ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA SOĞUTMA PLAKASININ NÜMERİK ANALİZLER İLE TERMAL YÖNETİMİ

Mustafa MARTİN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA SOĞUTMA PLAKASININ NÜMERİK ANALİZLER İLE TERMAL YÖNETİMİ

Mustafa MARTİN
0009-0001-5307-6346

Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA SOĞUTMA PLAKASININ NÜMERİK ANALİZLER İLE TERMAL YÖNETİMİ

Mustafa MARTİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

Elektrikli araçlarda batarya sistemlerinin soğutulması, bataryaların performansı, ömrü ve güvenliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Yüksek sıcaklıklar, bataryaların enerji verimliliğini düşürmekte ve kimyasal yapısına zarar vererek ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle, bataryalar için soğutma sistemleri, enerji kayıplarını minimize etmek ve batarya ömrünü uzatmak için kritik bir role sahiptir. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan silindirik hücreli lityum-iyon batarya modülünün sıvı soğutmalı sisteminin iyileştirilmesine odaklanılmıştır. İlgili çalışmada, paralel akışa sahip soğutma plakaları için oluşturulan farklı tasarımlar ile batarya modülünün soğutma verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın amacı, deşarj esnasında pil hücrelerinde oluşan ısının neden olduğu sıcaklık dağılımını iyileştirmektir. Bu doğrultuda, farklı tasarımların performansları Ansys Fluent ortamında incelenmiştir. Modül, 4 seri 20 paralel dizime sahip (4x20) 18650 tipli silindirik pillerden oluşup, simetrik bir yapıya sahiptir. Bu yüzden analizler esnasında simetrik sınır şartı tercih edilmiştir. Yeni tasarımlar, soğutma plakasına eklenen kanatçıklar vasıtasıyla oluşturulmuştur. Kanatçıkların silindirik hücrelerin arasına konumlandırılması ile temas yüzeyinin artması ve deşarj anında oluşan ısıyı emerek maksimum sıcaklığı düşürmesi beklenmektedir. Bu bağlamda kıyaslamaların yapılabilmesi adına; baz model, kanatçık eklenmiş tasarım-1, genişletilmiş kanatçığa sahip tasarım-2 ve zıt akışlı, genişletilmiş kanatçığa sahip tasarım-3 olmak üzere dört adet sistem tasarlanmıştır. Ayrıca, sistemde kullanılan etilen glikol-su karışımının oransal değişiminin ve farklı soğutma sıvısı giriş hızlarının (0,1 – 0,3 m/s) batarya üzerindeki termal etkileri incelenerek sıcaklık dağılımı ve basınç düşümü gibi çıktılar değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, tasarım-3 modelinde maksimum sıcaklığın en düşük seviyeye geldiği, fakat birbirine temas eden batarya hücrelerinde sıcaklık dağılımının homojen olmadığı görülmüştür. Maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımının homojenliği dikkate alındığında, tasarım-2 modelinin en ideal sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya, elektrikli araçlar, batarya termal yönetimi, soğutma sistemleri, lityum-iyon piller, soğutma plakası, HAD
2024, xvi + 71 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

Thermal Management of Battery Cooling Plate In Electric Vehicles With Numerical Analysis

Mustafa MARTIN

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

Supervisor: Prof. Dr. Akin Burak ETEMOGLU

Cooling systems for battery systems in electric vehicles are crucial for battery performance, lifespan, and safety. High temperatures decrease battery efficiency and damage their chemical structure, reducing their lifespan. Therefore, cooling systems play a critical role in minimizing energy losses and extending battery life. This study focuses on improving the liquid-cooled system of a cylindrical cell lithium-ion battery module used in electric vehicles. Different designs of cooling plates with parallel flow were analyzed to enhance the cooling efficiency of the battery module. The goal is to improve the temperature distribution caused by heat generated during discharge. The module consists of (4x20) 18650-type cylindrical cells in a 4-series 20-parallel configuration with a symmetrical structure. Therefore, symmetric boundary conditions were used during the analyses. New designs were created by adding fins to the cooling plate. By positioning the fins between cylindrical cells, it is expected to increase the contact surface and reduce the maximum temperature by absorbing heat during discharge. Four systems were designed for comparison: the base model, design-1 with added fins, design-2 with extended fins, and design-3 with counterflow and extended fins. Additionally, the thermal effects of the proportional variation of the ethylene glycol-water mixture and different cooling fluid inlet velocities (0,1–0,3 m/s) were examined, and outputs such as temperature distribution and pressure drop were evaluated. Results showed that design-3 had the lowest maximum temperature, but temperature distribution was not homogeneous. Considering maximum temperature and temperature distribution homogeneity, design-2 provided the most ideal results.

Key words: Battery, electric vehicles, battery thermal management, cooling systems, lithium-ion battery, cooling plate, CFD,
2024, xvi + 71 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde çevresel kaygılar, kaynak tüketimi ve enerji verimliliği gibi temel faktörler, elektrikli araçların popülaritesini artırmış ve batarya teknolojilerini kritik bir unsur haline getirmiştir. Bataryaların performansı ve güvenliği, etkin bir termal yönetim sisteminin sağlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple, batarya soğutma sistemlerinin optimal tasarımı, batarya teknolojilerinin verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bahsedilen sebepler doğrultusunda, bu çalışma kapsamında, batarya modülünde yapılan tasarımsal değişikliklerin ısıl performansa etkisi nümerik analizlerle incelenmiştir.

Tez çalışmam boyunca bilimsel yönlendirmeleri ve destekleri ile bana rehberlik ederek danışmanlığımı yapan Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU'na, bu süreçte ve her koşulda beni sürekli motive eden, destekleyen ve yanımda duran sevgili eşim Gamze EĞİN MARTİN'e ve son olarak bugünlere gelmemi sağlayan annem Türkan MARTİN ve babam Halil İbrahim MARTİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa MARTİN
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kuramsal Temeller 3
2.1.1. Batarya sistemleri 3
2.1.2. Elektrikli araçlarda batarya sistemleri 4
2.1.3. Elektrikli araç tipleri 5
2.1.4. Lityum iyon bataryalar 7
2.1.5. Şekline göre lityum iyon batarya tipleri 8
2.1.6. Li-iyon bataryalarda sıcaklığın etkisi 11
2.1.7. Batarya termal yönetim sistemleri 14
2.2. Bilimsel Araştırmalar 20
3. MATERYAL ve YÖNTEM 26
3.1. Çalışmanın Temeli 26
3.2. Batarya Modüllerinin Tasarım Detayları 27
3.2.1. Temas yüzeyi ve açı detayları 31
3.2.2. Soğutma plakası akış kanalı detayları 33
3.3. Malzeme Detayları 34
3.4. Soğutucu Akışkanın Belirlenmesi 35
3.5. Batarya Modülünün Ağ (Mesh) Yapısı 36
3.5.1. Ağdan bağımsızlık (Doğrulama) çalışmaları 37
3.6. Analizlerde Kullanılan Denklemler, Kabuller ve Yaklaşımlar 39
3.6.1. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri 39
3.6.2. Pil ısı üretim hesabı 41
3.6.3. Reynolds sayısı 44
3.6.4. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) 45
3.7. Literatür Üzerinden Model Validasyonu ve Karşılaştırmalı Analiz 47
3.8. Nihai Analiz İçin Sınır Şartları 50
4. BULGULAR 51
4.1. Genel Giriş 51
4.2. Soğutucu Akışkan Tespit Analiz Sonuçları 51
4.3. Baz Model İçin Analiz Sonuçları 53
4.4. Tasarım-1 Modeli İçin Analiz Sonuçları 55
4.5. Tasarım-2 Modeli İçin Analiz Sonuçları 58
4.5. Tasarım-3 Modeli İçin Analiz Sonuçları 60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 64
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
α	Alfa Açısı
β	Beta Açısı
D	Çap (mm)
L	Uzunluk (mm)
u	X Ekseninde Hız Bileşeni (m/sn)
v	Y Ekseninde Hız Bileşeni (m/sn)
w	Z Ekseninde Hız Bileşeni (m/sn)
ρ	Yoğunluk (kg/m³)
p	Basınç (Pa)
μ	Dinamik Viskozite (Pa s)
f_x	X Yönünde Kuvvet Bileşeni (N)
f_y	Y Yönünde Kuvvet Bileşeni (N)
f_z	Z Yönünde Kuvvet Bileşeni (N)
N	Kuvvet (N)
c_p	Isıl Kapasite (J/kg·K)
T	Sıcaklık (K veya °C)
k	Isı İletim Katsayısı (W/m·K)
q_x	X Ekseninde Isı Üretimi (W/m^3)
q_y	Y Ekseninde Isı Üretimi (W/m^3)
q_z	Z Ekseninde Isı Üretimi (W/m^3)
V	Hız (m/sn)
Re	Reynolds Sayısı
$\Delta\mathbf{T}$	Sıcaklık Farkı
C	Şarj/Deşarj Hızı
W	Güç Birimi (Watt)
Q_{irrev}	Tersinmez Isı (W)
Q_{rev}	Tersinir Isı (W)
Q_{ohm}	Ohmik Isı (W)
Q_{toplam}	Toplam Isı Miktarı (W)
I	Bataryadan geçen akım (A),
V_{ocv}	Açık Devre Voltajı (V)
V_{cell}	Hücre Voltajı (V)
n	Elektron Sayısı
F	Faraday Sabiti (C/mol)
ΔS	Entropi değişimi (J/(mol·K))
R_{int}	Bataryanın iç direnci (Ω)
$\dot{Q}$	Hacimsel Isı Üretim Miktarı(W/m^3)
V	Hacim (m^3)

Kısaltmalar	Açıklama
BEV	Tam Elektrikli Araç
BTYS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
DOD	Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
EV	Elektrikli Araç
Eg-su	Etilen Glikol-Su
Eg	Etilen Glikol
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
HEV	Hibrit Elektrikli Araç
Hex	Hexahedral Eleman
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
Li-iyon	Lityum İyon
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
NCA	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
PHEV	Şarj Edilebilir Elektrikli Araç
SOC	Şarj Durumu (State of Charge)
SOH	Batarya Sağlığı (State of Health)
Tet	Tetrehedral Eleman

