindeki ısı, suyun yoğunluğu 1000 kg m^{-3} , kanal kesit alanı takriben $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, özgül ısısı yaklaşık $4.187 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, giriş sıcaklık farkı yaklaşık $10 \text{ }^{\circ}\text{K}$ alınarak denklem (3.13)'ten faydalanılarak hesaplanırsa suyun kanal içindeki akış hızı yaklaşık olarak bulunabilir.

$$1000 (\text{kg m}^{-3}) \cdot V (\text{m/s}) \cdot 3 \cdot 10^{-6} (\text{m}^2) \cdot 4,187 (\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}) \cdot 10 \text{ }^{\circ}\text{K} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ kW}$$

Bu hesaptan V hızı çekilirse yaklaşık $0,238 \text{ (m/s)}$ sonucu bulunur. Bu değere yakın 0.25 m/s hız değeri ileride yapılacak olan simülasyonlarda referans olarak kullanılmıştır. 0.25 m/s hız değeri için eşitlik (3.14)'de Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{v D_h}{\nu} \quad (3.14)$$

Hidrolik çap ;

$$D_h = \frac{4A}{\zeta} \quad (3.15)$$

A: Kanal kesit alanı, m^2

Ç: Kanal çevresi, m

ν : kinematik viskozite, m^2/s → su için $20^\circ C$ 'de yaklaşık $1,003 \times 10^{-6}$

Dh: hidrolik çap, m → 1mm x 3mm kanal kesiti için 1,5 mm

v: hız, m/s → 0,25 m/s

Bu değerler hesaba katıldıktan sonra Reynolds sayısı yaklaşık 375 çıkmaktadır. Bu değer türbülanslı akış profiline geçme noktası olan kritik Reynolds sayısı 2300 değerinden çok daha düşük çıkmış ve kanal içi akışın laminer olduğu anlaşılmıştır

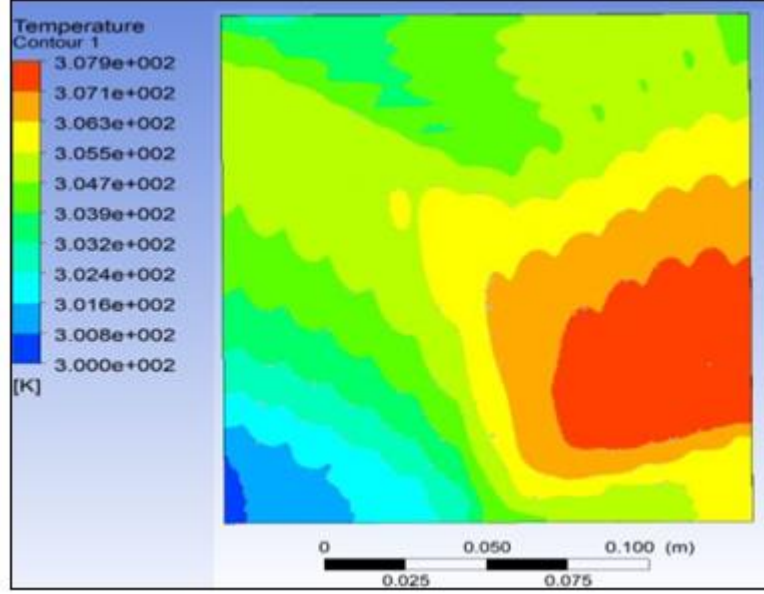
3.3 Kanal Sayısının Belirlenmesi

Kanal sayısı soğutma sisteminde basınç yükleri ve sıcaklık dengelemesi için önemli faktördür. Kanal sayısı ile birlikte suyun ısı kaynağına olan temas yüzeyi değişecek ve önemli ölçüde ısı transferini değiştirecektir. Ayrıca kanal sayısı ile birlikte pompalanan debi ve plakanın akış üzerinde etkileyen direnci de değişim gösterecektir. Kanal sayısı faktörünün bu etkilerini gözlemleyebilmek için geniş ölçülerde prizmatik bir batarya modelinin soğutulması için hazırlanan 1.5×3 mm kanal kesitine sahip 150 mm boy 220 mm en ölçülerinde 2.5 mm kalınlığa sahip bir alüminyum plaka üzerinde çalışıldı. Isıya olan duyarlılığın daha iyi gözlemlenebilmesi için bataryada oluşan 35 W ısı üretimi yerine 60 W ve üniform ısı ürettiği kabul edilerek simülasyon yapıldı. Simülasyonlarda 5, 6, 7 ve 8 kanallı alüminyum plakalar denendi. Bu simülasyonlar laminer akış profilinde olup soğutma suyu 300 K sıcaklığında ve 0.25 m/s giriş hızına sahiptir. Sonuçlar tablo 3.1'de gösterilmiştir.

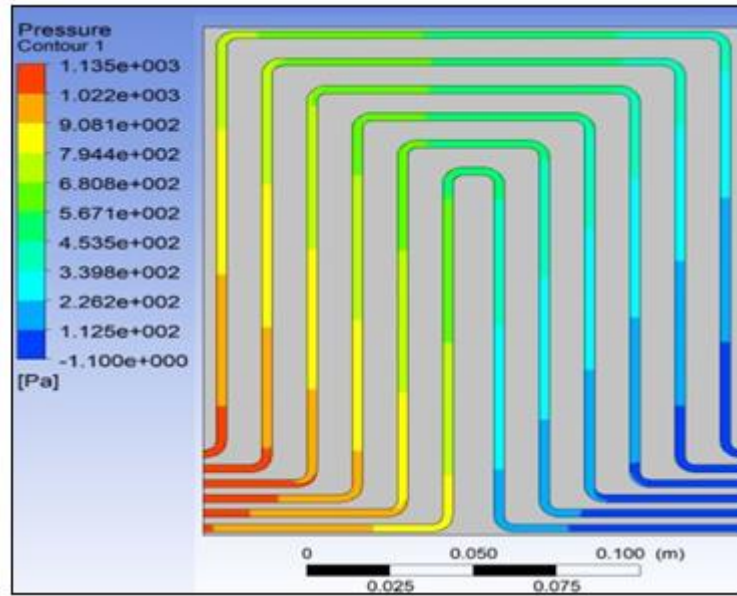
Tablo 3.1: Kanal sayısı parametresine bağlı simülasyon değerleri.

Kanal sayısı ve debi	Su çıkış sıcaklığı(K)	Bataryada maksimum sıcaklık(K)	Su giriş basıncı(pa)
5 kanal – $3.75\text{ cm}^3/\text{s}$	305.9	309.5	1112.7
6 kanal – $4.5\text{ cm}^3/\text{s}$	304.9	307.9	1097.8
7 kanal – $5.25\text{ cm}^3/\text{s}$	304.2	307.2	1067.7
8 kanal – $6\text{ cm}^3/\text{s}$	303.7	306.2	1033.2

Kanal sayısının artmasıyla birlikte bataryadan çekilen ısı her bir kanal ile daha fazla pay edilmiş ve çıkış sıcaklığı düşmüştür. Kanal sayısıyla beraber plakada daha fazla serbest alan olduğundan dolayı plakanın akışa gösterdiği direnç düşmüş dolayısıyla basınç değeri de düşmüştür. Bununla birlikte akışkan debisi artmış ve artan debiyle birlikte bataryadan çekilecek ısyı hedef alan daha fazla soğuk su ısyıla mücadele ettiğinden dolayı plakanın sıcaklığı düşmüştür. Ancak artan debiyle beraber pompa gücü artacağından dolayı 6 kanal sayısı etrafında optimizasyon yapmak uygun görülmüştür. Pompa harcayacağı enerjiyi yine soğutması için çalıştığı bataryadan karşılamaktadır. Dolayısıyla bu sistem için ekstra yüklerden kaçınılması batarya performansını iyileştirecektir. 6 kanal sayısına sahip alüminyum plakanın Ansys fluent modülünde hazırlanmış simülasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.3 te sağ tarafın sol taraftan daha sıcak olduğu görülmektedir. 300 kelvin sıcaklığında sol alt manifoldtan plaka içerisine giren su bataryadan çekilen ısı sebebiyle zamanla ısınarak çıkış tarafına doğru ısı transfer kabiliyetini kötüleştirmektedir. Çıkış tarafında suyun ısınmasından dolayı etkisiz kalan ısı transferini iyileştirme çalışmaları bölüm 3.4 te anlatılacaktır.

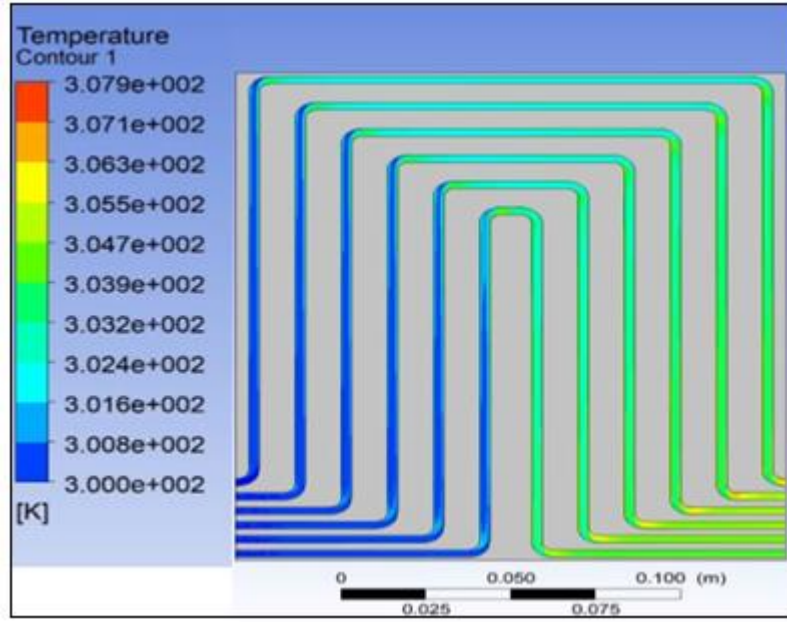


Şekil 3.3: Alüminyum plakanın batarya ile temas eden yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.

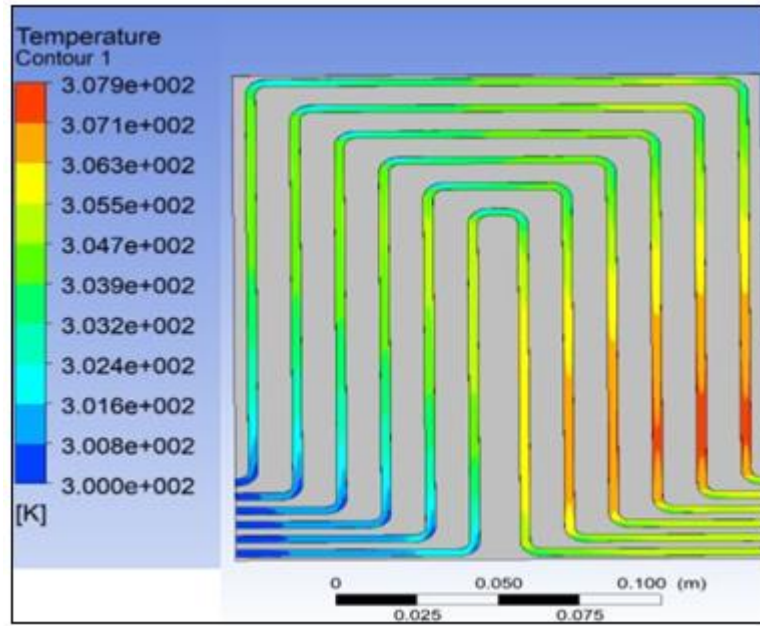


Şekil 3.4: Kanal akışı orta düzlemindeki basınç dağılımı.

Basınç farkı şekil 3.4'te 1 kpa seviyesinde olup maliyet açısından uygun seviyededir. Daha da önemlisi soğutma uygulaması için pompalama ihtiyacı soğutulan bataryadan karşılanacağı için düşük basınçlarda yüksek verimlilikle soğutma yapabilmek elektrikli araçlarda üzerinde durulması gereken önemli bir husustur. Bu çalışmada 1 kpa civarındaki basınç düşük güç gerektiren yeterli seviyede soğutma ihtiyacını karşılamıştır



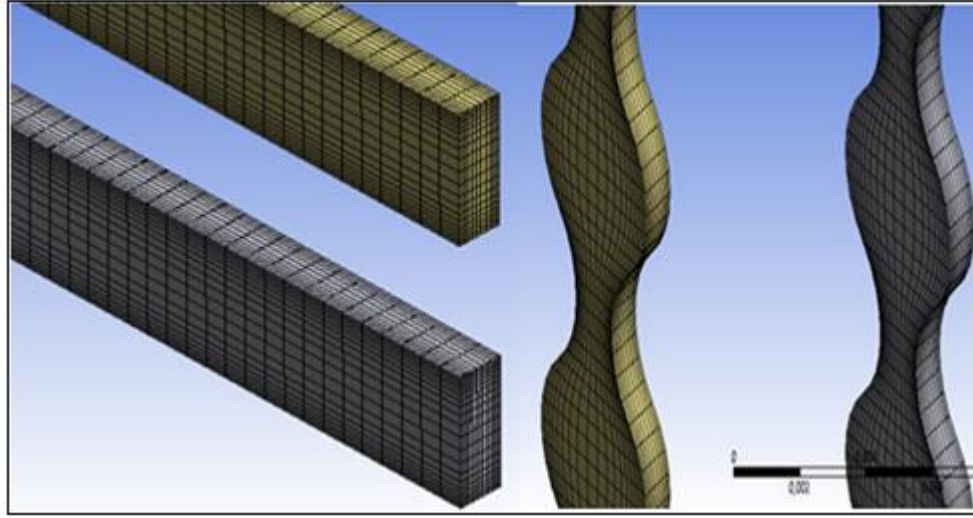
Şekil 3.5: Kanal akışı orta düzlemindeki sıcaklık dağılımı.



Şekil 3.6: Kanal akışı yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.5 ve şekil 3.6 arasındaki renklendirme farkı suyun yüzey sıcaklığı ile iç sıcaklığı arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır. Sıvı akışkanın kanal yüzey sürtünmelerinden dolayı radyal yönde merkeze doğru artan bir hız profiline sahiptir bu sebeple merkeze yakın bölgelerdeki sıvı hızı fazla olduğundan dolayı daha kısa süre ısıya maruz kalıp yüzeye yakın bölgelerdeki suya göre daha az sıcaklığı artacaktır. Bu hız profilinin etkisinden kaynaklanan sıcaklık değişiminden daha

verimli sonuçlar elde edebilmek için şekil 3.7de bu değişime uygun modellenmiş ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3.7: Dörtgen ve bombeli kanal içi suyun ağ yapısı.

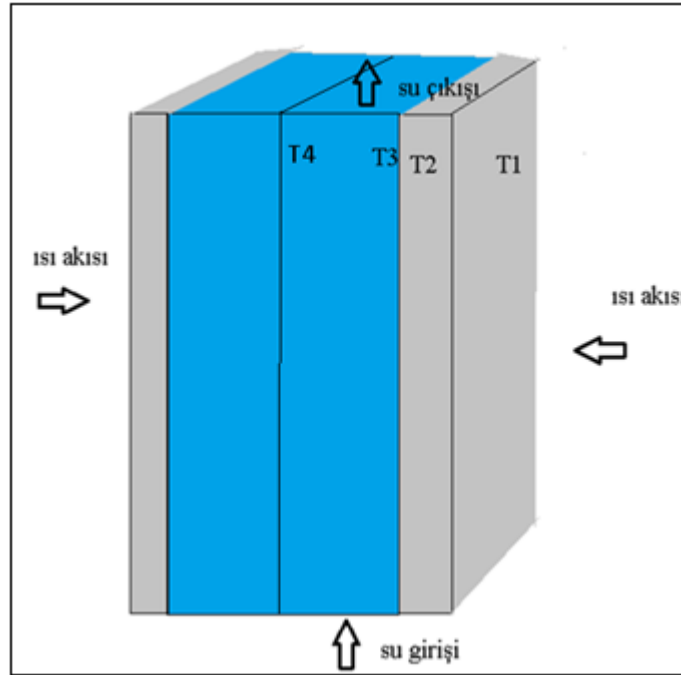
Bir başka sebebi ise iletimle olan ısı transferidir. Suyun yüzey sıcaklığından radyal yönde merkez sıcaklığına doğru aradaki mesafe boyunca lineer bir azalma görülecektir. Bir başka dikkat çekilecek husus ise suyun yüzey sıcaklığı kanalların dirsek bölgelerinden sonra ani düşüşe maruz kalmasıdır. Bunun sebebi yine suyun iç ve dış sıcaklığı arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Dönüş bölgelerinde sıcak bölge ile soğuk bölge karışıp sıcaklıkları dengelenmektedir. Suyun çıkış sıcaklık farkı ise 5 °C civarında olup radyatör sistemiyle soğutulabilecek aralıkta tutulabilmiştir. Tüm bu veriler Li-iyon bataryaların soğutma uygulaması için suyla taşınım yönteminin de çok etkili olduğunu göstermektedir. 6 kanal sayısına sahip alüminyum plaka gelecek bölümlerde elektrikli arabada kullanılması düşünülen orijinal ölçülerdeki batarya üzerinde denenmiştir.

3.4 Isı Transferini İyileştirme Çalışmaları

Bir önceki bölümde elde edilen simülasyonlara bakılarak kanal üzerine etkileyen üniform ısı etkisiyle akışın kanal çıkışı bölgelerinde etkisiz ısı transferi gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bataryadan aktarılan ısı sebebiyle kanal çıkışına doğru zamanla ısınan su o bölgelerde yeteri kadar ısı çekememekte ve bataryada üniform bir sıcaklık dağılımı sağlayamamaktadır. Batarya yüzeyinde bölgesel sıcaklık farkı 5°C'den fazla olması bataryanın ömrünü kısaltmakta ve performansını olumsuz etkilemektedir. Bu

sebeple bu bölümde bataryayı yüzeysel olarak 5°C yerel sıcaklık farkında tutmak için denenmiş tasarımlar üzerinde durulacaktır.

Tipik plakalar arası bir kanal akışında hem iletimle ısı transferi hem de taşınım ile ısı transferi olur. Şekil 3.8’de T1 batarya yüzeyine temas eden alüminyum plakanın sıcaklığını, T2 su ile temas eden alüminyum plakanın sıcaklığını, T3 suyun alüminyum plakaya yakın tarafının sıcaklığını ve T4 ise suyun orta kesitinin sıcaklığını temsil etmektedir. Bataryadan aktarılan ısı T1 sıcaklığının artmasına sebep olacak ve T2 ile arasında bir sıcaklık farkı oluşacaktır. Bu fark sebebiyle iletimle ısı transferi gerçekleşecektir. Bu transfer sebebiyle T2 sıcaklığının artması sonucu T3 sıcaklığıyla bir sıcaklık farkı oluşup T2 ile T3 arasında taşınım ile ısı transferi gerçekleşecektir. Daha sonra taşınım ile ısı transferi sonucu T3 sıcaklığının artmasıyla kısmen daha soğuk olan T4 sıcaklığına sahip kesite doğru yine ısı akışı söz konusudur.



Şekil 3.8: Sonlu hacimdeki kanal akışındaki ısı akısına maruz kalan yüzey konumları.