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Bir batarya hücresinin ana bileşenleri ve çalışma formatı (Borah vd., 2020)	3
Şekil 2.2.	Batarya paketi oluşturmak için izlenen genel süreç (Mathworks, 2024).....	4
Şekil 2.3.	Elektrikli araç tiplerinin çalışma prensipleri (Goevin, 2024)	6
Şekil 2.4.	Şekline göre sınıflandırılmış batarya tipleri (OneCharge, 2024) A) Silindirik tip hücre B) Prizmatik tip hücre C) Zarf tip hücre...	9
Şekil 2.5.	Yüksek ve düşük sıcaklığın batarya üzerindeki genel etkileri (Saft, 2024).....	11
Şekil 2.6.	Sıcaklığın batarya gücü üzerindeki etkisinin gösterimi (Matthe vd., 2011).....	12
Şekil 2.7.	Sıcaklık ve batarya çevrim ömrü ilişkisi (Rezvanizaniani vd., 2014)	13
Şekil 2.8.	Batarya termal yönetim sistemlerinin sınıflandırılması (Arora, 2018).....	14
Şekil 2.9.	Hava ile soğutma sistemlerinin genel görünümü A) Doğal Taşınım B) Zorlanmış taşınım (Lectron, 2024)	16
Şekil 2.10.	Doğrudan ve dolaylı sıvı ile soğutma sistemleri (Kaba vd., 2021)	19
Şekil 2.11.	Dalgalı tip (serpenter) soğutma plakası örneği (Trumony, 2024).	19
Şekil 3.1.	18650 tip silindirik hücrenin genel ölçüleri.....	27
Şekil 3.2.	Baz model tasarımının genel görünümü A) İsometrik görünüm B) Üstten görünüm C) Yakınlaştırılmış görünüm.....	28
Şekil 3.3.	Baz model tasarımının önden görünümü	28
Şekil 3.4.	Tasarım-1 genel görünüm A) Kanatçık ölçüleri B) Üstten Görünüm.....	29
Şekil 3.5.	Tasarım-2 genel görünüm A) Kanatçık ölçüleri B) Üstten Görünüm.....	30
Şekil 3.6.	Tasarım-3 modelinin genel görünümü ve akışkanın giriş çıkış gösterimi.....	31
Şekil 3.7.	Batarya ve soğutma plakası arasındaki temas açısı (α).....	32
Şekil 3.8.	Batarya hücresi ve kanatçık arasındaki temas açısı (β)	32
Şekil 3.9.	Soğutucu kanal detayları.....	33
Şekil 3.10.	Baz model tasarımının genel ve yakınlaştırılmış mesh görünümü .	36
Şekil 3.11.	Tasarım-2 modelinin genel ve yakınlaştırılmış mesh görünümü..	37
Şekil 3.12.	Toplam düğüm sayısı ile maksimum sıcaklık değişim grafiği	38
Şekil 3.13.	Genel mesh yapısının ortogonal kalite ve aspect oranı değerleri .	39
Şekil 3.14.	Bir hücre için şarj /deşarj durumlarında farklı C (şarj/deşarj hızı) oranlarındaki ısı üretimi (Zhao vd., 2018)	44
Şekil 3.15.	Referans modelin genel görünümü (Jeon vd., 2023)	48
Şekil 3.16.	Baz modelinin akışkan hızına bağlı sonuçları A) 0,1 m/s B) 0,2 m/s C) 0,3 m/s D) 0,4 m/s	49
Şekil 3.17.	Referans model ve baz modelin karşılaştırılması	49

Şekil 4.1. %40 Eg-su karışımına sahip soğutucu akışkanlı modelin sıcaklık dağılımı 51
Şekil 4.2. Eg-su oranına bağlı olarak baz model üzerindeki basınç değişim grafiği 52
Şekil 4.3. Eg-su oranına bağlı baz model üzerindeki maks. sıcaklık değişim grafiği 52
Şekil 4.4. 0,1 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 53
Şekil 4.5. 0,2 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 54
Şekil 4.6. 0,3 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 54
Şekil 4.7. Değişken akışkan hızı için baz modeldeki basınç kaybı değişim grafiği 55
Şekil 4.8. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 56
Şekil 4.9. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 56
Şekil 4.10. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 57
Şekil 4.11. Akışkan hızına bağlı tasarım-1 modelinde basınç kaybı değişim grafiği 57
Şekil 4.12. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 58
Şekil 4.13. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 59
Şekil 4.14. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 59
Şekil 4.15. Akışkan hızına bağlı tasarım-2 modelinde basınç kaybı değişim grafiği 60
Şekil 4.16. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 61
Şekil 4.17. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 61
Şekil 4.18. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı A) Genel görünüm B) Üstten görünüm..... 62
Şekil 4.19. Akışkan hızına bağlı tasarım-3 modelinde basınç kaybı değişim grafiği 62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Lityum iyon batarya türlerinin genel özellikleri (Battery University, 2024) 8
Çizelge 2.2. Şekline göre li-iyon batarya türlerinin kıyaslanması (OneCharge, 2024) 10
Çizelge 3.1. Bir batarya hücresinin homojenleştirilmiş termofiziksel özellikleri (Korkut vd., 2024) 34
Çizelge 3.2. Soğutucu akışkan termofiziksel özellikler (TheEngineeringToolBox, 2024) 34
Çizelge 3.3. Soğutma plakası ve kanatçıklar için malzeme özellikleri (Alüminyum) 35
Çizelge 4.1. Akışkan hızına bağlı olarak baz model üzerinde elde edilen sonuçlar 55
Çizelge 4.2. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-1 üzerinde elde edilen sonuçlar 58
Çizelge 4.3. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-2 üzerinde elde edilen sonuçlar 60
Çizelge 4.4. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-3 üzerinde elde edilen sonuçlar 63
Çizelge 5.1. Akışkan hızı V = 0,1 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti 65
Çizelge 5.2. Akışkan hızı V = 0,2 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti 65
Çizelge 5.3. Akışkan hızı V = 0,3 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti 66

1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtlı araçların iklim değişikliği ve çevre kirliliğine olan etkisi, fiyat dalgalanmalarına tabi olmaları ve yenilenebilir olmayan kaynaklara dayanmaları, ayrıca daha karmaşık bakım gereksinimleri ve içten yanmalı motor prensibi gereği yüksek ısı ve sürtünmeden dolayı yakıt enerjisini yüksek seviyede kullanamamaları gibi etkenlerden dolayı elektrikli araçlara (EV'ler) olan ilgi her geçen gün artmakta, kullanıcı eğilimi bu yönde ilerlemektedir. Bu yüzden son yıllarda elektrikli araçlar üzerine yapılan araştırmalar ve geliştirmeler hızla artmakta ve büyük bir önem kazanmaktadır.

Elektrikli araçlar kendi içinde incelendiğinde, ilgili teknolojinin en önemli unsurlarının başında güç kaynakları yani batarya sistemleri gelmektedir. Batarya sistemleri, elektrikli araçların kullanım maliyetlerini, sürüş mesafesini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Kısacası güçlü ve etkili batarya sistemleri, aracın genel durumu için kritik bir unsurdur. Bu nedenle, batarya sistemlerindeki sürekli ilerleme ve çalışmalar, elektrikli araçların daha yaygın olarak benimsenmesini ve günlük kullanımlar için daha uygun hale gelmelerini sağlamaktadır.

Batarya sistemlerinin en verimli şekilde çalışması büyük ölçüde bataryadaki soğutma sisteminin performansına bağlıdır. Her batarya teknolojisinin belirli bir ideal çalışma sıcaklığı aralığı bulunmaktadır. Çevresel faktörler ve araç dinamiğinden kaynaklanan nedenlerle, batarya sistemi etrafında yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklar, bataryaların enerji verimliliğini kısıtlamakta, kimyasal yapısına zarar vererek ömrünü kısaltmakta ve termal kaçak riskini artırarak güvenlik tehditleri oluşturmaktadır. Bu nedenle, bataryaların arzu edilen çalışma sıcaklıklarında tutulmasını sağlayan etkili soğutma sistemleri, enerji kayıplarını mümkün olduğunca azaltmak, batarya kullanım ömrünü uzatmak ve güvenliği sağlamak için kritik bir role sahiptir.

Tez kapsamında batarya sistemlerinde oluşan ve yukarıda bahsedilen yüksek sıcaklıkların azaltılması adına, tasarımsal değişiklikler ile çeşitli soğutma sistemleri oluşturulmuş ve Ansys Fluent ortamında nümerik analizler gerçekleştirilerek, hesaplamalar incelenmiştir. Bu doğrultuda; literatürden esinlenilerek baz model, hücreler arasına kanatçık eklenmiş

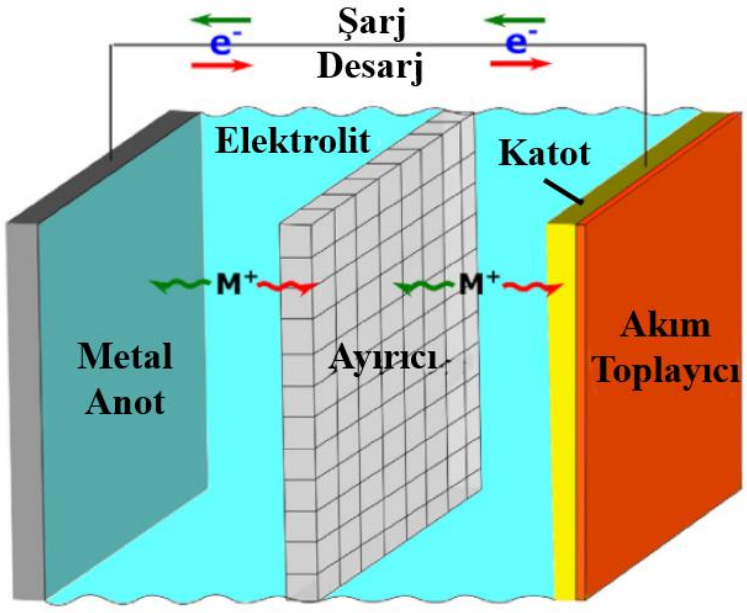
tasarım-1, genişletilmiş kanatçığa sahip tasarım-2 ve zıt akışlı, genişletilmiş kanatçığa sahip tasarım-3 olmak üzere dört adet model tasarlanmıştır. İlgili modeller için nihai analizler gerçekleştirilmeden önce, analizlerde kullanılacak olan soğutucu akışkanın belirlenmesi için değişken etilen glikol-su oranına sahip karışımlar üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenerek nihai analizler için ideal karışım belirlenmiştir. Daha sonra ilgili soğutucu akışkan girdisi ile birlikte akışkan hızının parametrik olarak tutulduğu bir ortamda bahsedilen dört farklı model ayrı ayrı analizlere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar incelenerek modeller arasında ısıl performans kıyaslaması yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kuramsal Temeller