Böyle bir ısı transfer mekanizması sonucunda akışkan olarak kullanılan su zamanla ısınacak ve çıkış bölgelerinde yeteri kadar ısı çekemeyecektir. Ancak hem suyun $0.6Wm^{-1}K^{-1}$ civarında olan düşük iletimle ısı transfer katsayısı hem de hız profili nedeniyle suyun orta kesimindeki soğuk bölgelerinden yararlanılamamaktadır. Bu durumlar sebebiyle taşınım ile çekilen ısı su içerisinde

olan yağ benzeri akışkanlarda hız sınır tabakası ısıl sınır tabakaya göre daha çabuk büyür. Sonuç olarak hidrodinamik giriş uzunluğu ısıl giriş uzunluğundan daha küçüktür. $Pr \ll 1$ olan sıvı metaller gibi akışkanlar için tam tersi durum olur.

$$Pr = \frac{\text{Momentum yayılımı}}{\text{Isıl yayılım}} = \frac{\mu C_p}{k} \quad 3.15$$

Bir boru içinden ısıtılan veya soğutulan akışkan akarken şekil 3.10'da görüldüğü gibi sınır tabaka kalınlıklarının en küçük olduğu boru girişinde çeper kayma gerilmesi ve ısı transfer katsayısı en yüksektir ancak akışkan tam gelişmiş profile doğru ilerlerken giderek azalır. Bu sebeple borunun giriş bölgelerinde basınç düşüşü ve ısı akısı daha yüksektir ve giriş bölgesinin etkisi, bütün boruda ortalama sürtünme faktörü ve ısı transfer katsayısını her zaman artırır. Bu durumdan dolayı ısıl ve hız sınır tabakaları yapılan hesaplamalarda dikkate alınacaktır.

Hidrodinamik giriş uzunluğu genellikle boru girişinden itibaren kayma gerilmesinin dolayısıyla sürtünme faktörünün tam gelişmiş değere yüzde 2 kadar yaklaştığı uzaklık olarak alınır [59]. Laminer akışta hidrodinamik ve ısıl giriş uzunlukları sırasıyla yaklaşık olarak ;

$$L_{h,laminer} \cong 0.05ReD \quad 3.16$$

$$L_{t,laminer} \cong 0.05RePrD = PrL_{h,laminer} \quad 3.17$$

Türbülanslı akışta gelişigüzel çalkantılar süresince şiddetli karışma, genellikle moleküler yayılım etkilerini gölgeler, bu yüzden hidrodinamik ve ısıl giriş uzunlukları yaklaşık olarak aynı değerde ve prandtl sayısından bağımsızdır. Türbülanslı akış için hidrodinamik giriş uzunluğu ;

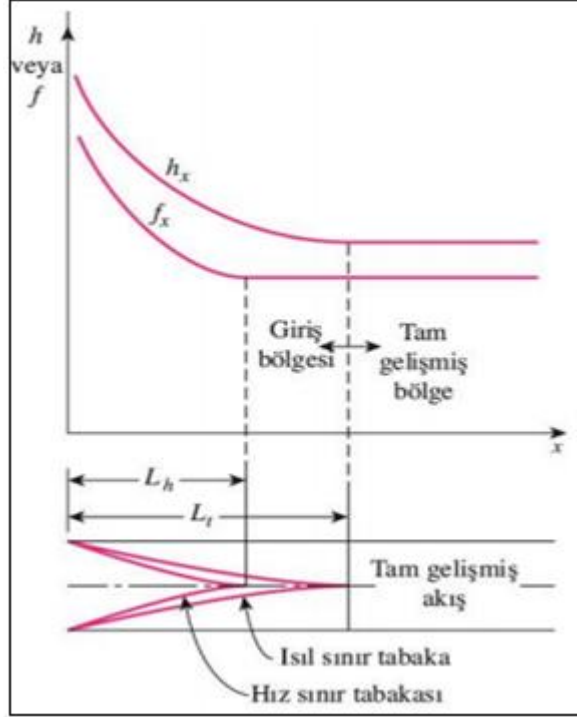
$$L_{h,türbülanslı} = 1.359DRe^{1/4} \quad 3.18$$

Bağıntısından bulunur. Türbülanslı akışta giriş uzunluğu daha kısa çıkmaktadır ve reynolds sayısına bağımlılığı daha azdır. Uygulamalarda çoğu boru akışlarında giriş etkileri çapın 10 katı kadar boru uzunluğunun ilerisinde önemsizleşir; hidrodinamik ve ısıl giriş uzunlukları yaklaşık olarak;

$$L_{h,türbülanslı} \cong L_{t,türbülanslı} = 10D$$

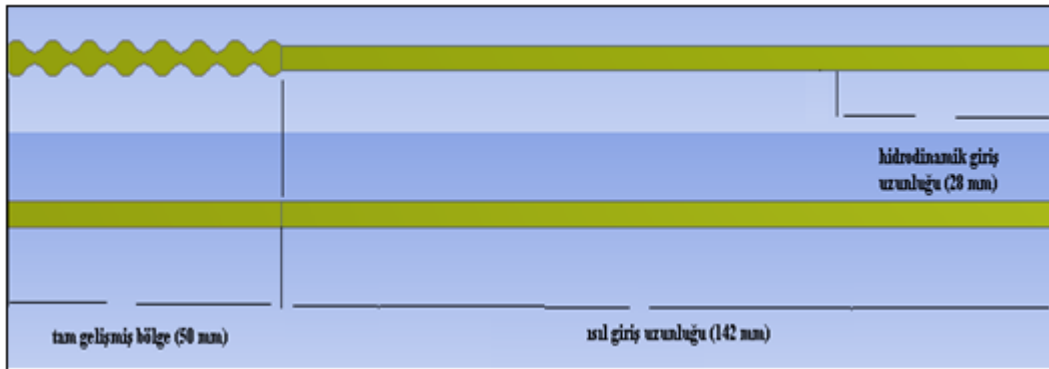
3.19

Olarak alınır.

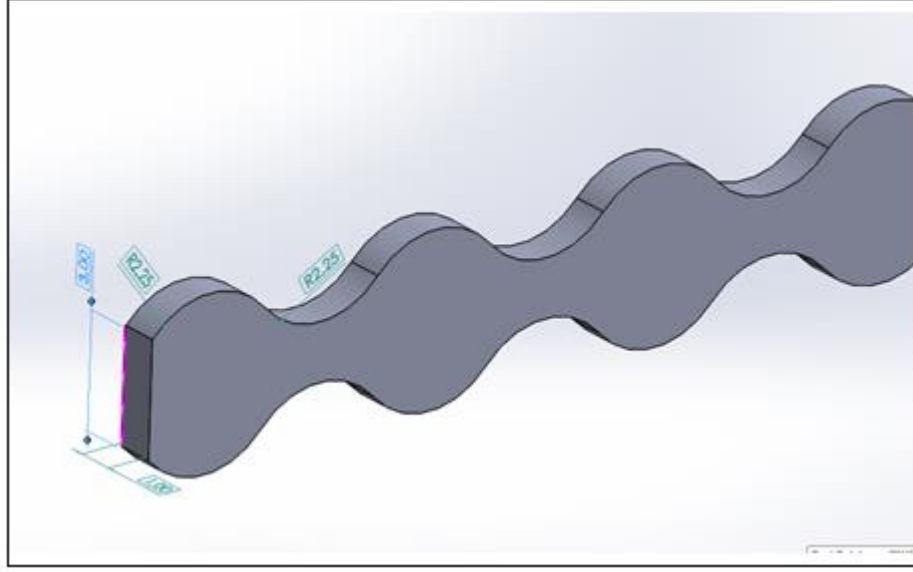


Şekil 3.10: Bir akışkanda ısı ve hız sınır tabakası gelişimi.

Şekil 3.11’de 2 farklı kanal kesit geometrisi sergilenmektedir. Kanal yapılarının ısı performansına etkisi sonlu analiz yöntemiyle ansys fluent programında simüle edilmiştir. . Bu geometrilerin her birinden aynı hızda su geçmekte ve herbirinin hidrolik çapları eşittir. Kanal ölçüleri tablo 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.11: Isı transferini artırmak amacıyla modellenmiş 2 boyutlu farklı kanal geometrileri.

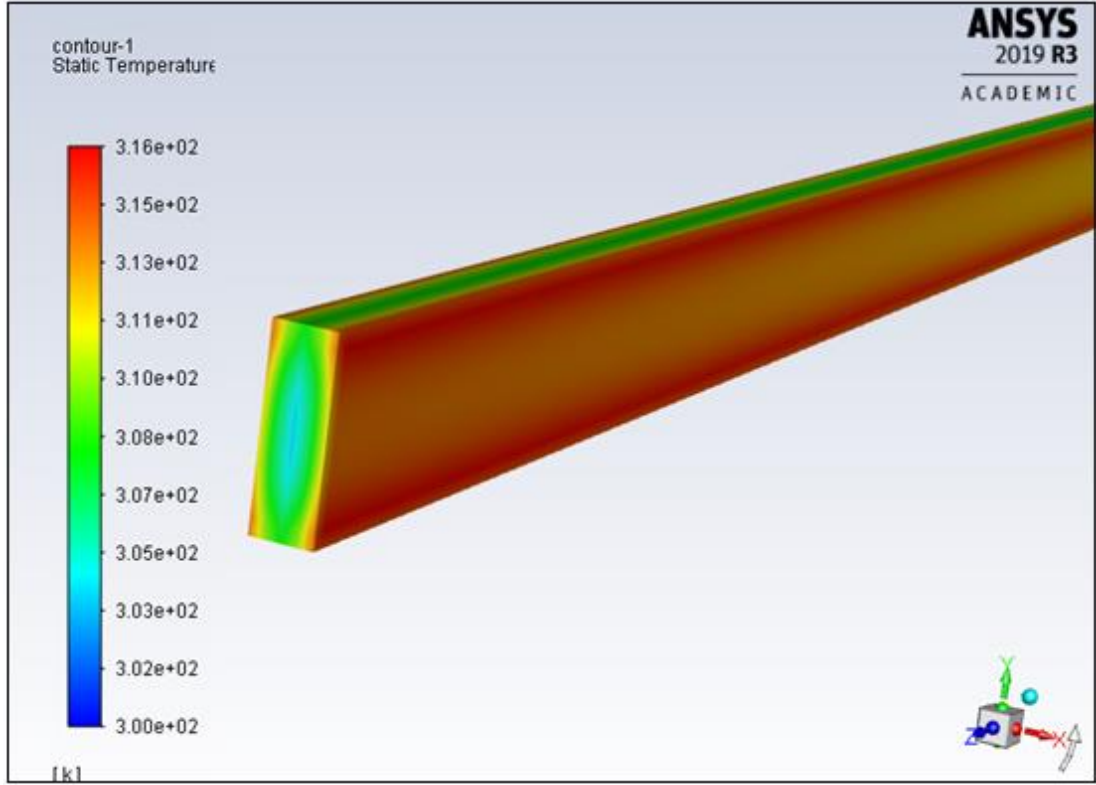


Şekil 3.12: Dalgalı tip kanal geometrisinin perpektif görünümü.

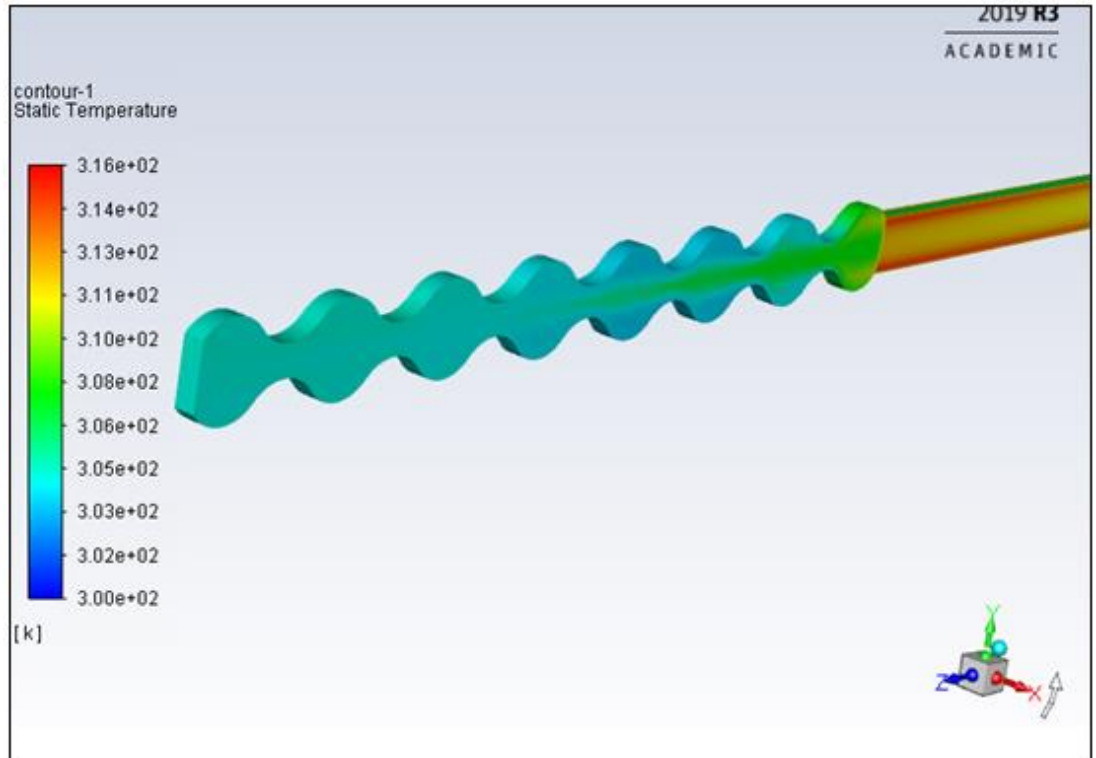
Tablo 3. 2 Isı transferini artırmak için modellenmiş kanal yapılarının geometrik ölçüleri.

Durum	Mikro kanal kesit eni (mm)	Mikro kanal kesit boyu (mm)	Dalga uzunluğu (mm)	Dalga yarıçapı (mm)	Hidrolik çap (mm)	Kanal uzunluk (mm)
Düz kanal	1	3	0	0	1.5	192
Türbülantörlü kanal	1	4.5-1.5	3.35	2.25	1.5	192

Bu geometrik ölçütlere sahip 2 kanal $20.000w/m^2$ 192 mm boyunca her iki geniş yüzeyi boyunca ısı akısına maruz bırakılmıştır. Bu senaryoda su kanala 0.25m/s hız ve 300 K sıcaklık ile girmektedir 2 farklı kanal yapısı termal performans bakımından incelenmiştir. .Elde edilen simülasyon görselleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Düz yapıdaki kanal akışında gerçekleşen sıcaklık dağılımı.



Şekil 3.14: Dalgalı yapıdaki kanal akışının sıcaklık dağılımı.

Elde edilen bu görseller doğrultusunda termal olarak dalgalı tip kanalın daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

Taşınım ile ısı transfer çalışmalarında toplam değişken sayısını azaltmak için ana denklemleri boyutsuzlaştırmak ve boyutsuz sayılar halinde gruplandırılan değişkenleri birleştirmek sık rastlanan bir uygulamadır.

$$\frac{\dot{q} \text{ taşınım}}{\dot{q} \text{ iletim}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{h D_h}{k} = \text{Nu} \quad (3.20)$$

Denklem 3.15'da h ile nitelendirilen taşınım ile ısı transfer katsayısını boyutsuzlaştırmak için elde edilen nusselt sayısında k akışkanın ısı iletkenliğini ve D_h kanalın hidrolik çapını temsil etmektedir. Nusselt sayısı taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranının bir sonucu olarak, o akışkan tabakasındaki iyileşmeyi gösterir. Nusselt sayısı ne kadar büyük olursa taşınım da o kadar etkili olur. Taşınım ile ısı transfer katsayısı;

$$h_{ort} = \frac{q A_{film}}{A_{kon}(T_{duv,ort} - T_{su,ort})} \quad 3.21$$

Geometrik düzenlemeler ile türbülans oluşturularak elde edilen bu termal iyileşmenin performans açısından ne kadar verimli olup olmadığına da bakılmalıdır. Literatürde Peclet sayısı olarak bilinen toplam verim;

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{\frac{1}{3}}} \quad 3.22$$

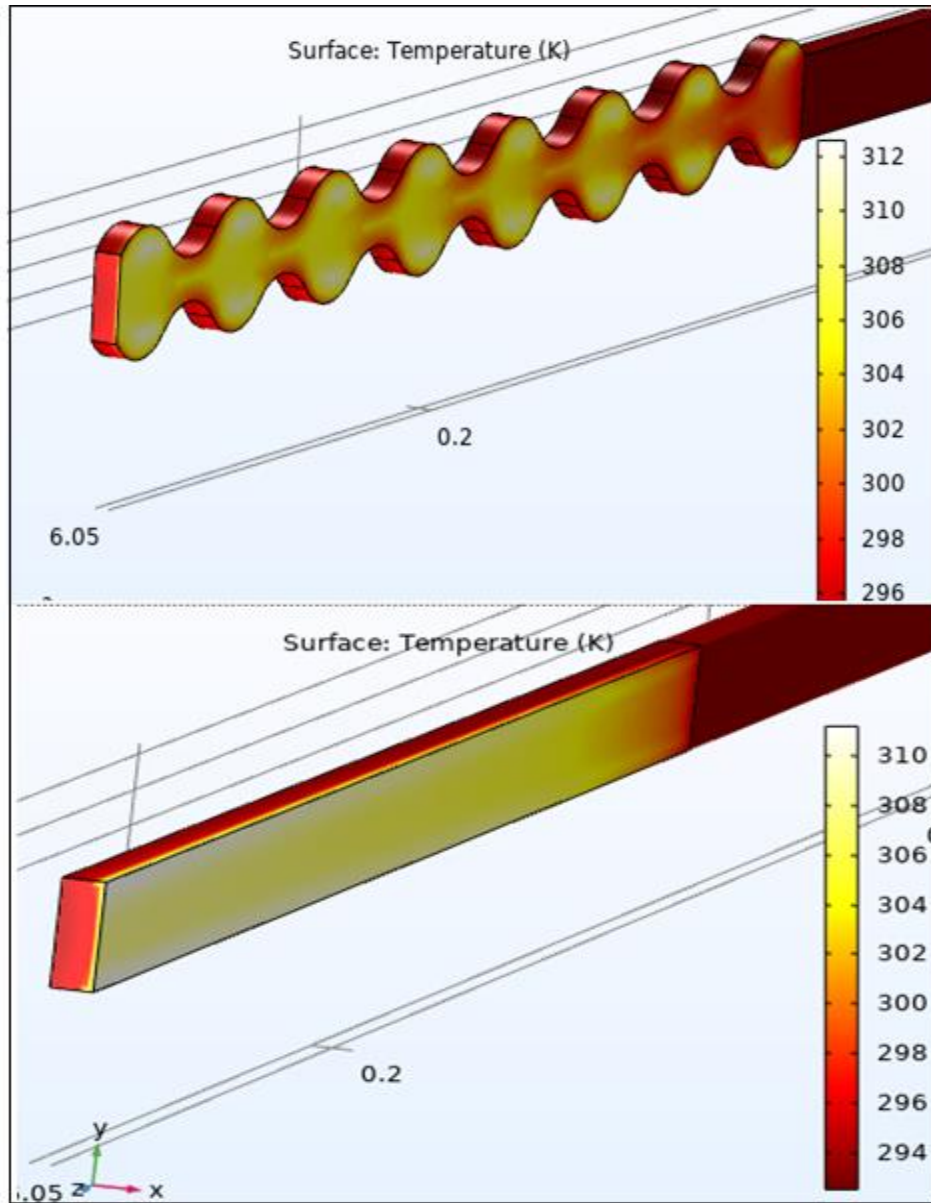
Nu_0 ve f_0 değerleri düz kanala ait nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı olup yeni modellenen kanal yapısına ait veriler de sırasıyla Nu ve f 'dir. Eğer verim 1'e yakın veya fazla ise ısı transferini arttırmak için yeniden düzenlenen geometrik tasarım ek basınç yükleri oluşmasına karşılık termal açıdan da verimlidir.