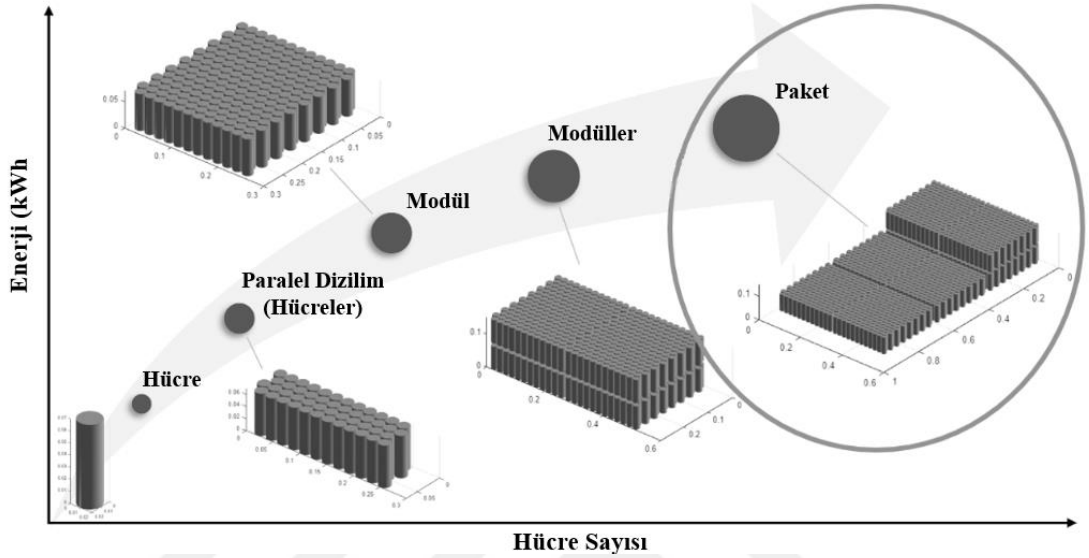
2.1.1. Batarya sistemleri

Günümüzün teknoloji ve enerji odaklı gelişmeleri dikkate alındığında enerjinin üretimi ve tüketimi kadar ilgili enerjinin depolanması da büyük önem taşımaktadır. Bataryalar, temel manada elektrik enerjini kimyasal formda depolayabilen ve ihtiyaç duyulduğunda da bahsedilen enerjiyi kullanabilen güç depolama kaynaklarıdır. Genel içerik olarak bir batarya hücresi anot, katot, elektrolit, akım toplayıcı ve ayırıcı olmak üzere beş ana bileşenden oluşur (Borah vd., 2020). Genel bir batarya hücresinin bileşenleri ve çalışma biçimi Şekil 2.1'de belirtilmiştir. Elektronlar katottan anoda doğru hareket ettiğinde kimyasal olarak potansiyel enerjiyi arttırır ve bu sayede batarya hücresini şarj ederler; diğer yöne hareket ettiklerinde ise bahsedilen potansiyel enerjiyi ilgili devrede elektriğe dönüştürerek hücreyi boşaltırlar (Department of Energy, 2024).



Şekil 2.1. Bir batarya hücresinin ana bileşenleri ve çalışma formatı (Borah vd., 2020)

Bataryanın en küçük birimine hücre denilmektedir. Birden fazla hücre bir araya gelerek modülleri oluşturmaktadır. Birbirine bağlanan modüller ise paket birimini oluşturmaktadır. Şekil 2.2'de hücre, modül ve paket birimleri belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Batarya paketi oluşturmak için izlenen genel süreç (Mathworks, 2024)

Modern hayatta batarya sistemleri taşınabilir veya sabit elektronik cihazlardan, tıbbi elektronik aletlere, yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Taşınabilirlikleri, düşük bakım maliyetleri, uzun ömürleri ve çevre dostu olmaları sayesinde birçok uygulamada vazgeçilmez bir tercih haline gelmişlerdir. Bahsedilen alanların dışında batarya sistemlerinin en çok tercih edildiği ve bir anlamda da kilit rol oynadığı diğer bir sektör ise elektrikli araçlar ve teknolojisidir.

2.1.2. Elektrikli araçlarda batarya sistemleri

Enerji ve enerji kaynakları her ülke için gelişmenin veya ekonomik istikrarın en önemli unsurlarından biri olmuştur. Ülkelerin ihtiyaç duyduğu enerjinin karşılanabilmesi için ise bazı ham maddelere veya enerji rezervlerine gerek duyulmaktadır. İlgili ham madde kaynakları veya rezervler dünya üzerinde yani ülkeler bazında eşit dağılmamakta ve bazı ülkeler bu rezervlerin büyük bir çoğunluğunu elde tutuyorken, bazı ülkeler ise bahsedilen

rezervlerden elde edilen enerjiyi orantısız bir şekilde tüketmektedir. Enerji kaynaklarının sınırsız olmadığı da göz önünde bulundurulduğunda, günümüzde dünyamız enerji sıkıntılarıyla karşı karşıya kalmaktadır (S. Al-Maamary vd., 2017).

Enerji kaynaklarının en fazla tüketildiği alanlardan biri ise şüphesiz ulaşım sektörü olmaktadır. Ulaşım sektöründe geleneksel, yani içten yanmalı motorlara sahip araçlar hava kirliliğini arttıran fosil yakıtlara bağımlıyken (Z. Wang vd., 2021), elektrikli araçlar dönüştürülebilir enerji kaynaklarını kullanma kabiliyeti yaratarak, temiz enerji kullanımı avantajını sunmaktadır. Bu sayede hem çevre kirliliğini azaltmakta hem de alternatif enerji kaynağı kullanımını teşvik etmektedir (Chen, 2022).

Batarya sistemleri, elektrikli araçların (EV) güç kaynağı olarak temel bir görev üstlenmekte ve aracın maliyeti, verimliliği ve çevresel etkisi gibi kritik konularda göz ardı edilemez bir etkiye sahiptir. Bu yüzden elektrikli araçların işlevselliği ve değeri açısından etkin olan bataryaların verimliliği, elektrikli ulaşımın ilerlemesi için hayati bir öneme sahiptir. Kısacası batarya sistemleri, elektrikli araçların sürüş mesafesini, performansını, maliyetini ve çevresel etkisini belirleyen temel unsurlardan biridir. Teknoloji ilerledikçe, bataryaların modern ulaşım çözümlerin sürdürülebilirliği ve verimliliği üzerindeki rolü daha da artacak, bu da bataryaları gelecekteki ulaşımın ilerlemesi için daha da kritik hale getirecektir.

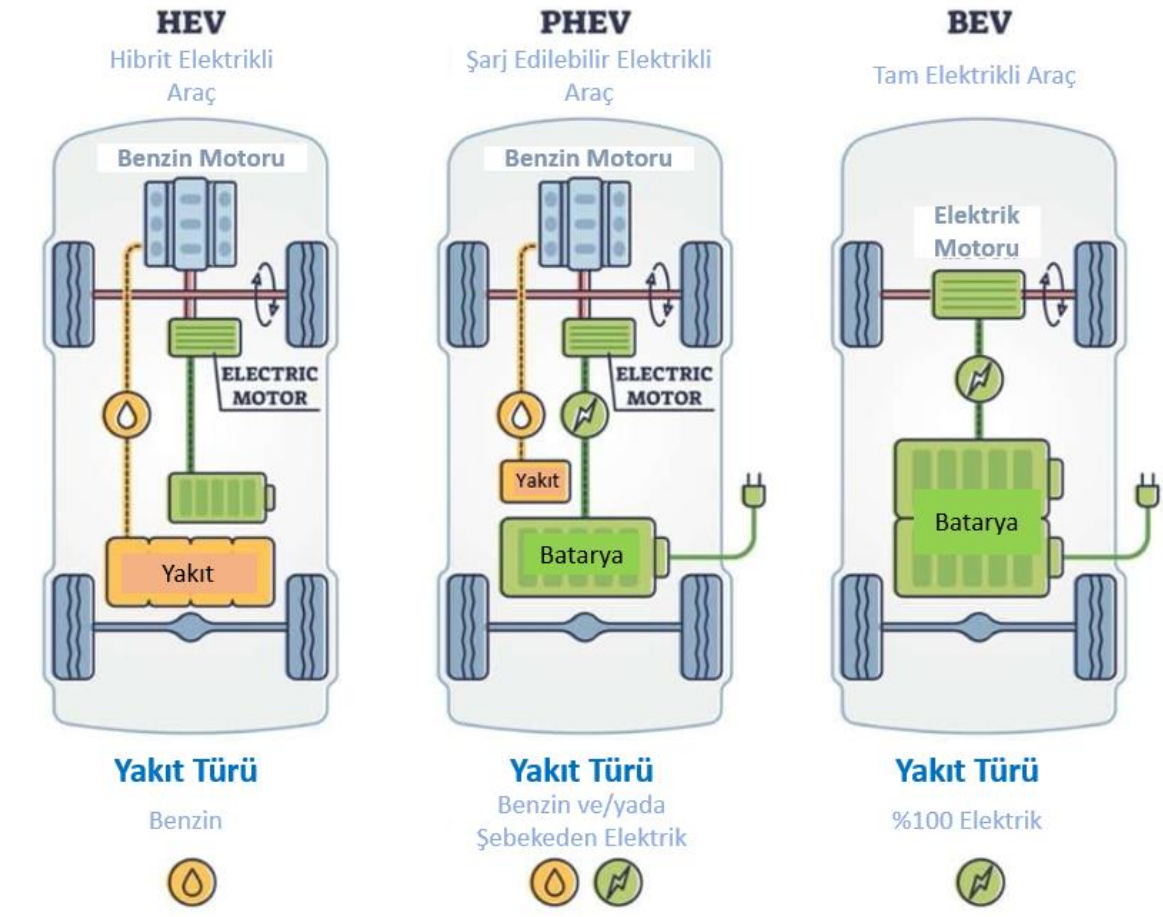
2.1.3. Elektrikli araç tipleri

Günümüzde motor teknolojisine bağlı olarak çeşitli elektrikli araç türleri ile karşılaşabiliriz. Genel olarak elektrikli araçlar, tam elektrikli araç (BEV), hibrit elektrikli araç (HEV) ve şarj edilebilir elektrikli araç tipi (PHEV) olmak üzere 3'e ayrılmaktadır (Şekil 2.3).

- BEV'ler içten yanmalı bir motorun bulunmadığı ve hiçbir tür sıvı yakıt kullanılmayan, tamamen elektrik gücüyle hareket eden araçlar olarak sınıflandırılırlar. Bu yüzden BEV'lerde genel manada aracın yeterli bir sürüş mesafesine sahip olmasını sağlamak için büyük batarya paketleri kullanır.