Kanal içi akışlarda sürtünme katsayısı;

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho L u_{ort}^2} \quad 3.23$$

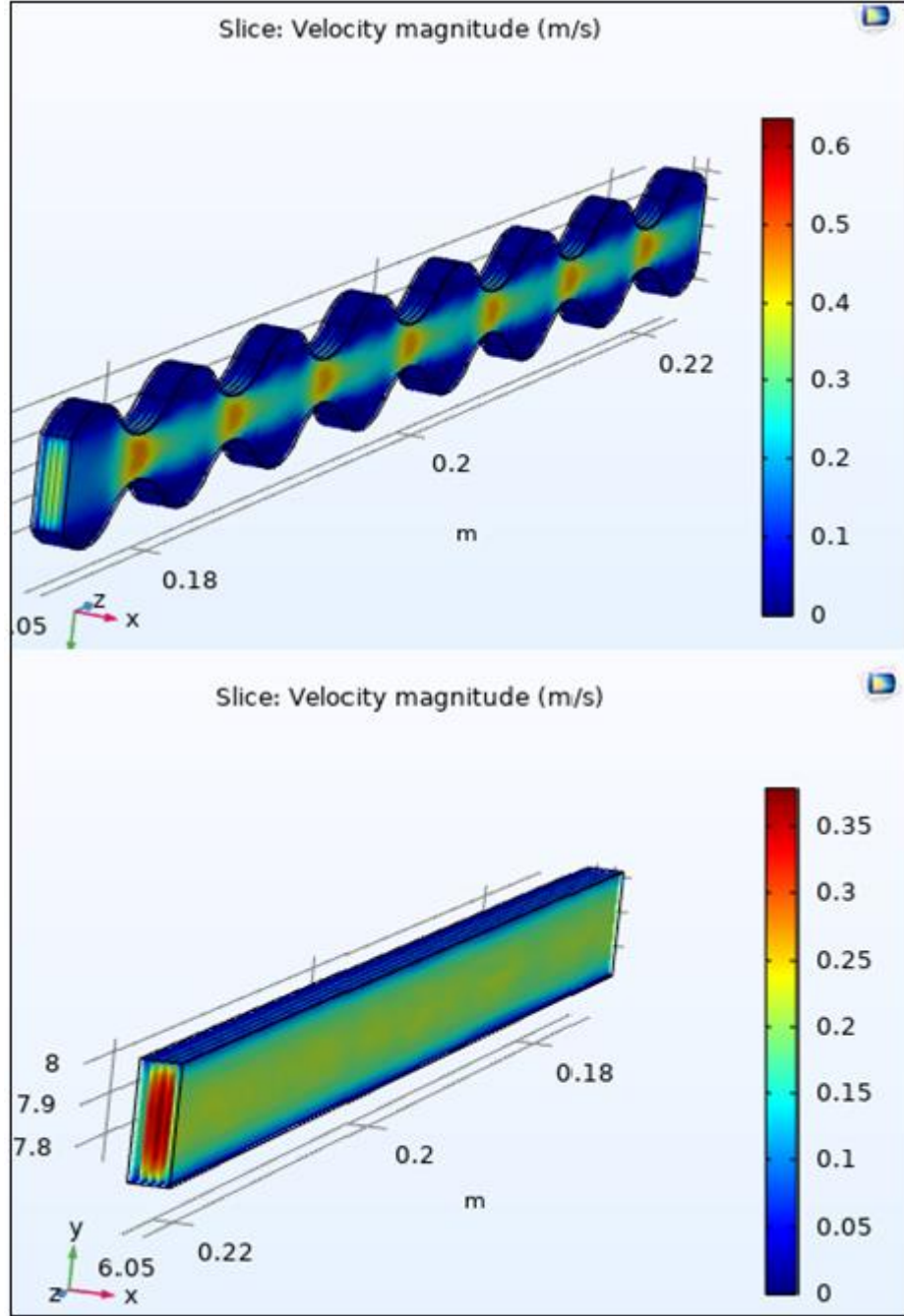
bağıntısıyla bulunur.

Dalgalı tip kanal yapısının termal performansı bir önceki simülasyon görsellerinden daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Ancak gerekli verilerin elde edilebilmesi için daha kapsamlı bir simülasyon hazırlanması gerekir. Bu simülasyonda ısı akısı 50000 w/m^2 olarak şekil 3.11 de belirli bölgeleri gösterilmiş su yapısının tam gelişmiş bölgesindeki tek yüzeyinden verilmiştir. Su giriş hızı 0.25 m/s ve reynolds sayısı 375 olan bu ısı transferi modellerinden elde edilen simülasyon görselleri ve sayısal sonuçları aşağıda verilmiştir

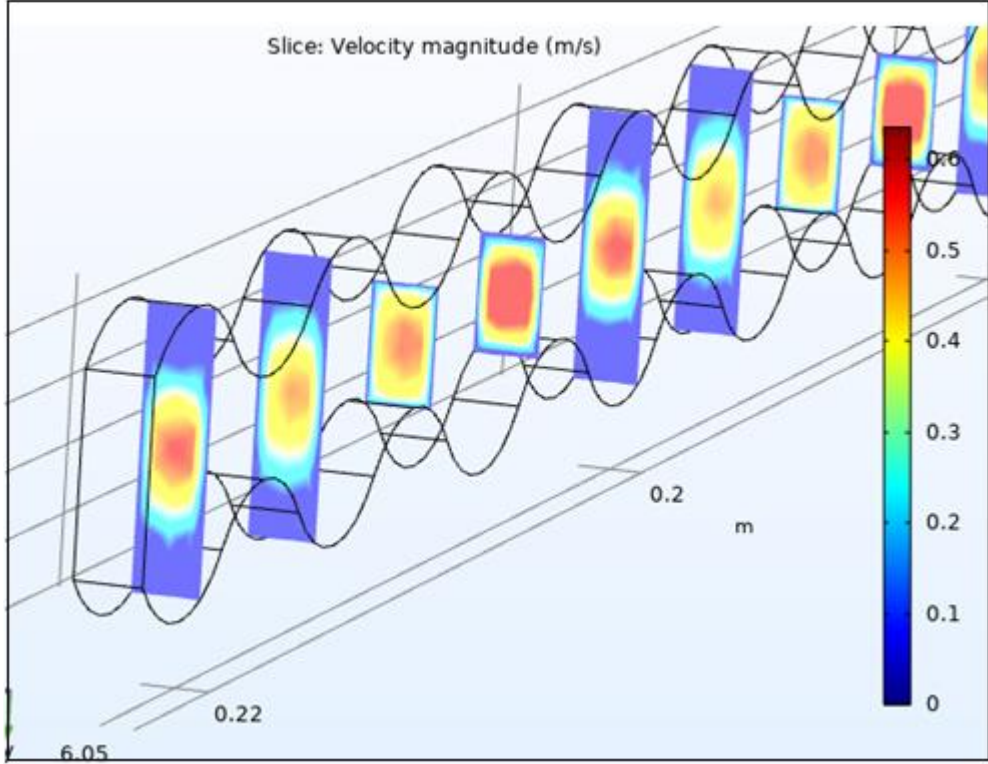


Şekil 3.15 Düz ve dalgalı tip modellerin sıcaklık dağılımları.

Daha doğru sonuçlar alınabilmesi için ısı akısı, akışın tam gelişmiş bölgesinden verilmiştir ve bu durum yukarıdaki şekillerden anlaşılmaktadır. Aynı ısı akısına sahip 2 modelden dalgalı tip olan model yüzey alanı fazla olmasından dolayı bir miktar daha fazla ısıya maruz kalmaktadır. Buna rağmen ısı akısının verildiği yüzeyin ortalama sıcaklığı dalgalı tip kanalda 303.8 K, düz kanalda 306.27 K olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.16: Düz ve dalgalı tip modellerin hız dağılımları.



Şekil 3.17: Dalgalı tip modelin hız kesit görünümü.

Düz kanal yapısında daha düzgün bir hız profili izlenirken, dalgalı tip kanalda daha karmaşık ve esnek aralıkta bir hız profiliyle karşılaşılmıştır. Bu durum hacimsel ortalama hızın türbülanslı bölgede 0.25 m/s' den daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Bu durum sürtünme katsayısı hesabında kullanılmıştır. Elde edilen sayısal veriler tabloda gösterilmiştir. Nusselt sayıları oranı 1.3 iken, hidrolik kayıp oranı 3.1, toplam verim ise 0.89 olarak hesaplanmıştır. Bu durum kanal yapısının dalgalı olmasının yol açtığı ek basınç yüklerine karşılık; eş bir oranda daha fazla ısı çekilebildiğini gösterir. Bu sebeple bu yapı ısı transferinin etkisiz olduğu bölgelerde kullanılmak üzere gelecek bölümde kombine simülasyonlarda denenecektir. Bu ısı iyileştirme çalışmaları Bayrak ve arkadaşları tarafından da denenmiştir.[60]

Tablo 3.3: Düz ve dalgalı kanal modellerinin sayısal analizleri.

	Düz Kanal	Dalgalı Kanal
Reynolds sayısı	375	375
Basınç Farkı (pa)	200	620
Ortalama hız (m/s)	0.25	0.25
Sürtünme katsayısı	0.192	0.595
Isı akısı verilen yüzeyin ortalama sıcaklığı (K)	306.27	303.8
Ortalama su sıcaklığı (K)	295.05	295.41
Isı akısı (w/m^2)	50000	50000
Isınan yüzey alanı (m^2)	150×10^{-6}	154.42×10^{-6}
Toplam yüzey alanı (m^2)	400×10^{-6}	422.42×10^{-6}
Ortalama taşınım ile ısı transfer katsayısı ($wm^{-2}K^{-1}$)	1671	2179
İletimle ısı transfer katsayısı ($wm^{-1}K^{-1}$)	0.6	0.6
Nusselt sayısı	4.18	5.45
Hidrolik kayıp oranı (f/f_0)	1	3.1
Isıl iyileşme oranı (Nu/Nu_0)	1	1.3
Toplam verim	1	0.89

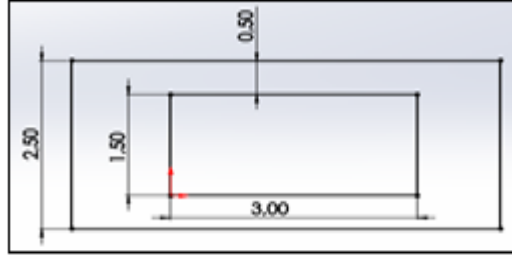
4.SOĞUTMA PLAKASININ TERMAL SİMÜLASYON SONUÇLARI VE OPTİMİZASYONU

Soğutma plakasına açılan kanal sayısı, olası kanal kesit ölçüleri ve suyun kanal içerisine giriş hızı belirlendikten sonra yetersiz soğuma bölgeleri için ısı transferini iyileştirecek kanal tasarımı bir önceki bölümde belirlenmişti. Isı ve akış uygulamalarında türbülator diye adlandırılan bu tasarımlar kanal içerisinde düz kanal tasarımına göre daha fazla basınç kayıplarına sebep olacaktır. Gelişigüzel kullanılması durumunda bataryadan fazlaca güç çekilmesine sebep olur ve bu durum bataryanın verimsiz kullanımına sebep olacaktır. Gerekli bölgelerde ve gerekli sayıda türbülator kullanılması için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) konusunda sonlu elemanlar metodu kullanılarak Ansys Fluent programında çözümlenmeler yapılmış ve elde edilen verilerle türbülatorlü kanal tasarımı verimli bir şekilde kullanılmış ve kanal kesit ölçüleri belirlenmiştir. Öncelikle 0.5x3mm, 1x3mm, 1.5x3mm su girişi kesitine sahip alüminyum plakaların düz kanallı ve türbülatorlü kanallarının simülasyonları yapılmıştır. Türbülatorler ısı transferinin yetersiz olduğu yerlerde modellenmiş ve etkisi gözlemlenmiştir.

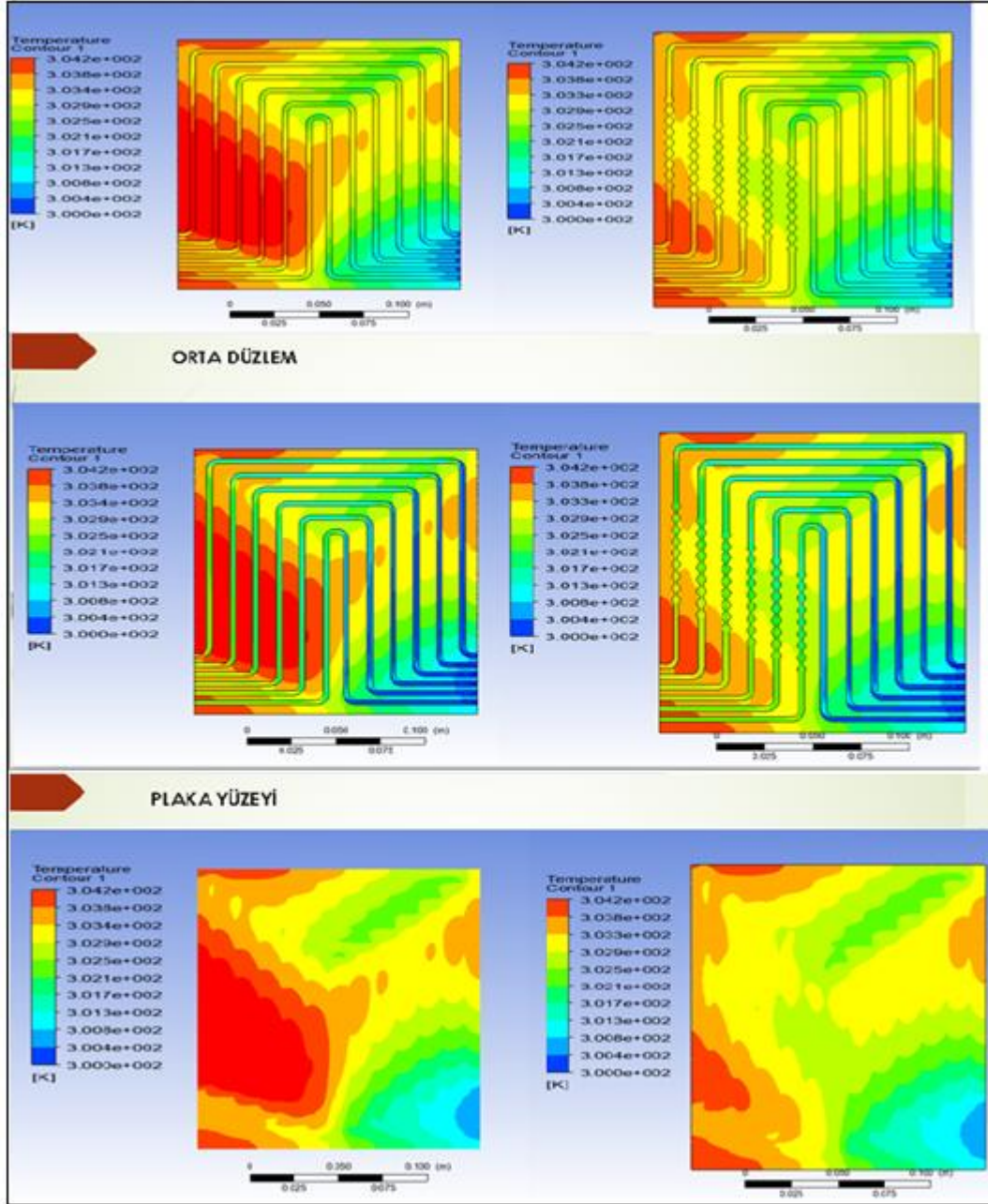
4.1 Suyun Kanal İçerisine Eşit Hızla Girmesi Modellenen Yaklaşım

6 kanallı olarak hazırlanmış soğutma plakasında bölgesel olarak oluşturulmuş türbülatorlerin ısı transferinde etkisinin daha net gözlemlenebilmesi için bu yaklaşım ile modeller simüle edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca bu gözlemler neticesinde türbülatorlerin oluşturacağı ekstra basınç verileri elde edilmiştir.

İlk olarak 1.5x3mm su giriş kesitine sahip, bir başka ifadeyle 2mm hidrolik çaplı alüminyum plakanın termal analizi yapılmıştır. Bu HAD probleminde suyun giriş hızı 0.25 m/s ve giriş sıcaklığı 300K olarak başlangıç şartları verilmiştir. Bu hız değerinde Reynolds sayısı 602 olduğu için akış laminer olarak çözdürülmüştür. Termal sonuçların görselleri Şekil 4.2’de ve sayısal veriler tablo 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: 1.5x3mm su girişi kesatine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.

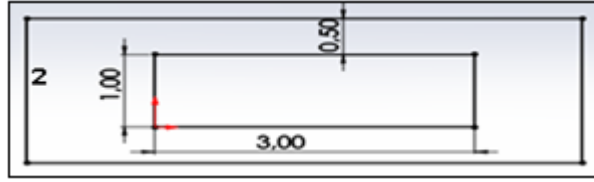


Şekil 4.2: 1.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları.

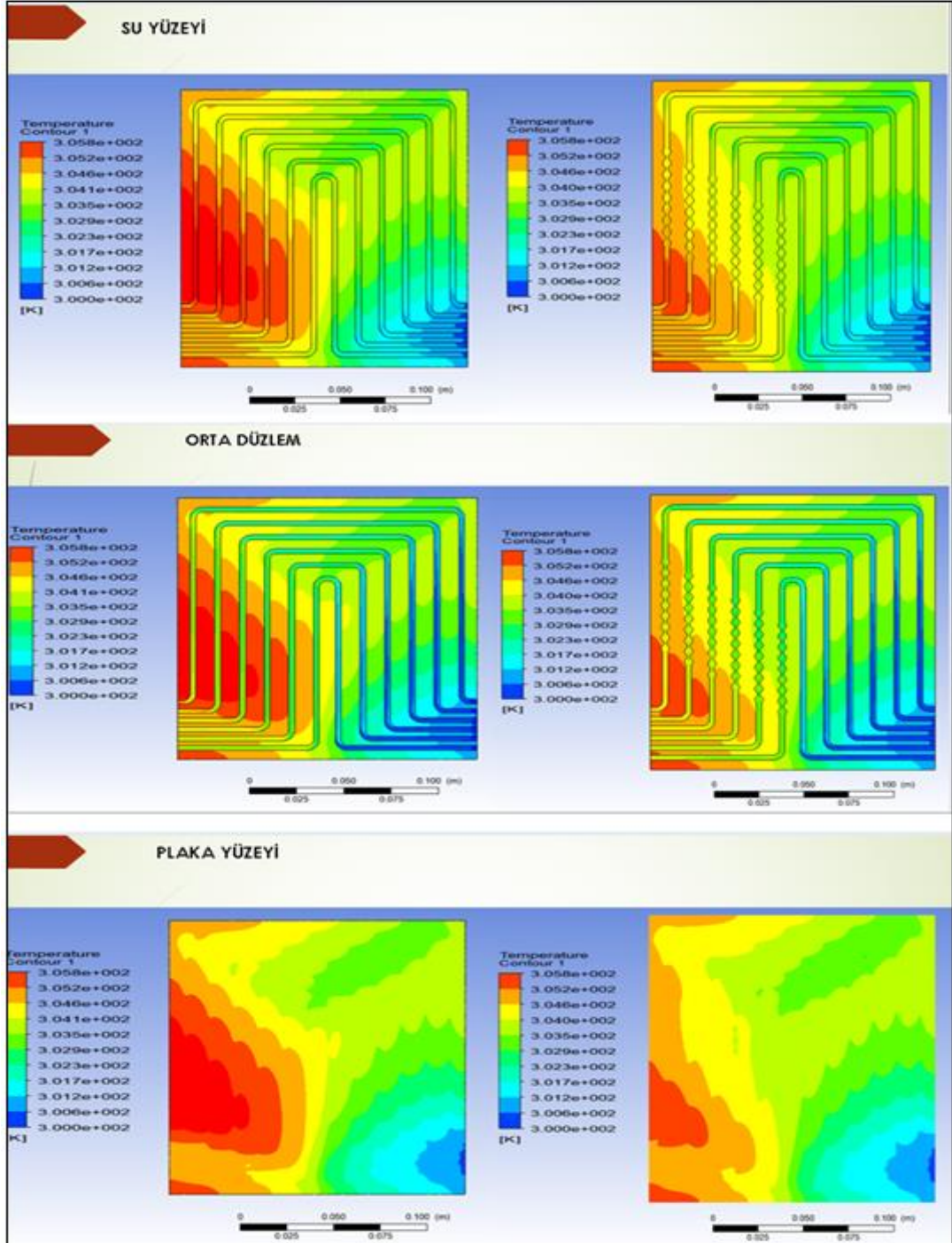
Tablo 4.1: 1.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.

	Türbülantörlü kanal	Düz laminer akışlı kanal
Bataryada oluşan maksimum sıcaklık (K)	304.18	305.20
Su giriş basıncı (Pa)	1360	939

Kanalın sağ alt köşelerindeki kanallardan plaka içerisine giren su sol bölgede yeteri kadar soğutma yapamamaktaydı. Şekil 4.2'den anlaşılacağı üzere eklenen türbülantörler sayesinde en sıcak bölgelerde ciddi bir dağılma gözlenmektedir. Düz kanal yapısına sahip plakada su yüzeyi orta düzlemdeki suya göre daha sıcaktır. Bu durumda orta düzlemdeki soğuk suyun potansiyelinden yararlanılamamaktadır. Eklenen türbülantör ısı kaynağına yakın su yüzeyinin sıcaklığını, ısı kaynağına daha uzak ve kısmen daha soğuk olan orta düzlemdeki suyun sıcaklığıyla dengelemiştir. O bölgelerdeki sıcaklıkta azalma ısı transfer kapasitesini artırmış ve batarya ile temas eden plaka yüzeyinin daha fazla soğumasını sağlamıştır. Türbülantör eklenmesiyle birlikte yaklaşık 420 Pa fazladan basınç oluşmuş buna karşılık bataryanın maksimum yüzey sıcaklığı 1.017 °C azalmıştır. Uzun ömürlülük ve performans açısından yerel sıcaklık farkı 5°C civarında olması istenen bataryada bir miktar daha fazla harcanan pompa gücü sarfiyatı ile bataryanın yerel sıcaklık dağılımını daha üniform olması sağlanmıştır. İkinci olarak 1x3mm su giriş kesitine sahip, bir başka ifadeyle 1.5mm hidrolik çaplı alüminyum plakanın termal analizi yapılmıştır. Bu HAD probleminde de suyun giriş hızı 0.25 m/s ve giriş sıcaklığı 300K olarak başlangıç şartları verilmiştir. Bu hız değerinde Reynolds sayısı 451 olduğu için akış laminer olarak çözdürülmüştür. Termal sonuçların görselleri Şekil 4.4'de ve sayısal veriler tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: 1x3mm su girişi kesitine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.

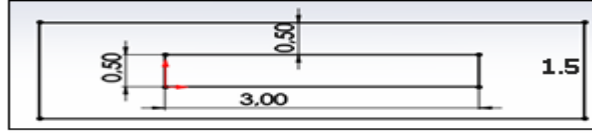


Şekil 4.4: 1x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları.

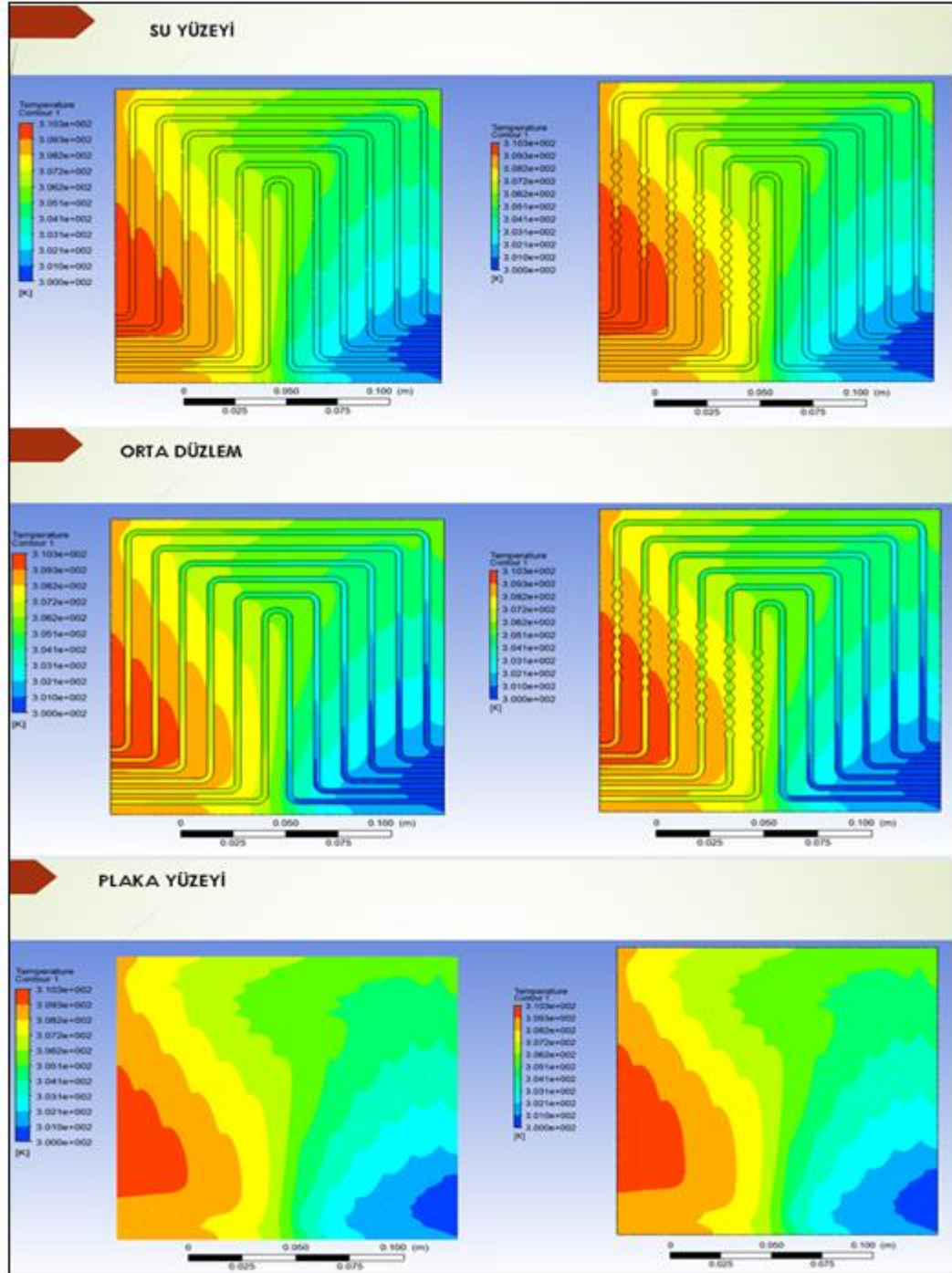
Tablo 4. 2 1x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.

	Türbülantörlü kanal	Düz laminar akışlı kanal
Bataryada oluşan maksimum sıcaklık (K)	305.76	306.51
Su giriş basıncı (Pa)	1973	1619

Kanal kesit alanının azalmasıyla birlikte akış debisi azalmış ve bu durum bir önceki simülasyona göre plakanın bir miktar daha ısınmasına sebep olmuştur. Ayrıca kanal kesit alanının azalması akışa karşı bir miktar daha fazla direnç oluşturmuş ve türbülantör eklenmesiyle birlikte plaka içerisinde basınç farkı 1973.167 Pa olmuştur. 2 kpa civarındaki bu basınç farkı pompalama maliyetleri için düşük seviyededir. Ayrıca türbülantörlü kanala sahip plakanın maksimum yüzey sıcaklığı minimum yüzey sıcaklığına göre farkı 5°C'den çok fazla olmaması bu kanal kesitinin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini gösterir. Son olarak 0.5x3mm su giriş kesitine sahip, 0.86 mm hidrolik çaplı alüminyum plakanın termal analizi yapılmıştır. Bu HAD probleminde de yine suyun giriş hızı 0.25 m/s ve giriş sıcaklığı 300K olarak başlangıç şartları verilmiştir. Bu hız değerinde Reynolds sayısı 178 olduğu için akış laminar olarak çözdürülmüştür. Termal sonuçların görselleri Şekil 4.6'da ve sayısal veriler tablo 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: 0.5x3mm su girişi kesatine sahip alüminyum plakanın kesit ölçüleri.



Şekil 4.6: 0.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin bölgesel olarak termal sonuçları.

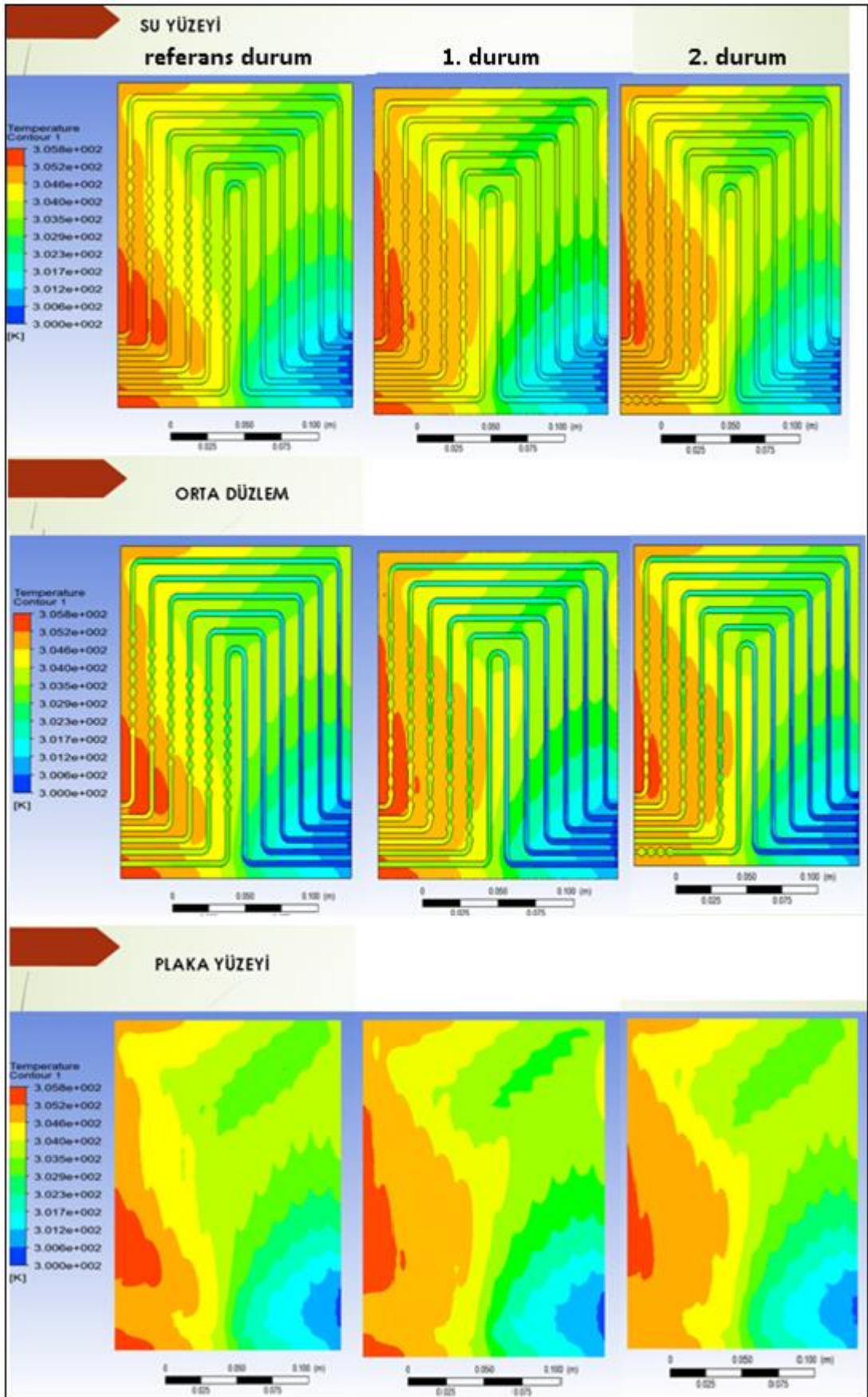
Tablo 4.3: 0.5x3mm kanal ölçülerine sahip alüminyum plakanın düz ve türbülantörlü modellerinin sıcaklık ve basınç sonuçları.

	Türbülantörlü kanal	Düz laminer akışlı kanal
Bataryada oluşan maksimum sıcaklık (K)	310.28	310.21
Su giriş basıncı (Pa)	5710	5156

Kanal kesit alanının daha da azalmasıyla birlikte orta düzlemdeki suyun sıcaklığı ile kanal çeperine temas eden yüzey sıcaklığı arasındaki fark yok denecek kadar azalmıştır. Bu sebeple türbülantör eklenmesi soğutma plakasının maksimum yüzey sıcaklığını düşürememiştir. Batarya ile temas eden soğutma plakasındaki yerel sıcaklık farkı 10°C civarında olup istenilen 5°C'lik sıcaklık farkından çok daha fazladır. Ayrıca türbülantörlü kanal içerisinde basınç farkı 5710,679 Pa bir önceki simülasyonlardan elde edilen basınç farklarına göre çok daha yüksek çıkmıştır. Bu simülasyondan elde edilen sonuç bataryadan pompalama gücü için çekilecek olan fazla enerjiye rağmen termal olarak istenilen sonuçların elde edilememiş olmasıdır. Bu sebeple 0.5x3 mm kesit alanına sahip alüminyum plaka batarya soğutma uygulaması için yetersiz bulunmuştur.

1.5x3 mm kesit alanına sahip alüminyum plaka termal olarak 1x3 mm alüminyum plakadan termal olarak daha iyi simülasyon sonuçları göstermiştir. Ancak 1.5x3 mm kesit alanına sahip alüminyum plakada 1x3 mm kesit alanına sahip alüminyum plakaya göre daha düşük basınç yükü çıkmasına karşılık, suyun kanal içerisinde dolaşmasını sağlayacak olan pompadan çekilecek olan enerji bu kesit ölçüleri için hemen hemen eşittir. Çünkü pompa gücü basınç yükü ve akışkan debisi ile doğrudan ilişkilidir ve doğru orantıya sahiptir. 1.5x3 mm kesit alanına sahip plakada daha düşük basınç yükü çıkmasına karşılık değerine göre daha fazla debiye sahiptir. Bu durum batarya paketini soğutmak için fazladan su ağırlığı anlamına gelir. Ayrıca büyük kesit alanına sahip plaka değerinden daha fazla ağırlık oluşturacaktır. Sistemin daha hafif olması için ve elde edilen simülasyon sonuçları bataryanın maksimum zorlanması halinde en kötü senaryoya göre oluşturulduğu için 1x3 mm kesit alanına sahip türbülantörlü alüminyum plaka referans alınmıştır.

Kırmızı bölge simülasyon sonuçlarında en sıcak bölgeyi temsil etmektedir. Türbülator kullanılmasına rağmen kırmızı alan tamamen dağılamamaktadır. Bu problemi çözmek için kullanılacak türbülatorlerin konumu ve sayısı önem teşkil etmez. Bu sebeple çeşitli kombinasyonlar denenmiştir. Sonuçlar şekil 4.7’de görülmektedir. Öncelikle türbülatorlerin sebep olduğu basınç yükünü azaltmak hedeflenmiştir. İlk olarak referans olarak kabul gören simülasyondan elde edilen basınç farkını azaltmak için kısmen daha soğuk bölgeden geçen kanaldaki türbülatorler kaldırılmış ve diğer kanallardaki türbülator sayısı azaltılmıştır. Ayrıca türbülatorler tüm sıcak kalan bölgeyi kapsayacak şekilde aralıklı olarak konumlandırılarak referans duruma göre sıcaklık değişimine bakılmıştır. Elde edilen simülasyon sonrasında su çıkış tarafında yer alan kanalın en sol tarafındaki 2 kanal arası yine kırmızı bölge olarak görünmektedir ama farkedilebilir bir değişim izlenmektedir. Daha sonra bu sıcak bölgeyi dağıtmak için bu son 2 kanaldaki türbülator sayısı artırıldı. En sol kanala kırmızı bölgeyi kapsayacak şekilde arda arda ve onun yanındaki kanala aralıklı olarak türbülatorler eklendi. Simülasyon sonucunda kırmızı bölgenin kaybolmadığı görülmektedir. Bu kanal kesit ölçülerinde ve ısı etkisinde en sıcak bölgelerde türbülator sayısını arttırmak yeterli olmamıştır..



Şekil 4.7: Türbülator sayısı ve konumunun bölgesel olarak sıcaklık üzerine etkisi.

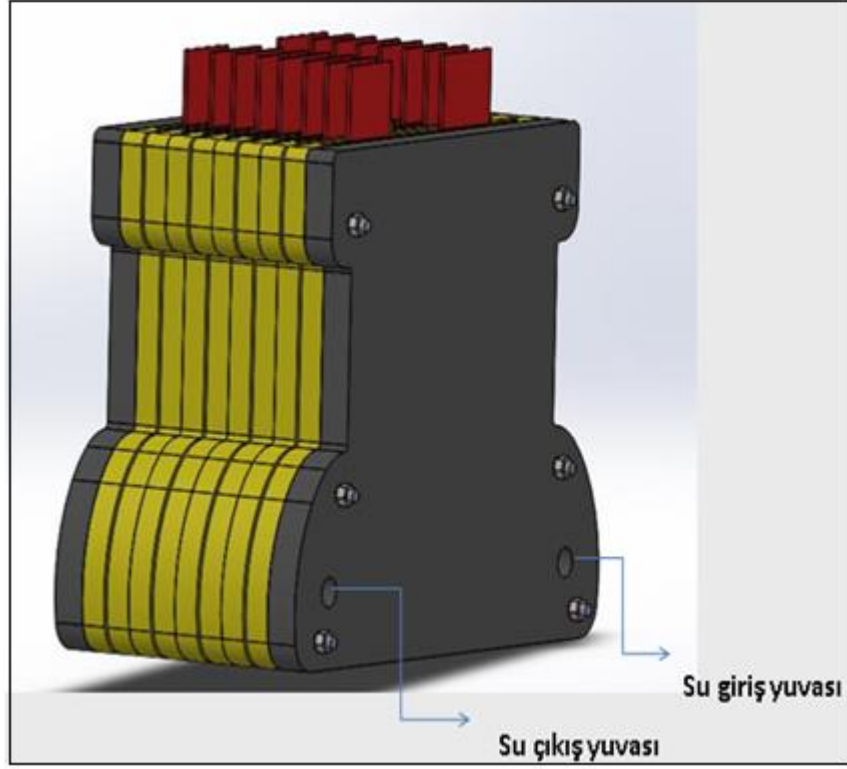
Daha üniform bir sıcaklık dağılımı elde edebilmek için sıcak bölgelerden daha fazla soğuk akışkan geçmelidir. Son 2 kanaldan geçen su debisi yeteri ölçüde arttırıldığı zaman sıcak bölgenin dağıldığı görülmektedir. Hem bu sayede kullanılan 6 kanalın giriş basınçları eşitlenebilir. Bu sebeple en sol kanalın kesit ölçüleri 1x3.5mm ve diğer kanal 1x3.2 mm olarak değiştirilmiştir. Son 2 kanalda fazlaca türbülator kullanmak o kanallarda akışa karşı daha fazla direnç oluşturmuştu. Bu durum suyun istenildiği gibi her bir kanala 0.25 m/s hızla girmesine engeldi. Kanal kesit ölçülerinin değiştirilmesiyle daha üniform sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve her bir kanalda oluşan basınç farkı dengelenmiştir.

Tablo 4.4: Soğutma plakasının kanal içi dengelenmiş su giriş basınçları.