- PHEV’ler geleneksel bir içten yanmalı motor ve harici bir elektrik kaynağıyla şarj edilebilen bir elektrik motoru tarafından tahrik edilirler. Elektrik motorunun ek olarak kullanılması ile PHEV'ler, normal sürüş koşullarında yakıt tüketiminin azalmasına önemli ölçüde katkı sağlayabilirler.

- HEV’ler, geleneksel içten yanmalı bir motor ve bir elektrik motoru kombinasyonuyla hareket ederler. PHEV'lerden farklı olarak, HEV'ler şebekeden güç alamazlar. Genel manada, elektrik motoruna enerji sağlayan batarya, aracın içten yanmalı motoru tarafından üretilen güçle şarj edilir (Sanguesa vd., 2021).



Şekil 2.3. Elektrikli araç tiplerinin çalışma prensipleri (Goevin, 2024)

2.1.4. Lityum iyon bataryalar

Günümüzdeki elektrikli araç teknolojisi ileri seviye gelişmelerle birlikte, batarya teknolojilerinden oldukça yüksek performanslar ve kompleks ihtiyaçlar talep etmeye başlamıştır. Bu araçlar, güç desteği, rejeneratif frenleme ve elektrikli yardımcı cihazlar gibi ek fonksiyonellikler içermektedir. Bu tür detaylı gereksinimler, önceki batarya teknoloji ve kimyalarının nispeten yetersiz olması sebebiyle kolayca karşılanamamaktadır. Öte yandan, lityum en hafif metal elementler biridir ve hücrelere makul seviyede yüksek voltaj ve enerji yoğunluğu sağlayabilecek şekilde oldukça düşük bir redoks potansiyeline sahiptir (Dinçer vd., 2017).

Lityum iyon (Li-iyon) bataryaların kullanım alanları bir hayli fazla olduğu gibi, ilgili alanlar için ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacı ve performansı da farklı olmaktadır. Kullanılan katot ve anot malzemelerine, elektrolit türüne ve uygulama alanlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar, pillerin performans özelliklerini, maliyetlerini, güvenliklerini ve diğer önemli parametrelerini belirler. li-iyon bataryaların kimyasal farklılıkları bataryanın özgül gücüne ve enerjisine etki etmektedir. Son zamanlarda tercih edilen başlıca li-iyon bataryalar; lityum titanat oksit (LTO), lityum kobalt oksit (LCO), lityum manganez oksit (LMO), lityum demir fosfat (LFP), lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) çeşitleridir (Dursun, 2024).

Çizelge 2.1'de bahsedilen li-iyon batarya türleri özet haline getirilmiştir. İlgili çizelgede batarya tiplerinin kimyasal ismi, kısaltması, özellikleri ve genel anlamda kullanım alanları belirtilmiştir. Kimyasal içeriğine bağlı olarak ilgili li-iyon bataryaların avantajları ve dezavantajları değişmektedir. Genel olarak tablo incelendiğinde elektrikli araçlar için LTO, LFP, NMC, NCA batarya türleri tercih edilmektedir. Diğerlerinden farklı olarak LTO yüksek maliye sahip, pahalı bir batarya türüdür.

Çizelge 2.1. Lityum iyon batarya türlerinin genel özellikleri (Battery University, 2024)

Kimyasal İsim	Kısaltma	Özellikler	Kullanım Alanları
Lityum Titanat Oksit	LTO	- Uzun Ömür, hızlı şarj - Yüksek güvenlik - Düşük yoğunluk - Yüksek maliyet	- Elektrikli Araçlar - Güneş panelli sokak aydınlatmaları
Lityum Kobalt Oksit	LCO	- Yüksek enerji - Sınırlı güç	- Cep telefonları, diz üstü bilgisayarlar, vs.
Lityum Manganez Oksit	LMO	- Yüksek güç - Düşük kapasite	- Medikal cihazlar - Güç aktarma organları
Lityum Demir Fosfat	LFP	- Yüksek güç - Yüksek güvenlik ve çevrim ömrü - Düşük kapasite	- Elektrikli Araçlar - Elektrikli ev aletleri - Taşınabilir cihazlar
Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit	NMC	- Yüksek kapasite - Yüksek güç	- Elektrikli araçlar - Elektrikli bisikletler - Medikal cihazlar
lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit	NCA	- Yüksek kapasite - Ortalama güç	- Elektrikli araçlar - Medikal cihazlar

2.1.5. Şekline göre lityum iyon batarya tipleri

Lityum iyon bataryalar şekil veya formuna bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılabilir. Bataryanın kullanılacağı sistemin gereksinimleri, çevresel faktörler, maliyet girdisi ve kullanıcı tercihi ve ihtiyacı ilgili batarya tipinin belirlenmesinde etkili olan başlıca unsurlardır. Günümüzde li-iyon batarya türlerinin geniş kullanımı dikkate alındığında, gelişen teknoloji ile birlikte, kullanıcı veya sistem ihtiyaçları doğrultusunda bahsedilecek olan tüm batarya tiplerine ihtiyaç duyulmakta ve batarya teknolojileri adına da büyük bir önem arz etmektedir. Şekil 2.4'te farklı formlara sahip li-iyon batarya türleri belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Şekline göre sınıflandırılmış batarya tipleri (OneCharge, 2024)
A) Silindirik tip hücre **B)** Prizmatik tip hücre **C)** Zarf (Kese) tip hücre

Silindirik li-iyon bataryalar yaygın olarak tercih edilen batarya türlerinin başında gelmektedir. Silindirik tip hücreler, sandviç şeklinde yerleştirilmiş katmanlar ile birlikte, rulo yapılarak, silindir şeklindeki bir kutuya yerleştirilmiş ve tabaka şeklindeki batarya içinde anot, katot ve ayırıcıdan oluşan yapılardır (OneCharge, 2024). Bu batarya tipi daha çok taşınabilir cihazlarda tercih edilmektedir. İhtiyaç duyulan enerjinin elde edilebilmesi için birçok silindirik hücre bir araya gelmelidir. Her ne kadar bu durum bir dezavantaj gibi gözükse de gerek dizilim özgürlüğü gerekse arıza durumunda problemli hücrenin tespit edilip, bertaraf edilmesi gibi avantajlar sunması silindirik hücreleri vazgeçilmez kılmaktadır. Ayrıca dizilim muhteviyatından dolayı pasif soğutma sistemini mümkün kılmaktadır. Geniş kullanımı, birçok uygulama ve cihazda tercih edilmesi gibi avantajlarından dolayı, silindirik hücreler bugün çok yüksek miktarlarda (yılda milyarlarca) üretilmekte ve bu sebeple hücre maliyeti diğer formatlara göre çok daha düşük olmaktadır (Warner, 2014).

Prizmatik hücreler, yaygın olarak dikdörtgen veya kare şekilli formlara sahiptirler. Genellikle daha ince ve görece hafif olmaları dolayısıyla daha çok taşınabilir elektronik cihazlarda tercih edilmektedirler. Prizmatik hücrelerde, sandviç şeklinde yerleştirilmiş, geniş formda anot, katot ve ayırıcı tabakalar bulunmaktadır. İlgili tabakalar, rulo haline getirilerek, metalik veya sert bir plastik muhafazaya sığacak şekilde bastırılmaktadır (OneCharge, 2024).

Bahsedilen batarya tiplerinin yanı sıra zarf tipi bataryalar son zamanlarda birçok otomobil üreticisinin favorisi haline gelmiştir. Çünkü işletmeler daha az yer kaplarken, enerji yoğunluğu yüksek olan ve çalışma güvenliği kanıtlanmış batarya çözümleri üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bu durum tipik olarak büyük formatlı hücre talebini doğurmaktadır. Zarf tipi bataryalar da bu ihtiyacı belli bir oranda karşılamaktadır (Warner, 2014). Bu batarya tipleri esnek bir yapıdadır, yani sert bir dış kutuya sahip değildir ve hücre kabı olarak kapalı esnek bir folyo kullanılmaktadır. Elektrot ve ayırıcı katmanları ise üst üste yığılmaktadır (OneCharge, 2024).

Üretim formuna bağlı olarak sınıflandırılan batarya tiplerinin avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları gibi genel özellikleri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Şekline göre li-iyon batarya türlerinin kıyaslanması (OneCharge, 2024)

Hücre Tipleri	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
Silindirik	- Otomatik üretim - Yaygın kullanım - Düşük maliyet - Mekanik dayanım - Bakım/onarım kolaylığı - Enerji yoğunluğu	- Paketleme yoğunluğu - Karmaşık sistem - Yüksek ağırlık	- Elektrikli araçlar - Elektrikli bisikletler - Taşınabilir cihazlar - Oyuncak teknolojisi - Güç sistemleri
Prizmatik	- Optimal alan - Şişme yok - Yüksek nominal kapasite - Yüksek enerji yoğunluğu - Hafiflik	- Keskin köşe kaynaklı yüksek stres - Üretim maliyeti	- Elektrikli araçlar - Tıbbi cihazlar - Ağır vasıtalar - Güç depolama sist.
Zarf (Kese)	- En düşük ağırlık - Yüksek esneklik	- Üretim özelleştirilmesi - Mekanik dayanım - Sektör kısıtı - Üretim Maliyeti	- Akıllı telefonlar - Dronelar - Dizüstü bilgisayarlar

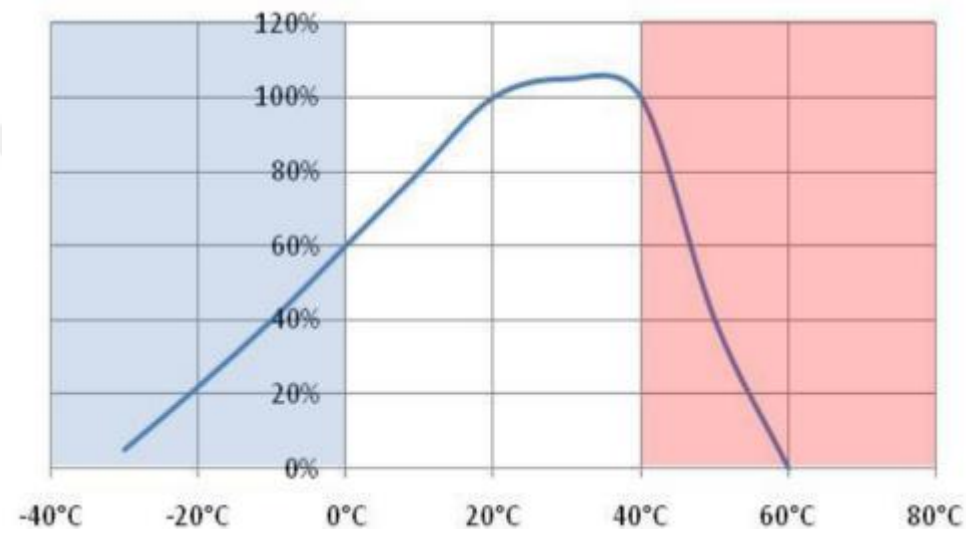
2.1.6. Li-iyon bataryalarda sıcaklığın etkisi