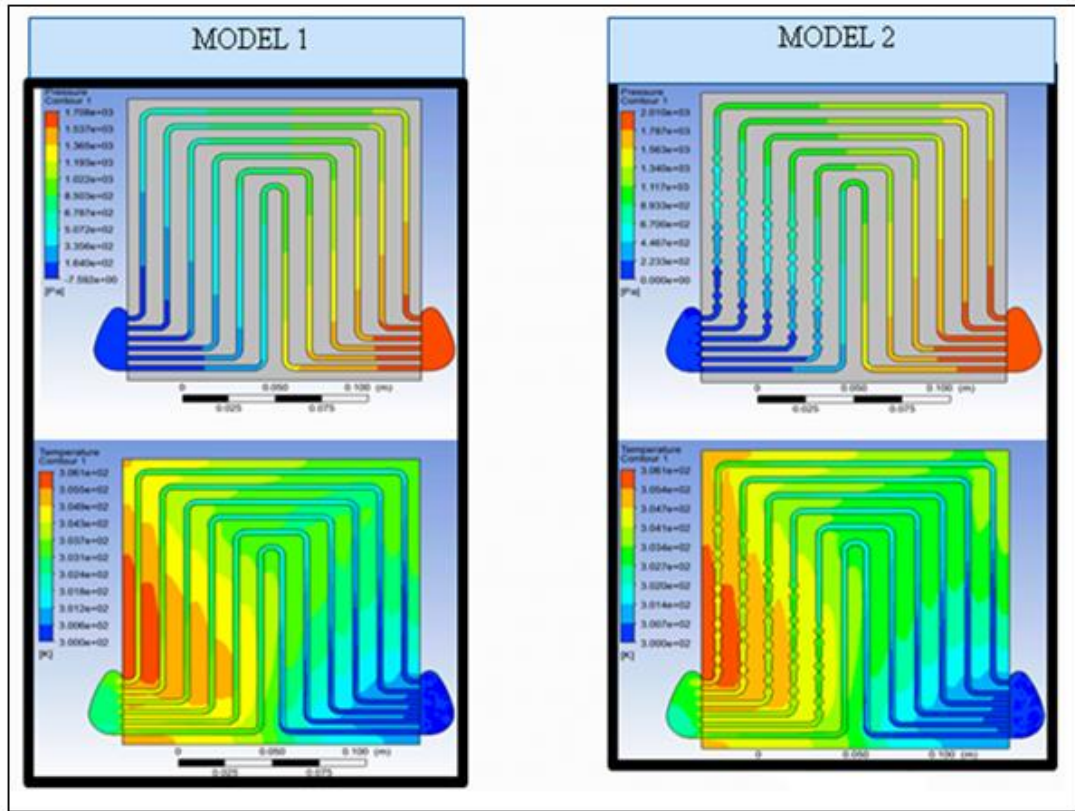
Kanal no	Kanal kesit ölçüleri (mm)	Basınç (Pa)
1. kanal	1x3.5	1955
2. kanal	1x3.2	1987
3. kanal	1x3	2024
4. kanal	1x3	1949
5. kanal	1x3	1965
6. kanal	1x3	1932

4.2 Suyun Manifold İçerisine Eşit Debiyle Girmesi Modeli Yaklaşımı

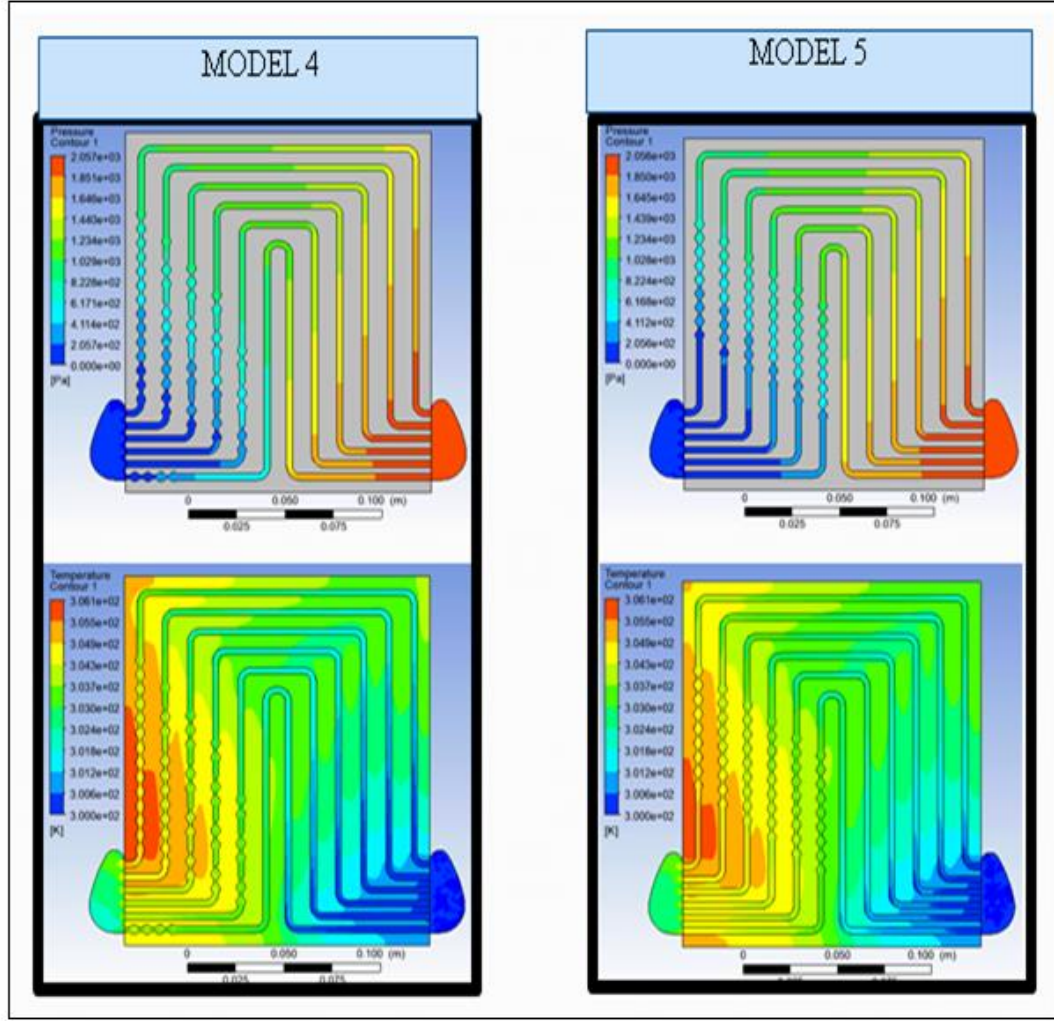
Bir önceki bölümde türbülatorların sayısı ve konumlandırılmasıyla oluşturulan modellerin toplam sıcaklık, bölgesel sıcaklık farkları ve basınç değişimleri irdelenmiş ve tasarımın olması gereken nihai hali belirlenmişti. Bu bölümde gerçek test koşulları ile modelleme yapılmış ve gerekli parametreler elde edilmiştir. 5 farklı modeldeki ısı-akış probleminde manifold içerisine eşit debilerle su gönderilmiş ve nihayetinde elde edilen en iyi tasarım daha sonrasında aspect ratio oranı değiştirilerek kıyaslama yapılmıştır. Su her bir kanal tasarımıyla oluşturulan sisteme 0.27 l/dk debi ve 300 K sıcaklık ile girmiştir.



Şekil 4.8: Su soğutmalı seri bağlı 8 batarya paketi.



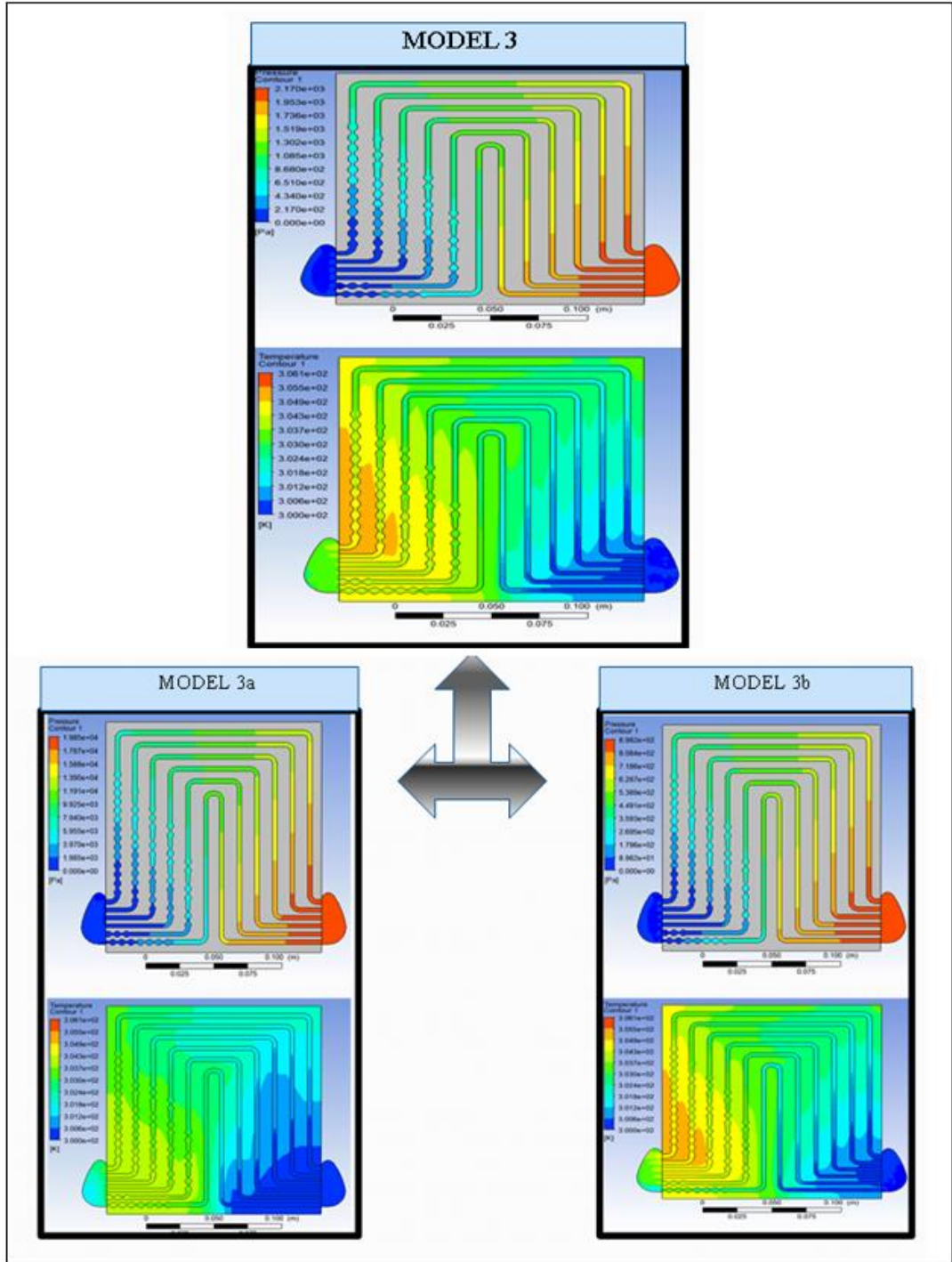
Şekil 4.9: Eşit debilerde su girişine sahip 1x3 mm kanal kesitine sahip Soğutma plakalarının türbülötör sayısı ve konumuna göre hazırlanmış model 1 Ve model 2'nin basınç ve sıcaklık dağılımları.



Şekil 4.9 ‘‘Devam’’ : Eşit debilerde su girişine sahip 1x3 mm kanal kesitine sahip soğutma plakalarının Türbülötör sayısı ve konumuna göre hazırlanmış model 4 ve model 5’in basınç ve sıcaklık dağılımları.

Yaklaşık olarak belirlenen suyun kanallara giriş hızı ile sistemde daimi akış çerçevesinde hesaplanan debi şekil 4.9’da gösterilen 4 model için uygulanmış ve simülasyon sonuçları gözlenmiştir. Sıcaklık ve basınç dağılımları izlenen bu simülasyon sonuçlarında sıcaklık kontörleri sayısal olarak hepsinde 300K ve 306.1K aralığında renklendirilmiştir. Model 1 de hiçbir türbülötör kullanılmadan 0.27/dk debi ile soğutma suyu ana manifold üzerinden kanallara dağıtılmış ve sıcaklık dağılımına bakılmıştır. Soğutma suyunun çıktığı en sol bölgede gözlemlenen kırmızı bölgede yeterli soğuma sağlanamadığını göstermektedir. Model 2’de su kanalları boyunca belirli bir miktarda ve aralıklarda türbülötör konulmuş ve sıcaklık dağılımında bir miktar değişim gözlenmiş ancak kritik bölge olan kırmızı bölgede dağılıma gözlenmemiştir. Model 5’te fazla ısınan sol bölgedeki tüm kanallara

aralıksız belirli bir miktarda türbülator konulmuş ancak yetersiz görülmüştür. Model 4'te ise model 3'e kıyasla diğer kanal hatlarındaki türbülatorlere kanal boyunca sayı ve konum bakımından fazla değişiklik uygulanmadan sadece kritik bölgedeki kanal hattına boydan boya türbülator konulmuş ve kırmızı bölgede bir miktar dağılım gözlenmiştir. Seçilen en iyi tasarım geometrisi olan model 3'te ise model 4 tasarımı baz alınarak kritik bölgede yer alan en soldaki 2 kanala konulan türbülator çapları belirli bir miktar genişletilmiş ve kırmızı hattın dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca çıkış manifolduna yakın bölgedeki konuma model 4'ten daha fazla türbülator konularak sarı bölgenin dağılması da sağlanmıştır.



Şekil 4.10: Eşit debilerde su girişine sahip Soğutma plakalarının kanal derinliğine bağlı (0.5, 1, 1,5 mm) basınç ve sıcaklık dağılımları.

Gösterilen 5 model 1 mm kanal derinliğine sahip alüminyum plakalarıdır. En iyi termal simülasyona sahip olan model 3 tasarımı şekil 4.10'da 0.5 mm ve 1.5 mm kanal derinliğinde tekrardan simüle edilmiş ve sonuçları gözlenmiştir. 0.5 mm kanal derinliğine sahip model 3a tasarımı çok daha iyi termal performansa sahip olmasına

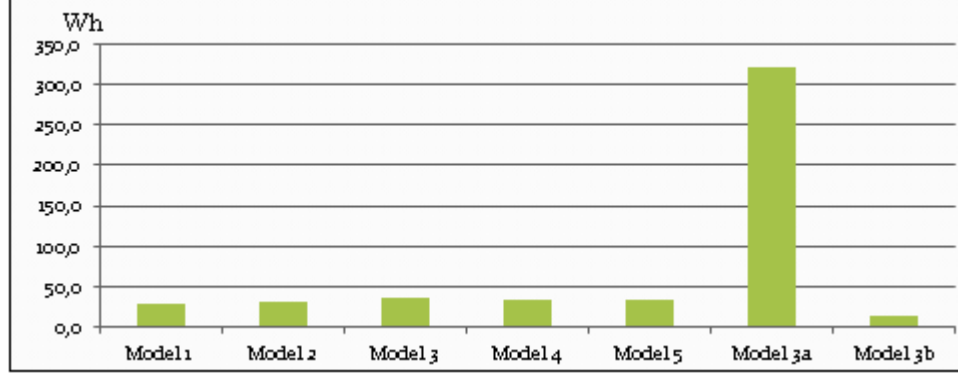
karşın basınç yükü bakımından model 3'e kıyasla en az 8 kat fazla enerji sarfiyatına neden olmaktadır. 1.5 mm kanal derinliğine sahip model 3b ise termal olarak fazla bir değişim göstermemekle beraber basınç yükü bakımından da diğerlerinden daha az enerji sarfiyatına sebep olduğu görülmektedir. Ancak 1.5 mm kalınlıktaki bu plakalardan elektirikli bir arabada çok sayıda kullanıldığı düşünülürse oluşturacağı fazladan ağırlıktan kaçınılmıştır. Bu simülasyonların en kötü senaryoya göre yani batarya sürekli tam güçte çalıştığı varsayımıyla hazırlanan bu simülasyonlarda tüm bu durumlar irdelendiğinde model 3 tasarımı hem termal hem de bataryadan çektiği güç bakımından en ideal sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Aşağıda tablo 4.5'te modellerin sayısal sonuçları verilmiştir

Tablo 4.5: Tasarlanan modellerin kanal giriş basınçları ve maksimum yüzey sıcaklıkları.

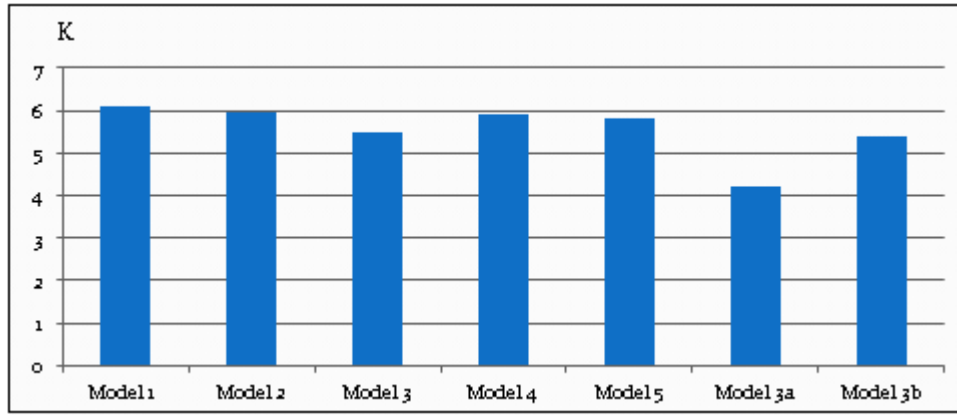
Model	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Kanal giriş basıncı (Pa)	1708	2002	2169	2057	2054
Bataryada oluşan maksimum sıcaklık (K)	306.12	305.97	305.48	305.92	305.83

Model	Model 3 (1 mm)	Model 3a (0.5 mm)	Model 3 b (1.5 mm)
Kanal giriş basıncı (Pa)	2169	19814	898
Bataryada oluşan maksimum sıcaklık (K)	305.48	304.23	305.41

Elde edilen bu sayısal verilere dayanarak bu modellerin saatte tüketeceği enerji ve maksimum zorlanma durumunda batarya yüzeyinde oluşacak sıcaklık farkı şekil 4.11 ve 4.12'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.11: Soğutma plakası modellerinin saat bazında enerji tüketimi.

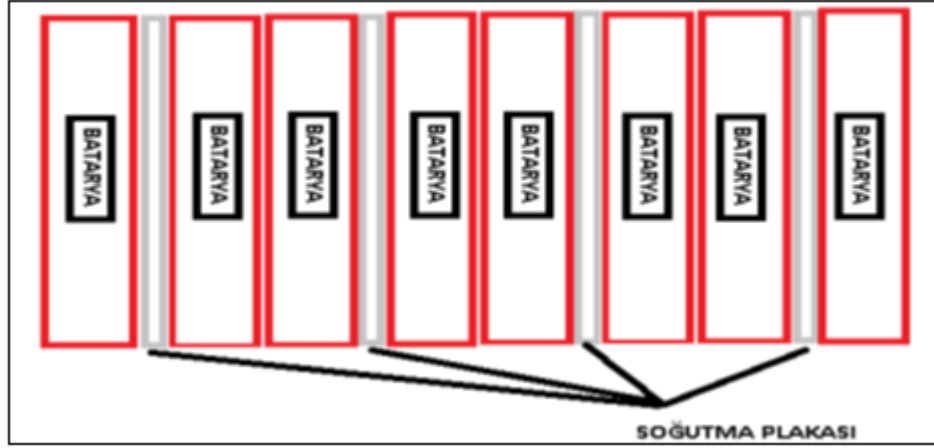


Şekil 4.12: Soğutma plakası modellerinin bölgesel maksimum sıcaklık artışı.

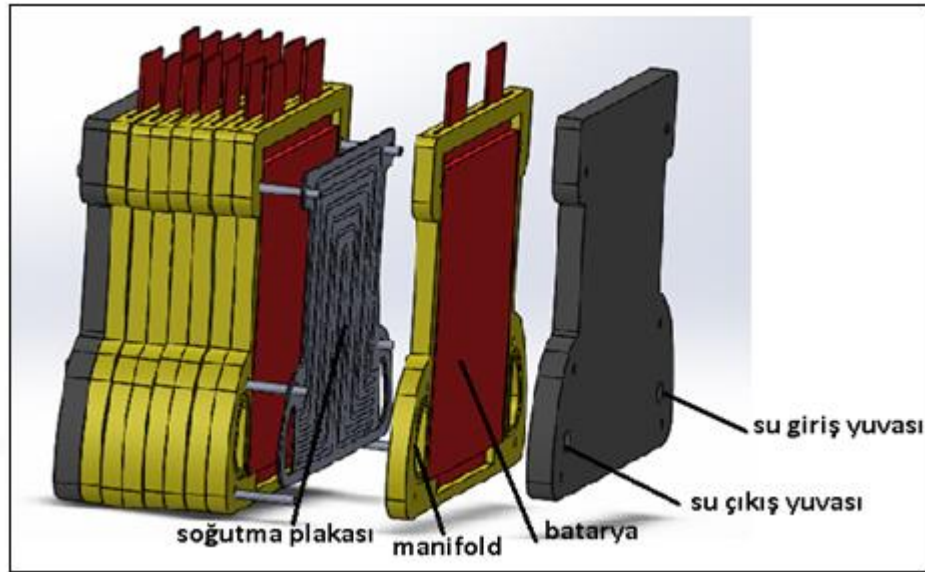
4.3 Geliştirilmiş Nihai Soğutma Plakası Modelinin Seri Bağlı Batarya Paketi İle Ortak Çalıştırılmış Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada analizleri yapılan lityum iyon batarya 3.5 V nominal voltaj değerinde ve 30 amper-saat kapasiteye sahip prizmatik bir batarya modelidir. Elektrikli arabada kullanılacak güçlü bir elektrik motoru tasarım kriterlerine göre yüksek voltaj değerlerinde faaliyet gösterebilir. Bu sebeple istenilen 240 volt üstü değerlere ancak bataryaların seri olarak bağlanabilmesiyle ulaşılabilir. Bu çalışmada 8 adet batarya seri bağlanarak bir paket oluşturulmuştur. Arzu edilen yüksek voltaj değerine 8’li paketler de yine seri olarak bağlanılarak ulaşılabilir. Yapılan bu tasarımda seri olarak bağlanan bataryaların soğutulmasını gerçekleştirecek olan yapıların tasarımları oluşturulmuş ve hem bataryanın hem de soğutma sisteminin koordineli çalışması sağlanmıştır. Her paket sorunsuz bir şekilde soğutma

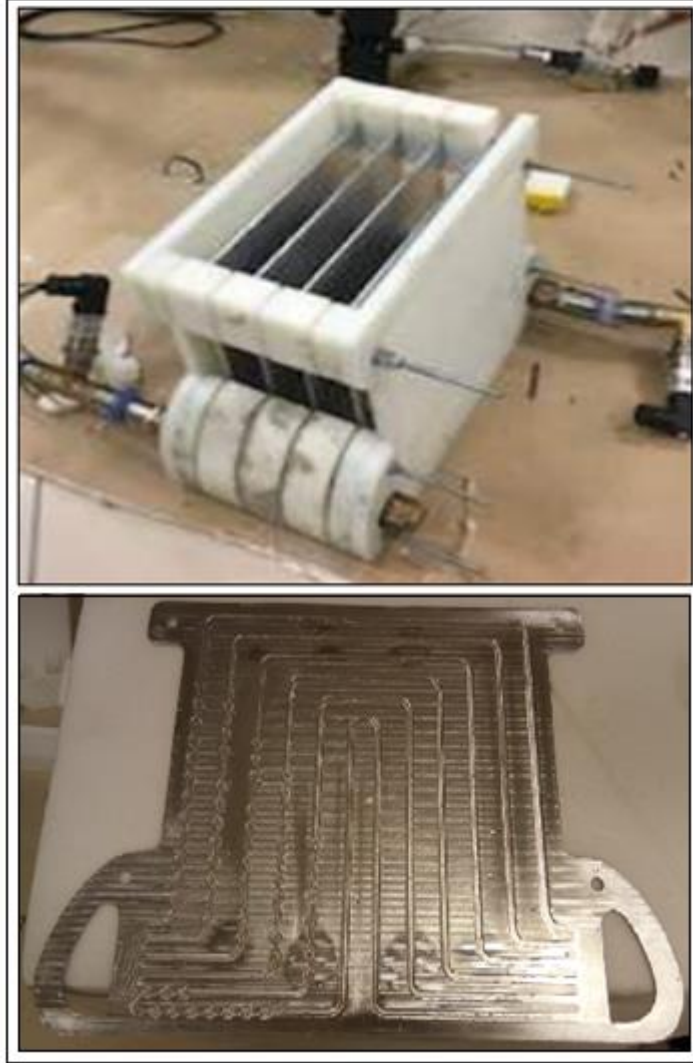
uygulamasını devam ettirmek için diğerk bir 8'li bataryapaketi ile bağlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Paket her 2 bataryaya 2 soğutma plakası temas edecek şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 4.13 ve 4.14'te bataryaya ve soğutma kanallarının paket içerisinde konumları ve nasıl yerleştirileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.13: Bataryapaketi-soğutma plakası dizilimi.

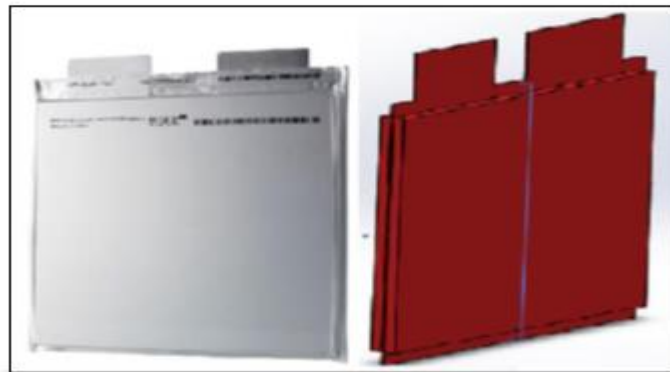


Şekil 4.14: Tasarlanan Bataryapaketinin Montaj Resmi.



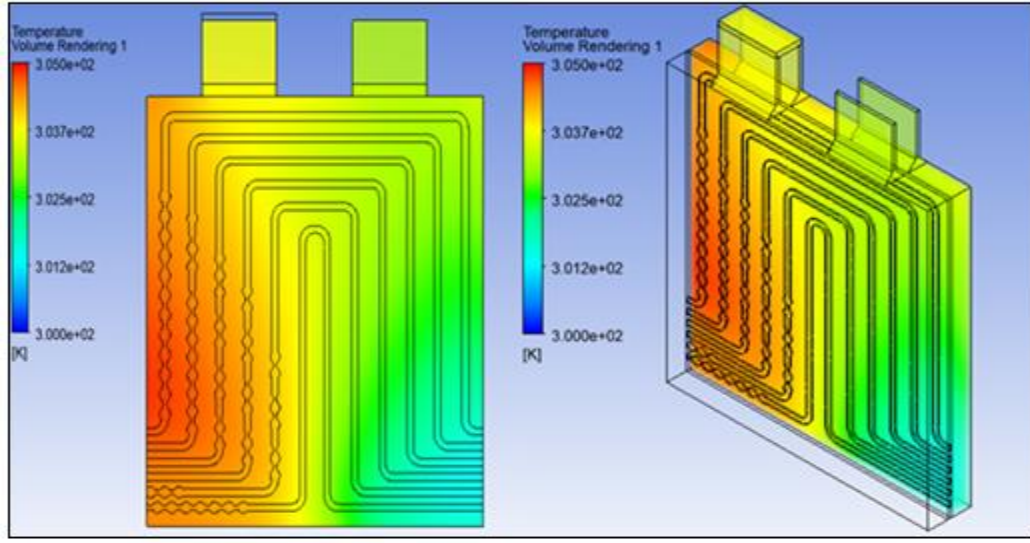
Şekil 4.15: Tasarlanan batarya soğutma sisteminin prototipi.

170 mm en, 220 mm boy ve 11.95 mm kalınlığa sahip prizmatik lityum iyon bataryanın cad çizimi ve gerçek modeli şekil 4.16 da görülmektedir.

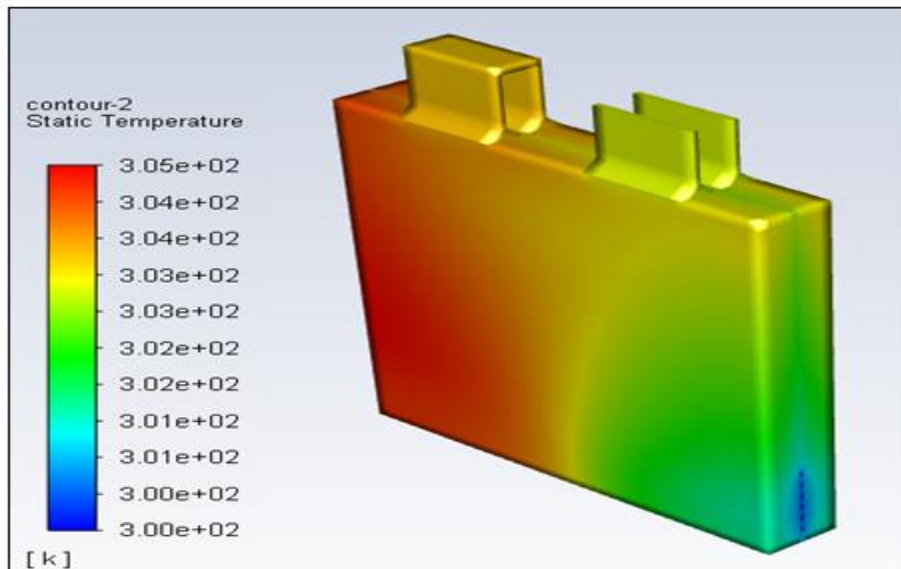


Şekil 4.16: Tasarım ve modellemesi yapılan 30Ah li-ion batarya.

Yapılan analizler neticesinde elde edilen tasarım model 3 olarak belirlenmiştir. Model 3 önce bilgisayar ortamında seri bağlı 2 bataryaya daha sonra 8 bataryaya uygulanmıştır. 2 batarya arasına konulmuş olan soğutma plakası bataryanın 70 Amper deşarj durumunda ürettiği ısıyı aynı simülasyon içerisinde soğutmaya çalışmıştır. Sıcaklık dağılımının kesit görünümü ve 3 boyutlu görünümü şekil 4.17 ve 4.18’de gösterilmiştir.

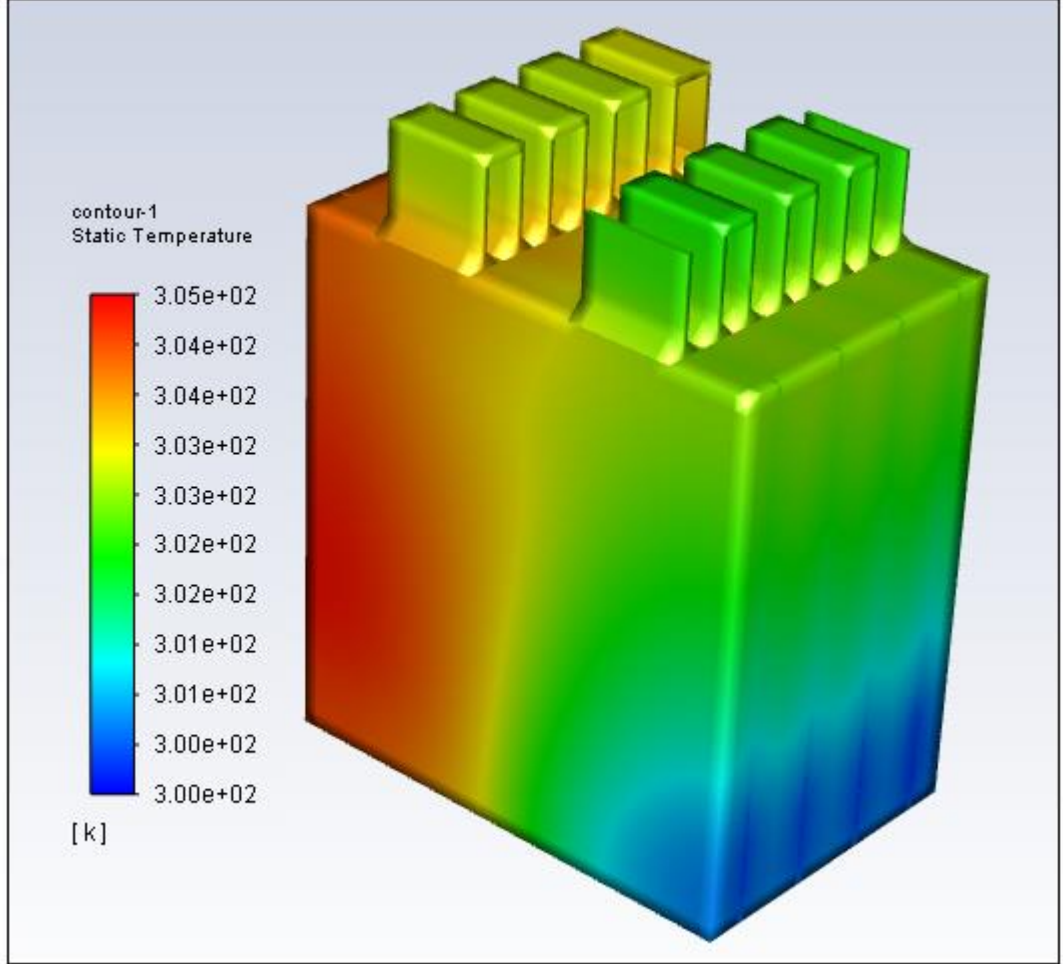


Şekil 4.17: 2 seri bağlı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımlarının kesit görünümü.



Şekil 4.18: 2 seri bağlı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının 3D görünümü.

Daha sonra model 3 tasarımı daha önce belirtilen şekilde 8'li seri bağılı batarya paketine konumlandırılmış ve termal sonuçları şekil 4.19' da verilmiştir.



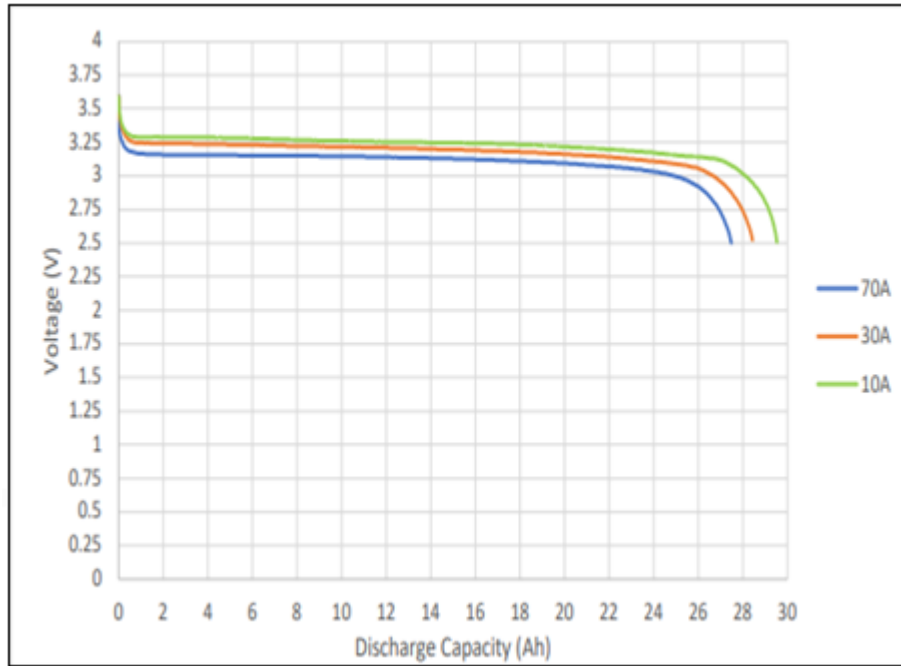
Şekil 4.19: 8 seri bağılı bataryanın tam kapasite çalışması sırasında soğutma plakası ile soğutulması sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının 3D görünümü.

5. TEST SONUÇLARI

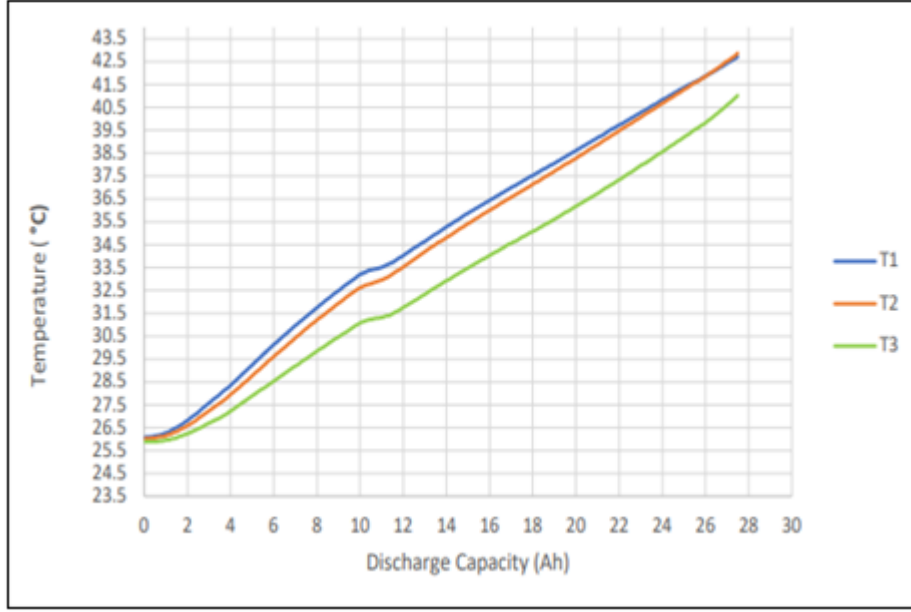
Bu bölümde gerçekleştirilen testler için parametreler; sıcaklık, gerilim, akım, zaman olarak belirlenmiştir. Batarya testleri için PowerXtra markasının 30Ah'lik bataryası seçilmiştir. Bataryaya test cihazında sırasıyla 10A,30A,70A deşarj akımı uygulanarak ve maksimum gerilim değeri 3.6V'dan minimum gerilim değerinden 2.5V'a kadar inilmiş ve bu işlemler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Deşarj Kapasitesi-Gerilim, Deşarj Kapasitesi-Sıcaklık grafikleri elde edilmiştir.

5.1 Doğal Konveksiyonel Soğuma Etkisinde Test Sonuçları

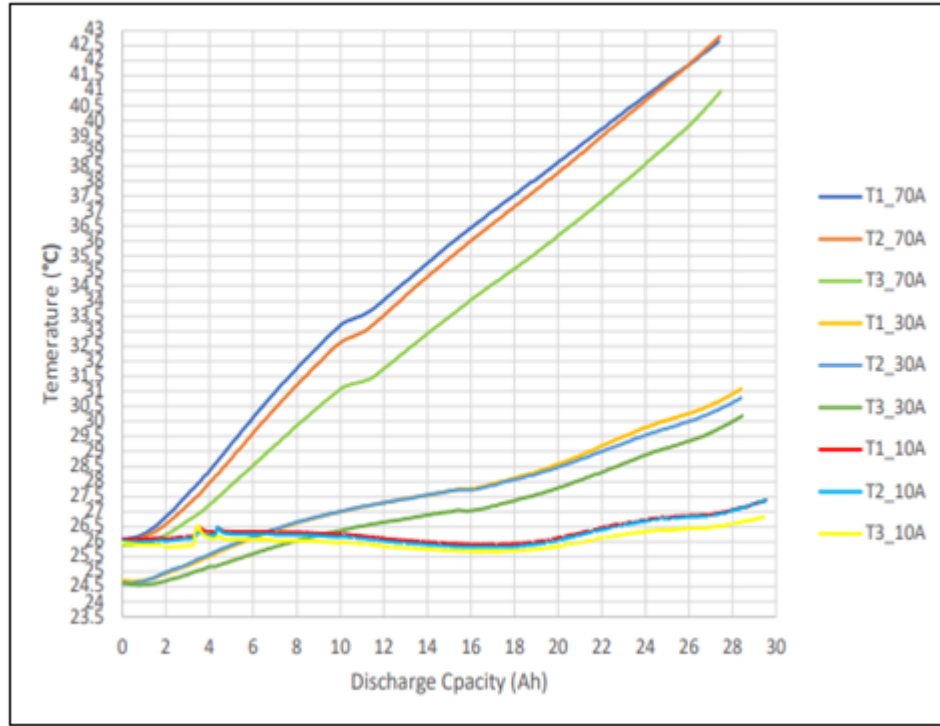
Veriler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.1-5.3'de gösterilmiştir



Şekil 5.1: 10A-30A-70A Deşarj Kapasitesi-Gerilim.