Li-iyon bataryalarının çalışma verimi ve performansı büyük ölçüde, ilgili bataryanın çalışma sıcaklığı ve voltajına bağlıdır. Çalışma esnasında bahsedilen parametrelerin belirli aralıklarda olması gerekmektedir. Bu durum sağlanamadığında pil hücrelerinde geri döndürülemez hasarlar meydana gelebilir. Bu yüzden hem batarya çalışma sıcaklığının hem de çalışma voltaj yani gerilim değerinin optimum seviyede olması gerekmektedir. Ayrıca aşırı gerilim ve sıcaklık da olduğu gibi düşük yani istenilen değerlerin altındaki gerilim ve sıcaklık değerlerinde de termal problemler ortaya çıkabilmektedir (Li & Zhu, 2014). Genel manada yüksek veya düşük sıcaklık anında bataryada oluşabilecek olumsuzluklar veya etkileşimler Şekil 2.5'te belirtilmiştir.



Şekil 2.5. Yüksek ve düşük sıcaklığın batarya üzerindeki genel etkileri (Saft, 2024)

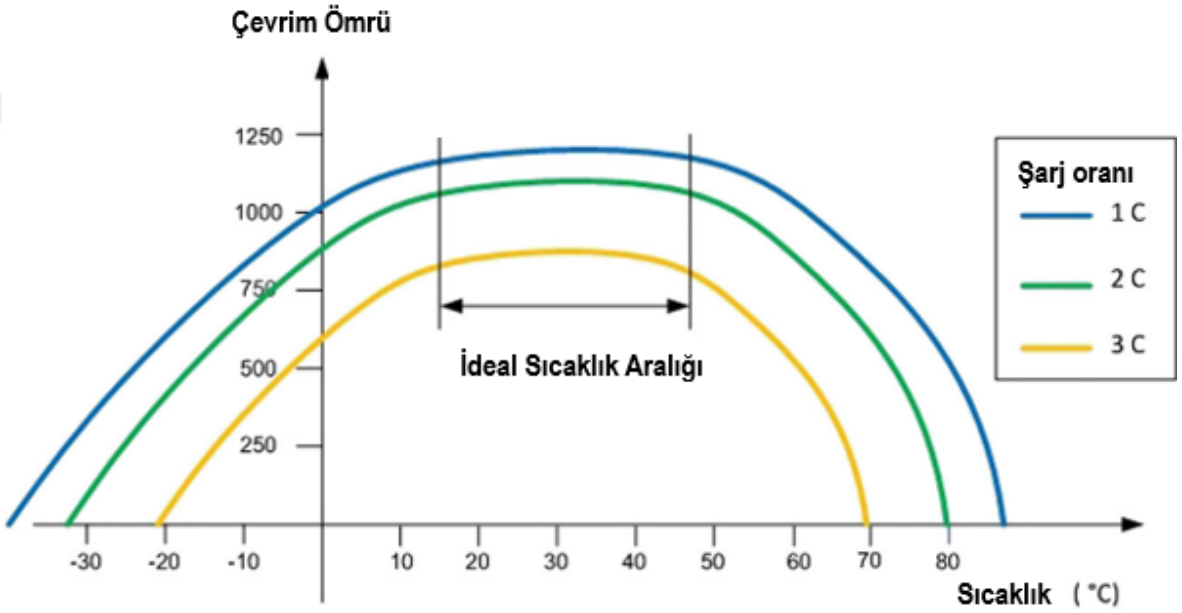
Bir bataryanın sağlıklı çalışması, ilgili batarya içindeki kimyasal reaksiyonların verimli bir şekilde gerçekleşmesi ile direkt olarak ilişkilidir. Şekil 2.5'ten de anlaşılacağı üzere sıcaklık etkisi batarya içindeki kimyasal reaksiyonları ciddi oranda etkilemektedir. İlgili bataryaların mümkün olan en yüksek verim ile çalışması için kabul edilebilir ve ideal yani optimum sıcaklık aralıkları bulunmaktadır. Li-iyon bataryaların kabul edilebilir çalışma sıcaklık aralığı -20 – 60°C olarak belirtilirken (Ji vd., 2013), optimum yani en ideal çalışma sıcaklık aralığı ise 20 – 40°C olarak genelleştirilebilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sıcaklığın batarya gücü üzerindeki etkisinin gösterimi (Matthe vd., 2011)

Bataryanın iç sıcaklığı, sarj/deşarj veya bekleme pozisyonunda, bahsedilen ideal sıcaklıkların dışına çıktığında, li-iyon pillerde hızla bozulma, yıpranma oluşacak ve patlama veya yangın gibi yüksek güvenlik riskleri ile karşılaşma ihtimali artacaktır (Ma vd., 2018). Yüksek veya düşük sıcaklıklar ve dengesiz sıcaklık dağılımı, li-iyon pillerin performansını, güvenliğini ve döngü ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 2.7). Aşırı entropik değişim etkileri nedeniyle, şarj/deşarj sırasında bataryanın ürettiği ısı miktarı iç sıcaklığı büyük ölçüde arttırmakta ve bu da termal kaçaklar (thermal runaway) ile yangın tehlikesine yol açabilmektedir. Bunların dışında daha yüksek sıcaklıklarda (>40°C), kullanılabilir enerji kapasitesi artmasına rağmen, döngü sayısının artması ile birlikte batarya kapasitesinde hızlı bir yıpranma veya bozulma gerçekleşebilmektedir. Nispeten düşük sıcaklıklarda (<0°C) ise, li-iyon pilin iç direnci arttığı için, şarj/deşarj kapasitesi kayda değer bir biçimde azalmaktadır. Son olarak ise bazı çalışmalarda pil

paketi veya modülü içindeki düzensiz ve dengesiz sıcaklık dağılımının li-iyon bataryaların performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu durumun yani sıcaklık farklılıklarının farklı şarj/deşarj karakteristiklerine sebebiyet verebileceği, bunun da elektriksel olarak düzensiz hücreler oluşturacağı ve batarya paketlerinin performansını olumsuz yönde etkileyeceği (Lu vd., 2019) ve bir batarya paketi içinde hücreler arası veya hücre ile modül arasındaki genel sıcaklık farkının 5°C'yi aşmaması gerektiği ortaya koyulmuştur (Chidambaranathan vd., 2020).

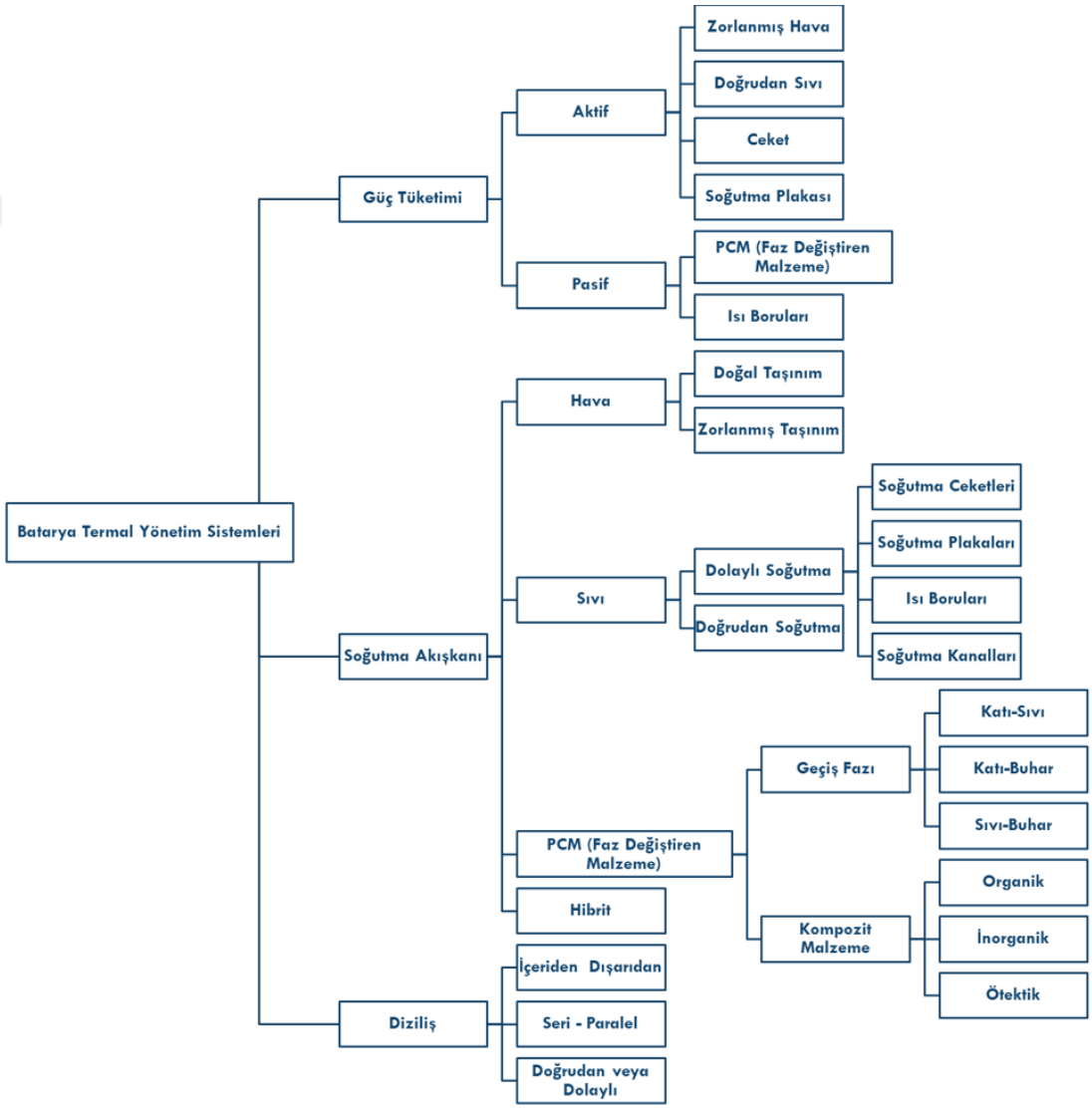


Şekil 2.7. Sıcaklık ve batarya çevrim ömrü ilişkisi (Rezvanizaniani vd., 2014)

Sonuç olarak sıcaklığın batarya üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alınıldığında bahsedilen olumsuzlukların giderilmesi ile birlikte ideal çalışma koşulları sağlanarak, li-iyon bataryaların optimum seviyede, yüksek performansta çalışması adına batarya termal yönetim sistemlerinin (BTYS) kullanımı gerekli hale gelmektedir.