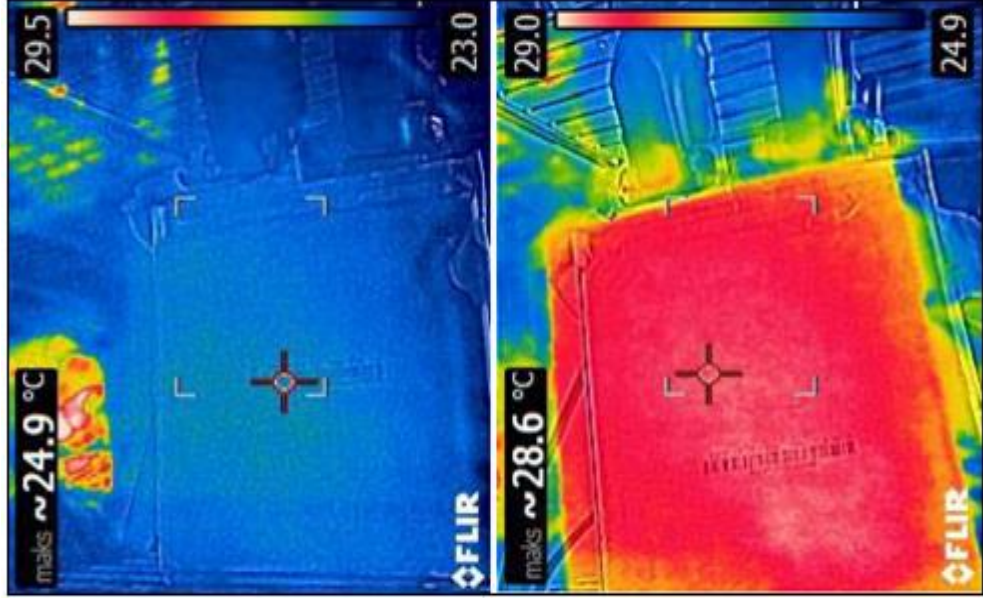
Şekil 5.2: 70A Deşarj Kapasitesi-Sıcaklık (T1-T2-T3).



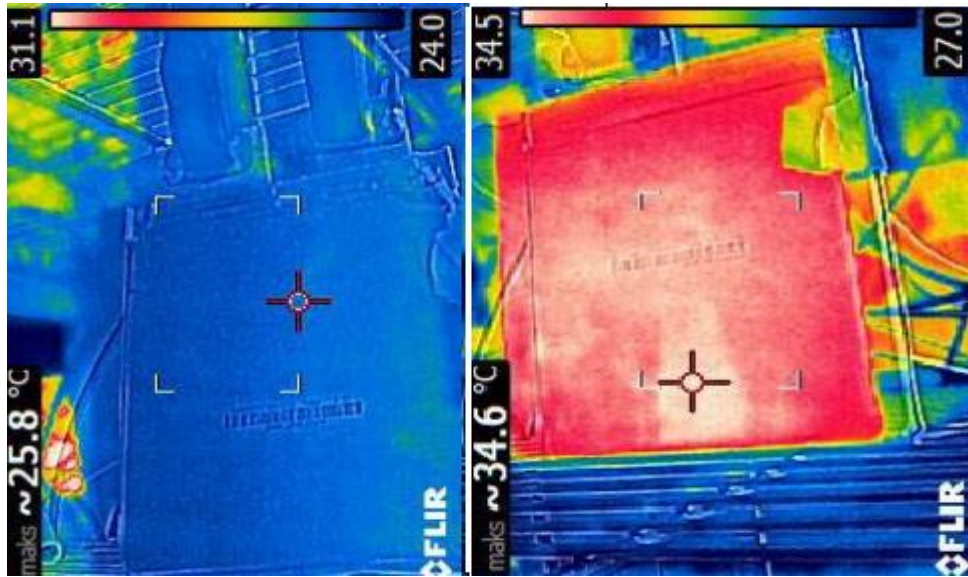
Şekil 5.3: 10A-30A-70A Deşarj Kapasitesi-Sıcaklık (T1-T2-T3).

10A,30A ve 70A deşarj akımı uygulandığında sıcaklık verileri değerlendirilerek 10A deşarj akımında oluşan sıcaklık 30A ve 70A deşarj akımlarına göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bataryanın termal kamera ile alınan görüntülerinde sıcaklığın zamanla tüm yüzeye yayıldığı ve test cihazından alınan verilerle eşdeğer sonuçlar alındığı gözlenmiştir. Uygulanan her akım değeri için

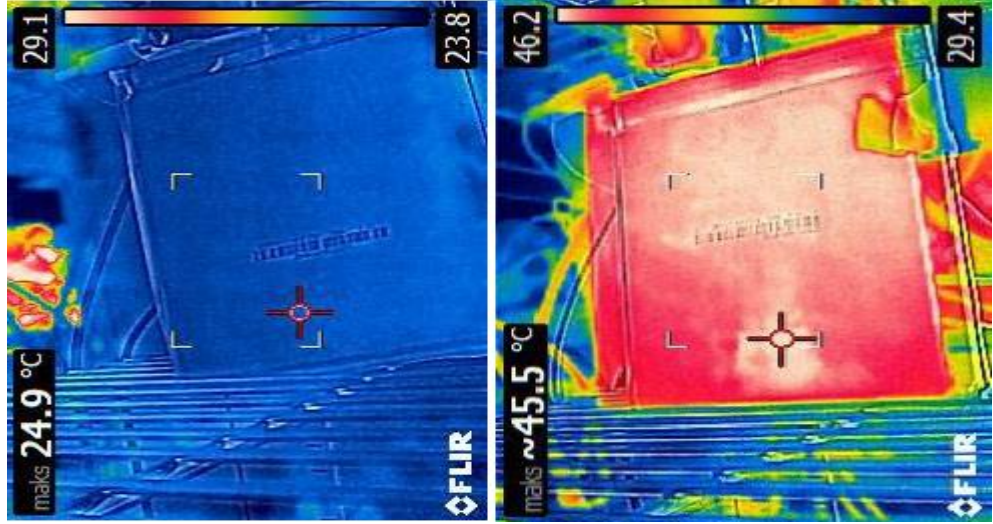
termal kameralardan test öncesi ve sonrası elde edilen görüntüler şekil 5.4-5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.4: 10 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.

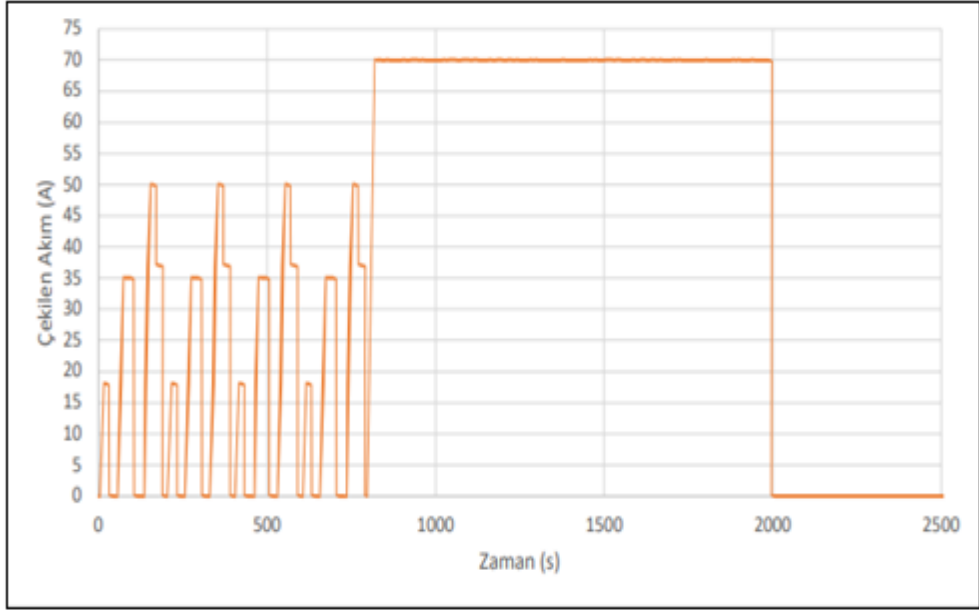


Şekil 5.5: 30 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.

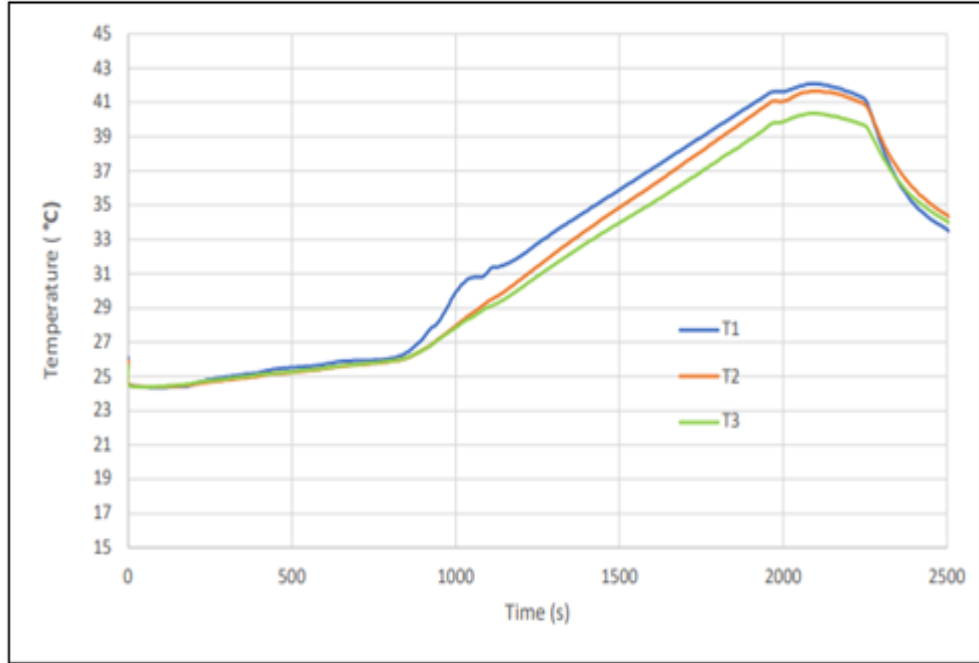


Şekil 5.6: 70 Amper test öncesi ve sonrası batarya termal görüntüsü.

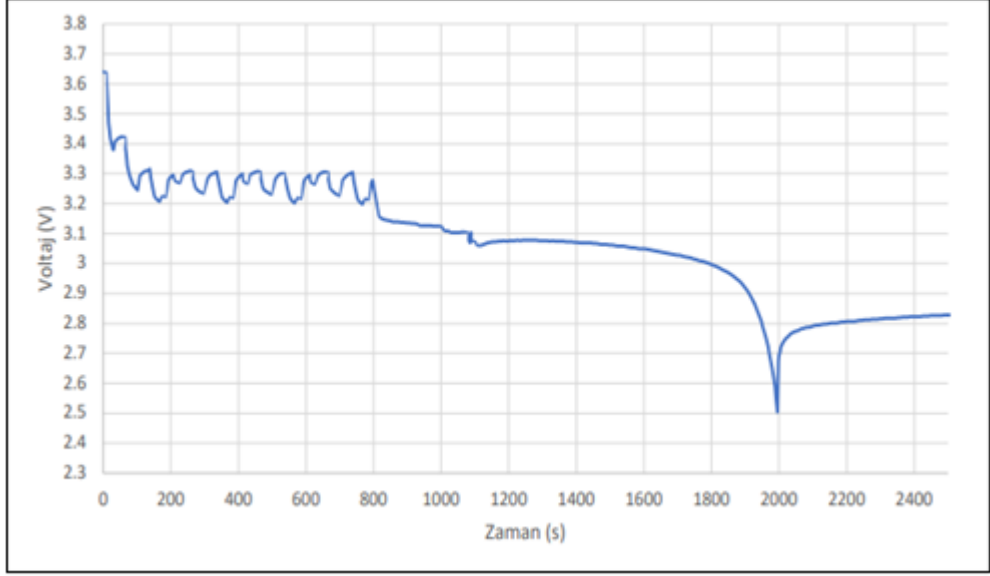
Farklı deşarj durumları için ısıl yönetim sisteminin performansı incelenmek üzere 18A ile 70A arasında değişen deşarj hızlarında testler yapılmıştır. Bir elektrikli araç uygulamasında kullanıldığı zamanki performansını incelemek için uzun süreli döngüsel testler batarya üzerinde yapılmıştır. Bunun için Avrupa şehir içi (ECE-15) ve şehir dışı (EUDC) standart sürüş döngüleri baz alınarak bir test protokolü geliştirilmiştir. ECE-15 ve EUDC döngülerinde verilen hız değerlerine paralel olarak bataryadan çekilen akım da değişecektir. Bu durum göz önünde bulundurularak bataryaya Şekil 5.7'deki test uygulanmıştır. Bu testler sırasında her hücredeki gerilim ve sıcaklık değerleri takip edilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Testler sonucunda hücrelerde kapasite kaybı olup olmadığı incelenmiştir



Şekil 5.7: 25 °C'de 2.5V'a inmeden akım grafiği.

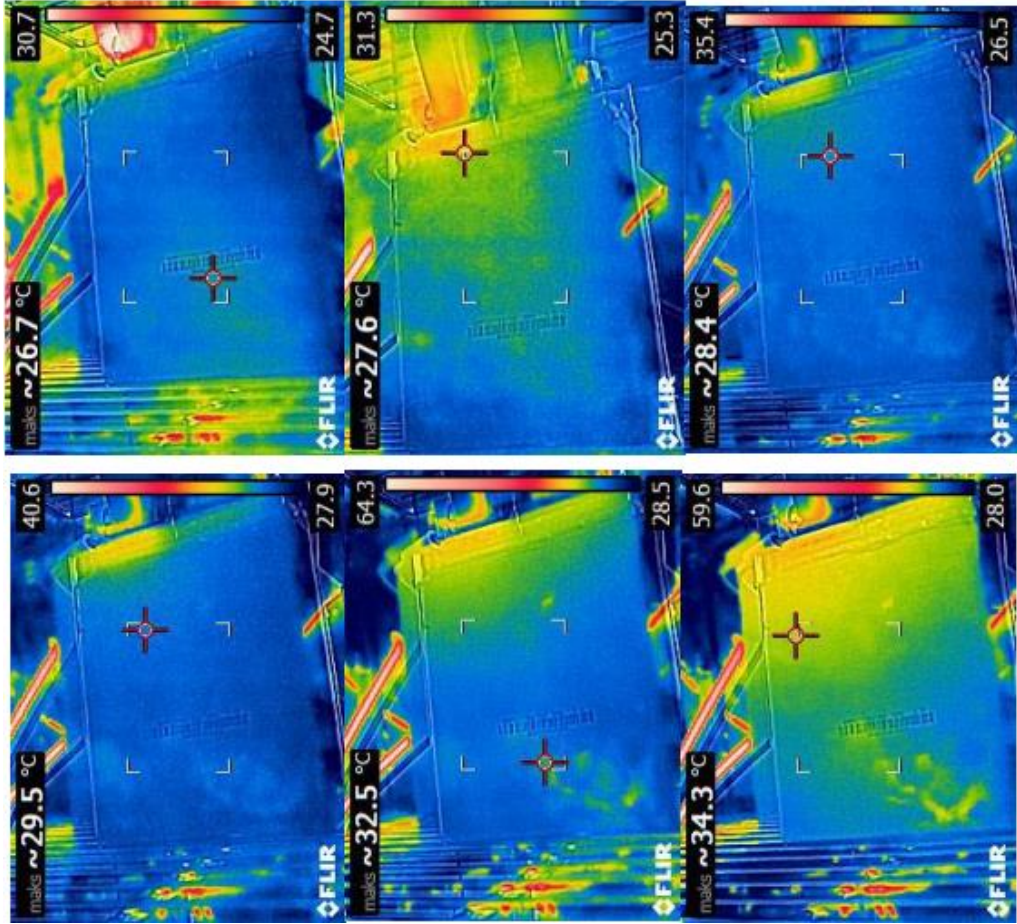


Şekil 5.8: 25 °C'de 2.5V'a inmeden sıcaklık grafiği.



Şekil 5.9: 25 °C’de 2.5V’a inmeden gerilim grafiği.

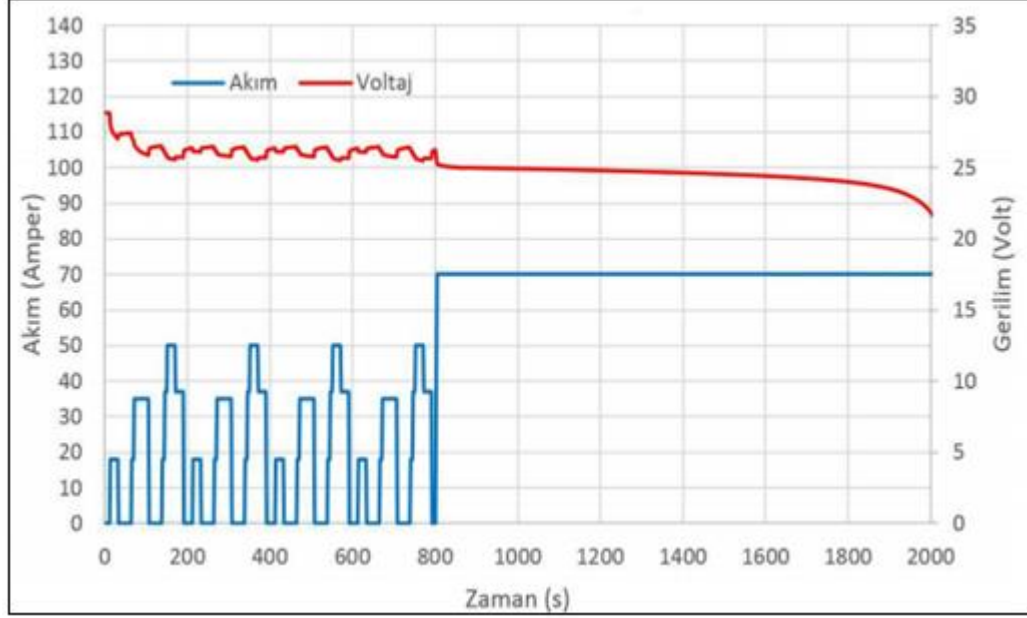
Aynı zamanda sıcaklık değerleri termal kamera ile görüntülenmiştir. Teste süresince belli adımlarda alınan görüntüler şekil 5.10’da gösterilmektedir.



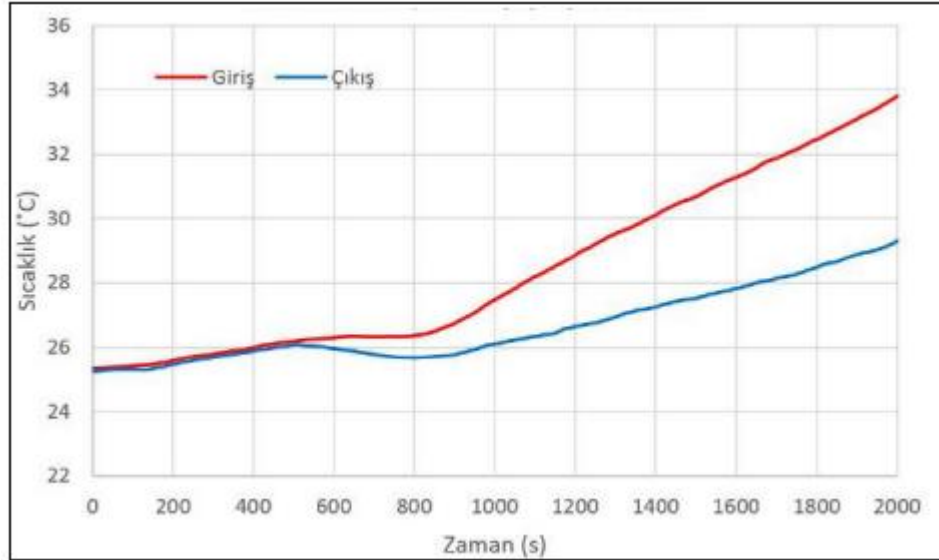
Şekil 5.10: Test sırasında hücrenin ısınmasının termal kamera ile görüntülenmesi.

5.2 Soğutma Sistemi Etkisinde Test Sonuçları

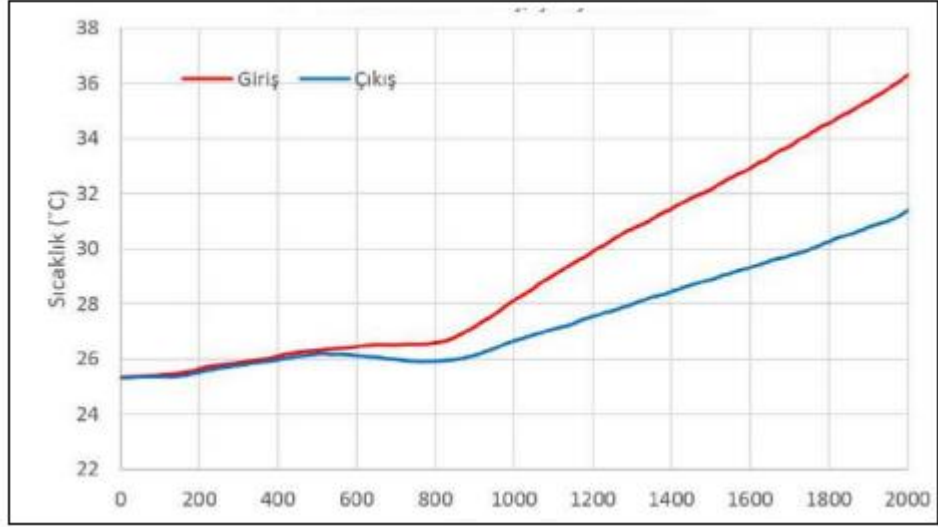
Şekil 5.11’de uygulanan test sonucunda 8’li batarya paketinde hücreler arası elde edilen sıcaklık değişim verileri şekil 5.12-5.15’te gösterilmiştir.



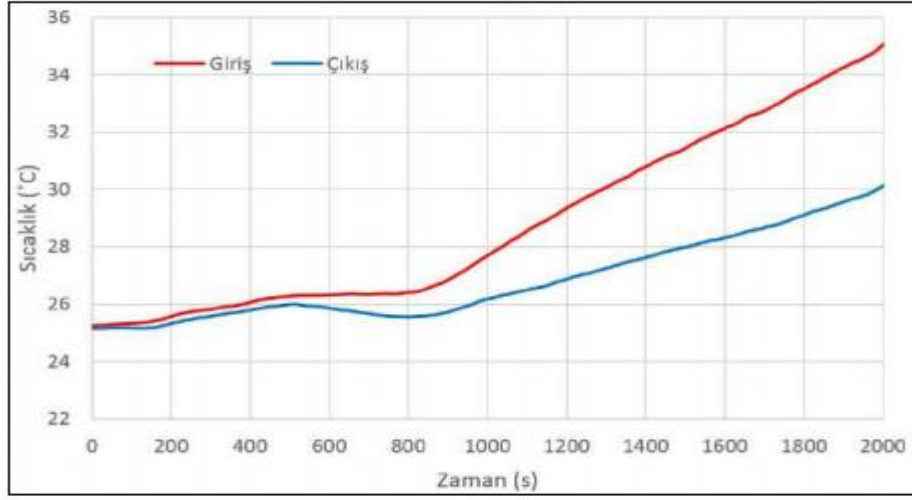
Şekil 5.11: Gerilim / Akım Grafiği.



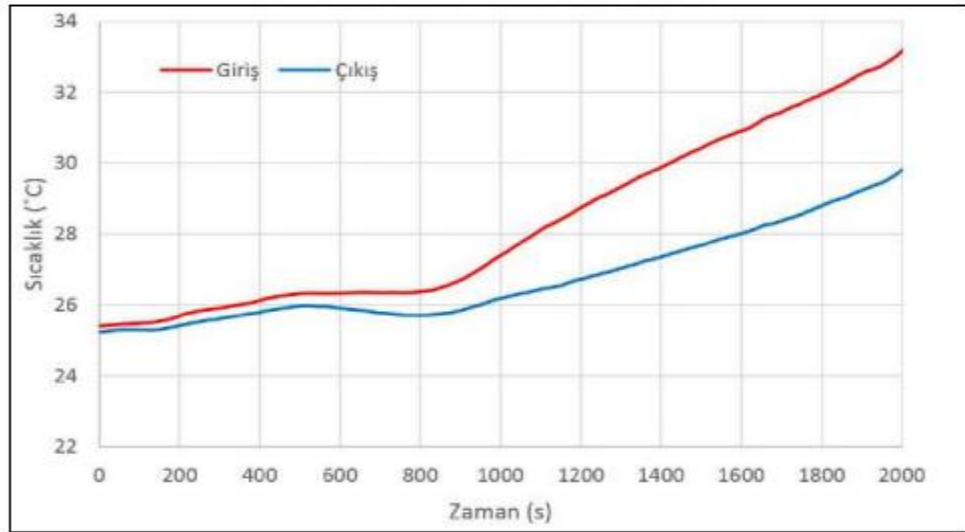
Şekil 5.12: Batarya ve Kapak Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.



Şekil 5.13: 6-7 batarya Arası Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.



Şekil 5.14: 2-3 Hücre Arası Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.



Şekil 5.15: 1. Batarya ve Kapak Giriş/Çıkış Sıcaklıkları.

5.3 Değerlendirme

Tasarlanan soğutma sisteminin performansını gözlemlmek adına hücre ve modül testleri yapılmıştır. Önce tek bir hücrenin ne kadar ısındığını ve kapasite kullandığını görebilmek için hücre 10 A, 30 A ve 70 A olacak şekilde farklı oranlarda değarja tabi tutulmuştur. 10 A testinde hücrede neredeyse hiç sıcaklık değişimi söz konusu değilken, 30 A'de yaklaşık 5°C'lik 70 A'de ise 18°C'lik bir artış gözlemlenmiştir. Hücrelerin yan yana koyulması ile hücre yüzeylerinden ısı atılamayacak ve sıcaklıkların kritik seviyelere yükselmesi beklenecektir. Bu da soğutma sisteminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Soğutma sistemi uygulandıktan sonra modül için döngüsel testler yapılmıştır. Testler sonucunda soğutma sisteminin bataryaları belli bir sıcaklığın altında tuttuğu görülmektedir. Bataryalarda ölçülen en yüksek sıcaklık 36°C olmaktadır. Soğutma sıvısının giriş ve çıkışına denk gelen bataryanın farklı kenarlarında sıcaklık farkları kaydedilmiştir. Batarya yüzeylerinde kenardan kenara yaklaşık 5°C'lik bir sıcaklık farkı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar soğutma sisteminin başarıyla çalıştığının bir göstergesidir. Ayrıca bu sonuçlar alınırken sistem düşük debilerde çalıştırılmıştır. Yüksek soğutma ihtiyacı için daha yüksek debilere çıkılabilir.

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma neticesinde alüminyum plakalı su soğutmalı sistemin batarya termal yönetimi açısından yeterli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir Kanal akışı içerisinde suyun her hangi bir hacim elemanında bile aksenel sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Isı transferi açısından kötü sonuçlar veren bu sıcaklık farkı türbülötör kullanılarak azaltılabilir bir etken olduğu saptanmıştır. Isı transferini etkinleştirme çalışmasında türbülötörlerin konum ve sayısının bölgesel sıcaklık dağılımında etkili olduğu görülmüştür. Bataryadaki bölgesel sıcaklık farkı bu sayede yeterli seviyede tutulabilmiştir. Türbülötörlerin soğutma sisteminde ekstra basınç kayıplarına sebep olduğu görülmüş ve bu basınç kayıpları türbülötörlerin sayı ve konumları dikkate alınarak olabildiğince azaltılmıştır. Bu sayede minimum enerji sarfiyatıyla yeterli soğutma sağlanabilmiştir.

Elektrikli arabalar için tasarlanan su soğutmalı bu sistem sabit ortam sıcaklığı ve yüksek kapasite ile deşarj durumu şartlarında düşünölmüştür. Elektrikli arabada yer alacak bataryanın kullanılacağı iklim şartları bu sebeple çok önemli olup soğuk bölgede kaynak suyunu ısıtan veya sıcak bölgede ise kaynak suyunu soğutan ayrı bir termodinamik sistem çevrimi düşünölmelidir. Bataryalar kullanım boyunca bir arabada sürekli tam kapasite çalışmayacağı düşünölrse yeterli düzeyde debilerde çalışması enerji sarfiyatı açısından önemli olacaktır. Kullanılacak bu soğutma çevrimine ek olarak sıcaklık sensörleri eklenmeli ve sıcaklık-debi fonksiyonu oluşturulmalıdır. Eklencek debi ayarı kontrolüyle kapasite durumuna göre bataryada oluşacak ısıya bağlı bir debi girişı olması gerekir.

KAYNAKLAR

- [1] British Petroleum., (2016), ‘‘ BP statistical review of world’’, Energy .
- [2] British Petroleum., (2016), ‘‘BP Energy Outlook 2016’’, 53.
- [3] Wada M., (2009), ‘‘Research and development of electric vehicles for clean transportation’’, J Environ Sci, 21, 745–749.
- [4] Andersen PH., Mathews JA., Rask M., (2009), ‘‘Integrating private transport into renewable energy policy: the strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles’’, Energy Policy, 37, 2481–2486.
- [5] Budde-Meiwes H., Drillkens J., Lunz B., Muennix J., Rothgang S., Kowal J., (2013), ‘‘A review of current automotive battery technology and future prospects’’, Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng, 227, 761–776.
- [6] Warner J., (2015) ‘‘Introduction. Handb lithium-ion batter pack des’’, Elsevier., 1–8.
- [7] Conte FV., (2006), ‘‘Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review’’, E I Elektrotechnik Und Informationstechnik, 123, 424–431.
- [8] Väyrynen A., Salminen J., (2012), ‘‘Lithium ion battery production’’, J Chem Thermodyn, 46, 80–85.
- [9] Pesaran A, Santhanagopalan GK., (2013), ‘‘Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications.’’ In: 30th int batter semin.
- [10] Motloch CG, Christophersen JP, Belt JR, Wright RB, Hunt GL, Sutula RA, et al., (2002) ‘‘High-power battery testing procedures and analytical methodologies for HEV’s’’, Futur Car Congr, 1–7.
- [11] Pesaran Aa., (2002) ‘‘Battery thermal models for hybrid vehicle simulations’’, J Power Sources, 110, 377–382.
- [12] Kelly KJ, Mihalic M, Zolot M., (2006), ‘‘Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing’’, 17th annu batter conf appl adv proc conf IEEE, 247–252.
- [13] Kim G-H, Pesaran A., (2006) ‘‘ Battery thermal management system design modeling’’, In: 22nd int batter hybrid fuel cell electr veh conf exhib, 1, 126–133.
- [14] Westbrook MH., Engineers I of E., Engineers S of A., (2001), ‘‘The electric car: development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars’’, 38.

- [15] Park H. (2013), ‘‘A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles’’, *J Power Sources*, 239, 30–36.
- [16] Sun H., Dixon R., (2014), ‘‘Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack’’, *J Power Sources*, 272, 404–414.
- [17] Mohammadian SK., Zhang Y., (2015), ‘‘Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles’’, *J Power Sources*, 273, 431–439.
- [18] Mohammadian SK., Rassoulinejad-Mousavi SM., Zhang Y., (2015), ‘‘Thermal management improvement of an air-cooled high-power lithium-ion battery by embedding metal foam’’, *J Power Sources*, 296, 305–313.
- [19] Mohammadian SK., Zhang Y., (2017), ‘‘Cumulative effects of using pin fin heat sink and porous metal foam on thermal management of lithium-ion batteries’’, *Appl Therm Eng*, 118, 375–384.
- [20] Yu K., Yang X., Cheng Y., Li C., (2014), ‘‘Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack’’, *J Power Sources*, 270, 193–200.
- [21] Pesaran A., Vlahinos A., Stuart T., (2003), ‘‘Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles.’’ 6th ASME-JSME therm eng jt conf., 1–7.
- [22] Chen D., Jiang J., Kim GH, Yang C., Pesaran A., (2016), ‘‘Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells.’’ *Appl Therm Eng*, 94, 846–854.
- [23] Lan C., Xu J., Qiao Y., Ma Y., (2016), ‘‘Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes’’, *Appl Therm Eng*, 101, 284–292.
- [24] Zhang T., Gao Q., Wang G., Gu Y., Wang Y., Bao W., (2017) ‘‘Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process’’, *Appl Therm Eng*, 116, 655–662.
- [25] Tong W., Somasundaram K., Birgersson E., Mujumdar AS., Yap C., (2015) ‘‘Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack’’, *Int J Therm Sci*, 94, 259–269.
- [26] Huo Y., Rao Z, Liu X., Zhao J., (2015) ‘‘Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate.’’ *Energy Convers Manag*, 89, 387–395.
- [27] Qian Z., Li Y., Rao Z., (2016), ‘‘Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling’’, *Energy Convers Manag*, 126, 622–631.

- [28] Jin LW., Lee PS., Kong XX., Fan Y., Chou SK., (2014) ‘‘Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management’’, *Appl Energy*, 113, 1786–1794.
- [29] Jarrett A., Kim IY., (2011), ‘‘Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance’’, *J Power Sources*, 196:10359–10368.
- [30] Huo Y., Rao Z., (2015), ‘‘The numerical investigation of nanofluid based cylinder battery thermal management using lattice Boltzmann method.’’ *Int J Heat Mass Transf*, 91, 374–384.
- [31] Bandhauer TM., Garimella S., (2013), ‘‘Passive, internal thermal management system for batteries using microscale liquid-vapor phase change.’’ *Appl Therm Eng*, 61, 756–769.
- [32] Van Gils RW., Danilov D., Notten PHL., Speetjens MFM., Nijmeijer H., (2014), ‘‘Battery thermal management by boiling heat-transfer’’, *Energy Convers Manag*, 79, 9–17.
- [33] Hirano H., Tajima T., Hasegawa T., Sekiguchi T., Uchino M., (2014) ‘‘Boiling liquid battery cooling for electric vehicle’’, *IEEE conf expo transp electrif Asia-Pacific (ITEC Asia- Pacific) IEEE*, 1–4.
- [34] An Z., Jia L., Li X., Ding Y., (2017) ‘‘Experimental investigation on lithium-ion battery thermal management based on flow boiling in mini-channel’’, *Appl Therm Eng*, 117, 534–543.
- [35] Manimaran R., Palaniradja K., Alagumurthi N., Hussain J., (2011), ‘‘Factors affecting the thermal performance of heat pipe – a review’’, *Therm Eng*, 37, 4143–4146.
- [36] Rao Z., Wang S., Wu M., Lin Z., Li F., (2013), ‘‘Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe’’, *Energy Convers Manag*, 65, 92–7.
- [37] Putra N., Ariantara B., Pamungkas RA., (2016), ‘‘Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application’’, *Appl Therm Eng*, 99, 784–789.
- [38] Burbhan G., Ayel V., Alexandre A., Lagonotte P., Bertin Y., Romestant C., (2013), ‘‘Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications’’, *Appl Therm Eng*, 50, 94–103.
- [39] Zhao R., Gu J., Liu J., (2015), ‘‘An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries’’, *J Power Sources*, 273, 1089–97.

- [40] Ye Y., Shi Y., Saw LH., Tay AAO., (2016) ‘‘Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal management system for fast charging lithium ion battery packs’’, *Int J Heat Mass Transf*, 92, 893–903.
- [41] Rao Z., Wang S., (2011), ‘‘A review of power battery thermal energy management’’, *Renew Sustain Energy Rev*, 15, 4554–4571.
- [42] Yan J., Wang Q., Li K., Sun J., (2016) ‘‘Numerical study on the thermal performance of a composite board in battery thermal management system’’, *Appl Therm Eng*, 106, 131–140.
- [43] Quanying Y., Chen L., Lin Z., (2008) ‘‘Experimental study on the thermal storage performance and preparation of paraffin mixtures used in the phase change wall’’, *Sol Energy Mater Sol Cells*, 92, 1526–1532.
- [44] Huaqiang L., Zhongbao Weib., Weidong He.c, Jiyun Zhaoa., (2017), ‘‘Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review’’, *Energy Conversion and Management*, 150, 304–330.
- [45] Ling Z., Wang F., Fang X., Gao X., Zhang Z., (2015), ‘‘A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling’’, *Appl Energy*, 148, 403–409.
- [46] Hémerly CV., Pra F., Robin JF., Marty P., (2014), ‘‘Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material’’, *J Power Sources*, 270, 349-358.
- [47] Rao Z., Wang Q., Huang C., (2016) ‘‘Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system’’, *Appl Energy*, 164, 659–669.
- [48] Zhao J., Lv P., Rao Z., (2017), ‘‘Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack’’, *Exp Therm Fluid Sci*, 82, 182–188.
- [49] Wang Q., Rao Z., Huo Y., Wang S., (2016) ‘‘Thermal performance of phase change material/ oscillating heat pipe-based battery thermal management system’’, *Int J Therm Sci*, 102, 9-16.
- [50] Zhao J., Rao Z., Liu C., Li Y., (2016), ‘‘Experiment study of oscillating heat pipe and phase change materials coupled for thermal energy storage and thermal management’’, *Int J Heat Mass Transf*, 99, 252–260.
- [51] Dahlin GR., Strom KE., (2010), ‘‘Lithium batteries’’, research, technology and applications.
- [52] Amatucci GG., (1996), ‘‘CoO₂, The end member of the Li_xCoO₂ solid solution’’, *J Electrochem Soc*, 143, 1114.

- [53] Shen CW., Ko TH., Liu CH., Chiu KF., Leu HJ., Lin PS., (2014) ‘‘Low temperature process modified MCMB for lithium ion batteries’’, *Solid State Ionics*, 268, 282–287.
- [54] Zuo X., Zhu J., Müller-Buschbaum P., Cheng Y-J., (2017), ‘‘Silicon based lithium-ion battery anodes: a chronicle perspective review’’, *Nano Energy*, 31, 113–143.
- [55] Jiang F., Nie Y., Yin L., Feng Y., Yu Q., Zhong C., (2016), ‘‘Core-shell-structured nanofibrous membrane as advanced separator for lithium-ion batteries’’, *J Membr Sci*, 510, :1–9.
- [56] Liu Y., Ma H., Hsiao BS., Chu B., Tsou AH., (2016), ‘‘Improvement of meltdown temperature of lithium-ion battery separator using electrospun polyethersulfone membranes’’, *Polymer*, 107, 163–169.
- [57] Messina C., (2015), ‘‘ Lithium-ion cylindrical cells vs. prismatic cells’’, *Reli Batter*.
- [58] Liu H., Wei Z., He W., Zhao J., (2017), ‘‘Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review’’, *Energy Conversion and Management.*, 150, 304-330.
- [59] Cengel Y. and Boles M. A., (2013), ‘‘Thermodynamics An Engineering Approach,’’ Third Edition, Mc Graw Hill.
- [60] Bayrak E., Olcay AB., Serincan MF., (2019), ‘‘Numerical investigation of the effects of geometric structure of microchannel heat sink on flow characteristics and heat transfer performance’’, *International Journal of Thermal Sciences.*, 135, 589-600.
- [61] Chen K, (2013), ‘‘ Heat Generation Measurements of Prismatic Lithium Ion Batteries’’, Yüksek Lisans Tezi, Waterloo Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus KILIÇ 1991 yılı, İstanbul doğumludur. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamlamıştır. Daha sonra lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi mühendislik fakültesinde devam eden Kılıç, Makine Mühendisliği bölümünü 2016 yılında tamamlamıştır. Mezun olduktan bir süre sonra Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği enerji anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans eğitimi süresince Doç. Dr. Mustafa Fazıl Serincan'ın yazdığı Tübitak destekli lityum-iyon batarya soğutma projesinde AR-GE çalışmaları yapmıştır.