2.1.7. Batarya termal yönetim sistemleri

2.1.6. başlığında bahsedildiği gibi li-iyon bataryalarının üzerindeki sıcaklığın olumsuz etkilerini gidermek ve ilgili bataryaların verimli şekilde çalışmasını sağlamak adına çeşitli Batarya termal yönetim sistemleri bulunmaktadır. Şekil 2.8'de başlıca BTYS'leri resmedilmiştir.



Şekil 2.8. Batarya termal yönetim sistemlerinin sınıflandırılması (Arora, 2018)

Şekil 2.8 incelendiğinde batarya termal yönetimi için çeşitli soğutma sistemlerinin bulunduğu görülmektedir. Soğutma işlemi için bir BTYS, pasif yani sadece ortam dinamiklerinin kullanıldığı veya aktif yani soğutma ortamının harici sistem veya cihazlarla zorlanması şeklinde olabilir. Isının bataryadan uzaklaştırıldığı konuma göre, BTYS'ler dahili veya harici sistemler olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde, li-iyon bataryaların soğutulmasında kullanılan çoğu termal yönetim sistemi haricidir. Bu durumda, ısının hücre yüzeyinden uzaklaştırılması anlamına gelmektedir (H. Liu vd., 2017).

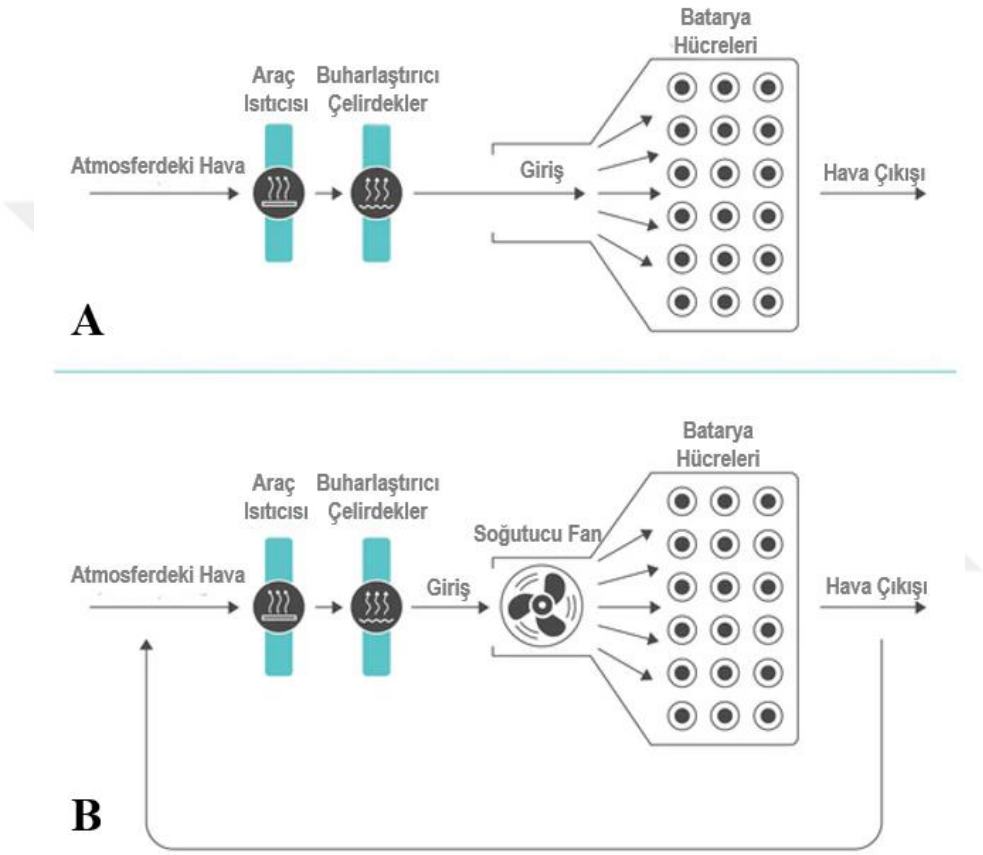
Bu bölümde çalışma kapsamı da göz önünde bulundurularak, soğutma ortamı üzerinde kullanılan akışkan ile soğutma termal yönetim sistemleri; hava ile soğutma ve sıvı ile soğutma sistemleri incelenmektedir.

Hava ile soğutma:

Basit olması, uygulanma ve bakım kolaylığı ile nispeten düşük maliyeti sebebiyle, hava ile soğutma tabanlı BTYS'leri günümüzde, elektrikli araçlarda kullanılan en geleneksel yaklaşımlardan biridir. Hava ile soğutma doğal (pasif soğutma) veya zorlanmış taşınım (aktif soğutma) ile yapılabilmektedir (Şekil 2.9). Pasif soğutmada, bataryayı soğutmak için atmosferden veya kabinden gelen doğal hava kullanılmaktadır. Bu yöntem basit olmakla birlikte bazı sınırlamalara sahiptir ve kısıtlı miktarda ısıyı uzaklaştırabilmekte veya yönetebilmektedir.

Aktif soğutmada ise, kullanılacak olan havanın sıcaklığını ayarlamak için bir soğutucu ve ısıtıcıya sahip klima ünitesi kullanılmaktadır. Bu sistem daha fazla girdiden oluşmakla birlikte daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bahsedilen sistem ile yaklaşık 1 kW'lık soğutma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda aktif soğutma ile daha yüksek oranda ve verimde ısı uzaklaştırılabilmekte ve soğutma işlemine tabi tutulan aracın sürüş ve şarj performansını iyileştirmektedir. Pasif soğutmada sadece çevredeki normal hava kullanılarak termal yönetim yapılırken, aktif soğutmada fan, ısı emici veya soğutma sıvısı gibi harici unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ek ihtiyaçlar ve girdilerden dolayı aktif soğutma daha pahalıdır ve çalışması için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır

(Lectron, 2024). Her iki sistemde, havanın düşük özgül ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği sebebiyle, batarya paketinin sıcaklık artışını belli bir ölçüde sınırlayabilmekte ve sıcaklık homojenliğini koruma konusunda bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır. Özellikle hızlı şarj veya yokuş yukarı hızlanma gibi bataryaların yüksek güç tükettiği durumlarda istenilen soğutma verimliliğini sağlayamamaktadır (Yue vd., 2021).



Şekil 2.9. Hava ile soğutma sistemlerinin genel görünümü
A) Doğal Taşınım **B)** Zorlanmış taşınım (Lectron, 2024)

Sıvı ile soğutma:

Hava ile soğutma sistemleri, yüksek güç gerektiren elektrikli araçlarda, li-iyon bataryanın termal yönetimi için sınırlı kalmaktadır. Genel olarak soğutma için kullanılan sıvı formdaki akışkanların, ısıl iletkenliği ve özgül ısı kapasitesi havadan daha yüksektir ve bu nedenle sıvı ile soğutma sistemlerinde ısıl verimlilik veya bataryadan ısı çekme kapasitesi daha yüksek olmaktadır (Zichen & Changqing, 2021). Hava ile soğutma

sistemleri ile kıyaslandığında, bataryanın arzu edilen sıcaklığa getirilmesi için çok daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden de günümüzde elektrikli araçlardaki bataryaların birçoğunda sıvı ile soğutma sistemine sahip termal yönetimler kullanılmaktadır. Sıvı ile soğutma, soğutucu akışkanın batarya ile direkt temasa geçerek ısı alışverişi yaptığı 'doğrudan soğutma' ve soğutma plakası, ısı boruları, soğutma ceketleri veya soğutma kanalları gibi harici yapılar ile dolaylı şekilde ısının absorbe edildiği 'dolaylı soğutma' olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.10).

Sıvı ile doğrudan soğutma sisteminde, batarya dielektrik soğutucu bir akışkana daldırılmakta ve doğrudan temas ile ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde kullanılan dielektrik sıvılar mineral yağı, silikon yağı, hidrofloroeter ve deiyonize su gibi akışkanlar olarak seçilebilir. Bu sistemde soğutucu akışkanlar batarya ile direkt temas ettiği için çok yüksek oranda ve hızda soğutma işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca yine bu sistem, doğrudan temas avantajıyla, tasarımı daha basit, yapısı daha kompakt olup üretim ve bakım maliyetlerinden açısından avantajlı olmaktadır. Ancak, bahsedilen soğutucu akışkanların viskozitesi alternatif soğutucu akışkanlara göre daha yüksektir ve bu durum da istenilen kütlesel akış hızını sağlamak için daha fazla pompalama gücünün gerektiği anlamına gelmektedir (Deng vd., 2018). Doğrudan soğutma sisteminde direkt olarak gerçekleşen temastan dolayı bazı güvenlik endişeleri bulunmaktadır. Soğutucu akışkan ile batarya arasında doğrudan temas sonrası oluşabilecek kısa devreyi ve elektrokimyasal korozyonu önlemek amacıyla, soğutucu akışkanın yalıtkan, toksik olmayan, kimyasal olarak kararlı ve alev geciktirici gibi özelliklere haiz olması gerekmektedir (Zichen & Changqing, 2021).

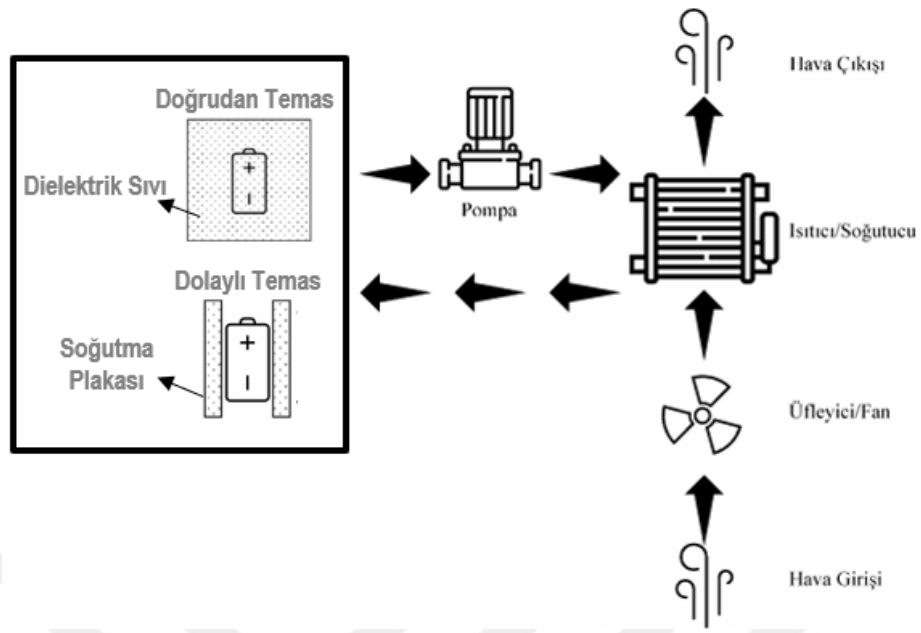
Sıvı ile dolaylı soğutma sisteminde, batarya üzerinde oluşan yüksek ısı, batarya hücreleri etrafına yerleştirilerek temas halinde bulunan soğutma plakası, ısı boruları, soğutma ceketleri veya kanalları ile dolaylı olarak emilmekte ve uzaklaştırılmaktadır. Burada bahsedilen harici yapılar içinde etilen glikol, aseton, su veya etilen glikol – su karışımı içeren soğutucu akışkanlar sirküle edilmektedir. Bahsedilen soğutucu akışkanlar harici yapılar vasıtasıyla batarya hücreleri bünyesindeki yüksek ısıyı uzaklaştırmaktadır. Dolaylı bir ısı transferi gerçekleştirdiği için bu sistemleri kullanmak daha güvenlidir ve

herhangi bir akışkan sızıntısı veya kısa devre gibi güvenlik problemlerini elimine etmek için ideal yöntemlerden biridir. Dolaylı soğutma sistemleri, soğutma plakası veya ısı boruları gibi harici yapılara ihtiyaç duyduğu için, batarya paketi nispeten daha ağır olmakta ve bazı yönetim sistemlerine göre üretim ile onarım maliyetleri açısından daha pahalı hale gelebilmektedir. Fakat gerek ısı transferi açısından yüksek verime sahip olması gerekse sistemde kullanılan soğutucu akışkanların düşük viskoziteye sahip olmasından dolayı ihtiyaç duyulan pompa enerjisinin sınırlı olması, bu sistemi alternatif metotlara göre avantajlı kılmaktadır.

Bahsedildiği gibi sıvı ile dolaylı soğutma sistemlerinde soğutma plakaları, ceketleri veya kanalları gibi harici yapılar kullanılmaktadır. Bu yapılar üzerinde, batarya hücrelerinin formuna bağlı olarak, maksimum temas yüzeyi ile optimum ısı transferini sağlamak adına uygun tasarımlar üzerinde çalışılmaktadır (J. Liu vd., 2023).

Sıvı ile dolaylı soğutma sistemi ele alınıldığında, literatürde ve piyasada kullanılan en yaygın harici yapı soğutma plakaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan batarya tipine bağlı olarak soğutma plakaları çeşitli formlarda üretilebilmektedir. Silindirik formda bir batarya hücresi için yine silindirik kıvrımlara sahip ve hücreyi bir nevi saran dalgalı tip (serpenter/snake) denilen soğutma plakaları kullanılmaktadır (Şekil 2.11). Yine batarya tipine bağlı olarak üst veya alt yüzeyden temas sağlayan düz plaka şeklinde de soğutma plakaları kullanılmaktadır.

Soğutma plakaları genel olarak kısıtlı veya şartlı alan sınırlamaları bulunan elektrikli araç uygulamalarında tercih edilmektedir. Temelde soğutucu akışkan için yerleşik kanallara ve nispeten ince et kalınlığına sahip preslenmiş metallerden oluşmaktadırlar. Genel olarak, bitişik batarya hücreleri arasına yerleştirilmektedir (Arora, 2018). İlgili sistemin çalışma prensibi ise şöyledir; soğutmada kullanılacak olan akışkan, bir ısı değiştiricisi ile şartlandırılmaktadır. Bu işlemin ardından ise soğutucu akışkan batarya sistemine gönderilmekte ve batarya yüzeyinden soğutma plakaları vasıtasıyla dolaylı temas ile soğutma işlemini gerçekleştirmektedir. Batarya sisteminden ayrılan soğutucu akışkan bir pompa vasıtası ile tekrar ısı değiştiricisine gönderilerek, çevrimin tamamlanması sağlanmaktadır (Li & Zhu, 2014).



Şekil 2.10. Doğrudan ve dolaylı sıvı ile soğutma sistemleri (Kaba vd., 2021)



Şekil 2.11. Dalgalı tip (serpenter) soğutma plakası örneği (Trumony, 2024)

2.2. Bilimsel Araştırmalar

Lan vd. (2016) mini kanallı soğutma sisteminin prizmatik li-iyon pillerin üzerindeki etkisini göstermek için parametrik çalışmalar gerçekleştirmiştir. İlgili çalışmalarda, farklı geometrik tasarımların, akış yönlerinin ve akış hızlarının etkileri incelenmiş ve pilde oluşan maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve sıcaklığın dağılımı izlenmiştir. Mini kanal sayısı arttıkça, soğutma performansı artmakta, fakat akışkan giriş hızı buna bağlı olarak azalmaktadır. Toplamda aynı mini kanal sayısına sahip sistemlerde, mini kanalların homojen bir şekilde dağıtıldığı tasarımlar, homojen olmayan tasarımlara daha yüksek ısıl performans göstermiştir. Ayrıca akışkan akış hızı ve yönünün de etkileri gözlemlenmiştir. En iyi performans, akışkan girişlerinin pilin sadece tek tarafında hizalandığı durumlarda elde edilmiştir; alternatif giriş ve çıkış kullanımı bu durumda önerilmemiştir. Nihayetinde mini kanallı soğutma sisteminin lityum iyon pillerin termal yönetimi üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiş ve bahsedilen sistemin minimum basınç kaybı yani düşük pompalama gücü maliyeti sağladığı, buna ilaveten maksimum sıcaklık artışını ve pil üzerindeki sıcaklık farkını etkin bir şekilde azalttığı özetlenmiştir.

Rao vd. (2017) akış kanalı boyunca sıralanmış altı hücreli bir pil modülünde, alüminyum blok uzunluğunun ve akış hızının sistemdeki termal performans üzerindeki etkilerini simülasyonlar ile incelemiştir. İlk olarak, soğutma sisteminde sabit temas yüzeyi yani sabit uzunluğa sahip alüminyum blok kullanılmıştır. Maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının, alüminyum bloğun uzunluğunun ve akışkan giriş hızının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Batarya modülündeki sıcaklık dağılımını incelemek veya iyileştirmek amacıyla için, değişken temas yüzeyine sahip alüminyum bloklar kullanılmış ve sabit uzunluğa sahip tasarım ısıl performans açısından karşılaştırılmıştır. Değişken temas yüzeyinde değişkenlik farklı katsayılar ile türetilmiş ve birden fazla model elde edilmiştir. Sistemin toplam ağırlığı ve pompanın ihtiyaç duyduğu güç tüketimi dikkate alındığında, değişken temas yüzeyine sahip sistemin sabit temas yüzeyine sahip sistemden ısıl verimlilik, sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık açısından üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhao vd. (2018) sıvı soğutmalı ve soğutma plakalı bir silindirik hücrelerden oluşan batarya modülü üzerinde deşarj/şarj, akışkan hızı, hücreler arasındaki temas seviyesi ve hücreler ile soğutma plakası arasındaki temas yüzeyini inceleyen parametrik bir analiz çalışması ortaya koymuştur. Analizler sonucunda deşarj/şarj hızının batarya modülü üzerinde ciddi bir etkisi olduğuna ve deşarj/şarj hızının artması ile modüldeki sıcaklık homojenliğinin bozulduğuna dikkat çekilmiştir. Akışkan hızını arttırmak maksimum sıcaklığı düşürmekte, homojenliği iyileştirmekte fakat pompa iş gücünü arttırmaktadır. Hücreler yani piller arasındaki temasın artması batarya ısıl performansına etki edebilir ama bu etki kayda değer bir iyileşmeye sebep olmamış ve temasın göz ardı edilebileceği kanısına varılmıştır. Hücreler ve soğutma plakası arasındaki temas yüzeyinin artması ısıl performansı iyileştirmekte yani maksimum sıcaklığı düşürmekte fakat batarya içindeki homojenliği nispeten kötüleştirmektedir. Sonuç olarak temas yüzeyi ideal seviyede tutulup, optimum nokta belirlenmelidir. Yapılan çalışma sonucunda genel manada dalgalı kanal tipine yani soğutma plakasına sahip batarya modülü başarılı bulunmuş ve bu doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir.

Lai vd. (2019) bu çalışmada lityum iyon pillerinin sıcaklığını kontrol etmek için kompakt ve hafif bir sıvı soğutmalı batarya ısı yönetimi sistemi sunmuşlardır. İlgili batarya bütününde 18650 tipi pil hücresi referans alınmış ve 5C yüksek deşarj hızı dikkate alınarak ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Pil hücrelerinden ısı emmek için üç eğimli/kavisli temas yüzeyine sahip yeni bir termal iletken yapı (Thermal Conductive Structure) tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan termal iletken yapının performansına kütle akış hızının, iç çapının büyüklüğünün, temas yüzeyi yüksekliği ve temas yüzeyi açısının etkilerinin ne kadar olduğu analizler ile parametrik olarak incelenmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar ile birlikte termal iletken yapının ağırlığını azaltmak için yapısal parametreler çalışılmıştır.

Tang vd. (2019) silindirik tipli lityum-iyon güç batarya modülü üzerinde çok kanallı ve dalgalı bir tasarıma sahip soğutma plakası (dalgalı tüp) ile soğutma sistemi çalışması gerçekleştirmiştir. Dalgalı tüp, bataryaların şekline uyum sağlayarak, etrafına sarılmakta ve ısıyı iletim yoluyla emmektedir. Bu çalışmada dalgalı forma sahip olan soğutma plakasının silindirik hücreleri hangi açıyla saracağı önem arz etmektedir. Bu yüzden ilgili

çalışmada çeşitli açılarla yani 20, 30, 40, 50 ve 60 derece temas sağlanmış ve farklı deşarj oranlarına bağlı olarak parametrik bir çalışma yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca soğutucu akışkan hızının batarya modülünün termal davranışı üzerindeki etkileri de analiz edilerek incelenmiştir. Sonuç olarak dalgalı tüp yani soğutma plakasının ısıl verimliliğinin çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Akışkan hızının şiddetine bağlı olarak hangi temas açısının en verimli ısı transferini sağlayacağı yorumlanmıştır.

Ling vd. (2023) bu çalışmada silindirik bir batarya modülünün mini-kanallara sahip soğuk plakalar vasıtasıyla soğutulmasını nümerik yöntemler ile incelemiştir. Amaç maksimum sıcaklığı düşürmek ve sıcaklık dağılımındaki homojenliği sağlamaktır. Bu doğrultuda ısı transfer yüzeyinin, soğutma plakasının pozisyonunun ve malzemesi ile kalınlığının ısıl performansa etkisi analiz edilmiştir. Sonuç olarak ısı transfer yüzeyini arttırdıkça sıcaklık artışı azalmış, fakat belli bir seviyeden sonra yüzey artışı ile ısıl fayda doğru orantılı bir şekilde ilerlememiştir. Soğutma plakasının konumlandırılması yaklaşık olarak iki derecelik bir sıcaklık düşümünü sağlamıştır. Ağırlık artışının olmadığı göz önünde bulundurulunca bu durum ısı performans açısından büyük fayda sağlamıştır. Soğutma plakasında yapılan malzeme değişikliği sıcaklık üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuştur. Ayrıca analizler sonrasında soğutma plakasının kalınlığının sistemin ısıl performansına etkisinin göz ardı edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Xu vd. (2023) bu çalışmada silindirik bataryalarda kullanılan soğutma plakasını yeniden yorumlayarak İngiliz anahtarı şeklinde bir tasarım üzerinde çalışmışlardır. Geleneksel yöntemlerde ve yaklaşımlarda oluşan ve akışkanın tek düze ilerlemesinden dolayı batarya düzeninin sonunda bulunan hücrelerde elde edilen maksimum sıcaklığı gidermek ve sıcaklık dağılımında homojenliği sağlamak adına, anahtar şeklinde bir tasarım üzerinde çalışılmıştır. Amaç hücre diziliminde akışkan yönüne bağlı olarak son sıralarda bulunan hücrelerin hem alt hem de üst yüzeyine temas edecek (dallanma) şekilde soğutma plakası tasarlamaktır. Böylece soğutucu akışkan her iki bölgeden de ısıyı çekebilecek ve homojenliği sağlayacaktır. Anahtar şeklindeki soğuk plakada tasarlanan dallanma yapısı, yukarı akış ve aşağı akış bölgeleri arasındaki ortak noktada tatmin edici bir şekilde ısı dağıtımı sağladığı kanısına varılmıştır. Ayrıca ilgili tasarımın geleneksel soğutma

plakalarına kıyasla daha hafif olduğu ve daha düşük basınç kaybına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Jeon vd. (2023) çalışmalarında, sıvı soğutmalı, soğutma plakalı sisteme sahip silindirik batarya modülünün ısıl performansının iyileştirilmesi üzerine bazı çalışmalar gerçekleştirmiştir. İlgili çalışmalar yapılırken 4 farklı tasarım kullanılmıştır. Birinci tasarım temel model olarak belirlenmiş ve diğer çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Genel ilerleyiş soğutma plakasının tasarımındaki farklılıkları ve akış yönünün paralel veya seri olarak belirlenmesi üzerine dayanmaktadır. Birinci tasarım yani seri akışa sahip model, kesintisiz akışın olduğu ve buna uygun dalgalı forma sahip soğutma plakasının olduğu çalışmadır. İkinci tasarım paralel akışa sahip yani soğutma plakalarının paralel şekilde konumlandırıldığı birbirinden ayrık akışlara sahip tasarımdır. Üçüncü tasarım birinci tasarım gibi seri, yani sürekli akışa sahip olacak şekilde bir soğutma plakasına sahip fakat ilgili soğutma plakası ikiye ayrılmış ve plakanın yarısından akışkan giriyorken diğer yarısından akışkan çıkmakta, yani hücre bazında incelersek hücrenin alt yanal yüzeyi ve üst yanal yüzeyine farklı ısılarda dolaylı yoldan akışkan teması olmaktadır. Son tasarım ise ikinci tasarım ve üçüncü tasarımının kombinasyonundan oluşmaktadır. İlgili çalışmada sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü tasarım için temel tip, paralel tip, zıt akışlı tip ve çoklu zıt akışlı tip adlandırılması kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, zıt akış tipinin temel tipe göre üstün soğutma performansı verdiği görülmüştür. Anca zıt akış tipinde temel tipe göre daha fazla basınç kaybı olmaktadır. Paralel tipte basınç kaybı düşük olmuş fakat beklenen ısıl performans görülememiş yani bataryadan uzaklaştırılan ısı sınırlı kalmıştır. Bu yüzden paralel tip ve zıt akışlı tip harmanlanarak çoklu zıt akışlı tip modeli elde edilmiş ve hem basınç kaybı hem de sıcaklık dağılımı açısından ideal sonuçlar elde edilmiştir. İlgili çalışmalar farklı deşarj oranlarında (3C ve 5C) ve çeşitli akışkan hızlarında (0,1 m/s, 0,2 m/s, 0,3 m/s ve 0,4 m/sn) gerçekleştirilmiştir.

Y. Wang vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada silindirik hücrelere sahip bir batarya düzeninde, soğutma plakası özelinde belirli parametreleri değiştirerek ısıl performansa odaklanmıştır. İlgili çalışmada soğutma plakasındaki kanal sayısının, hücre ve soğutma plakası temas açısının ve soğutucu akışkan hızının soğutma performansına etkileri incelenmiştir. Akışkan hızı için sırasıyla dört farklı değer; 0,01 m/sn, 0,05 m/sn, 0,1 ve

0,2 m/sn kullanılmıştır. Soğutma plakası üzerindeki kanal sayısı için sırasıyla; 2, 4, 6, 8 değerleri ve ısıl performansa etkisi incelenmiştir. Ayrıca temas yüzeyi için ise sırasıyla 20, 40, 60, 80 derecelik temas açıları dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda temas açısının soğutma performansı açısından büyük bir öneme sahip olduğu fakat belli bir seviyeden sonra (70 derece) etkinin sınırlı kaldığı, kanal sayısının ve akışkan giriş hızının ise diğer girdilere bağlı olarak optimum sonuçlar verdiği noktaların farklı olduğu belirlenmiştir.

Xin vd. (2023) yaptıkları çalışmada silindirik lityum-iyon batarya modülleri için hava ve sıvı soğutmaya dayalı hibrit bir soğutma sistemi tasarlamayı amaçlamıştır. İlgili çalışmada bataryaların ürettiği ısıyı soğutucu akışkana aktaran, bataryaların eksenel doğrultusunda sabit aralıklarla yerleştirilmiş ısı ileten bloklar (Heat Conducting Block) kullanılmıştır. Çalışmanın amacı bahsedilen bloklar ve hibrit soğutma sistemi ile birlikte bataryanın sıcaklık dengesini korumaktır. Bu yüzden ısı ileten blokların konumlandırılma planı, sayısı ve soğutucu akışkanın hızı gibi faktörler dikkate alınarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları incelendikten sonra ilk olarak hibrit sistemin tekil halde olan hava veya sıvı ile soğutma sistemlerinden ısıl anlamda daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra, ısı ileten blokların sayısının arttırılması ile birlikte temas yüzeyinin ve haliyle birim zamanda geçen ısı akısının artması ile maksimum sıcaklığın azaldığı sıcaklık dağılımını olumlu anlamda etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca ısı ileten blokların teması maksimum hale getirecek ve hava akışına izin verecek şekilde konumlandırılmasının termal sonuçları olumlu anlamda etkilediği ortaya koyulmuştur.

H. Wang vd. (2020) silindirik lityum-iyon bataryalar için deneysel ve sayısal simülasyon sonuçları içeren sıvı soğutmalı batarya ısı yönetimi sistemi ortaya koymuşlardır. Çalışmadaki asıl amaç paralel akışlı ve seri akışlı soğutma plakalarının batarya sistemi üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Paralel akışlı sistemde akış yönleri harmanlanarak da analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durumlara ek olarak akışkan hızının ısıl verimliliğe olan etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın sonunda akış hızının belirli bir aralığa kadar ısıl verimliliğe etkisinin ciddi bir seviyede olduğu fakat bahsedilen kritik değerlerden sonra ilgili verimliliğin makul derecede artmadığı fakat pompa gücü tüketiminin dikkate değer artış gösterdiği raporlanmıştır. Seri soğutmaya kıyasla, paralel soğutma sisteminin

belirgin bir avantaj ve ısıl verimlilik sağladığı ortaya koyulmuştur. Paralel soğutmanın batarya sıcaklığını daha kısa sürede kararlı bir duruma getirdiği ve batarya içinde özellikle hücre sayısı fazla olduğunda daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığı ortaya koyulmuştur.

Eğin (2019) yaptığı çalışmada 20 adet lityum iyon hücre bulunan bir batarya modülünü ele alarak bilgisayar tabanlı simülasyonlar ile batarya termal yönetimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Analizler kapsamında Ansys Icepak paket programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında sıvı soğutmalı ve soğutma plakalı bir model bütünü tasarlanmış ve soğutucu akışkan olarak saf su kullanılmıştır. Modüle giriş yapan soğutucu akışkan ve ortam sıcaklığı parametrik olarak referans alınmış ve bahsedilen parametrelerin ısıl performansa etkisi incelenerek, karşılaştırmalı sonuçlar ile değerlendirmeler yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Temeli

Bu bölümde tez çalışmasına konu olan sıvı soğutmalı ve soğutma plakalı silindirik tipli batarya hücrelerine sahip batarya modülünün ısı yönetimi ile ilgili yapılan çalışmalarda tercih edilen materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

Batarya sistemlerinde çalışma sıcaklığının ideal veya arzu edilen aralıklarda tutulması büyük önem arz etmektedir. Ani veya aşamalı sıcaklık artışları veya ısıl dengesizlikler bataryanın performansını olumsuz yönde etkileyerek, ısıl performansı düşürmekte ve aynı zamanda da güvenlik açığına sebebiyet verebilmektedir.

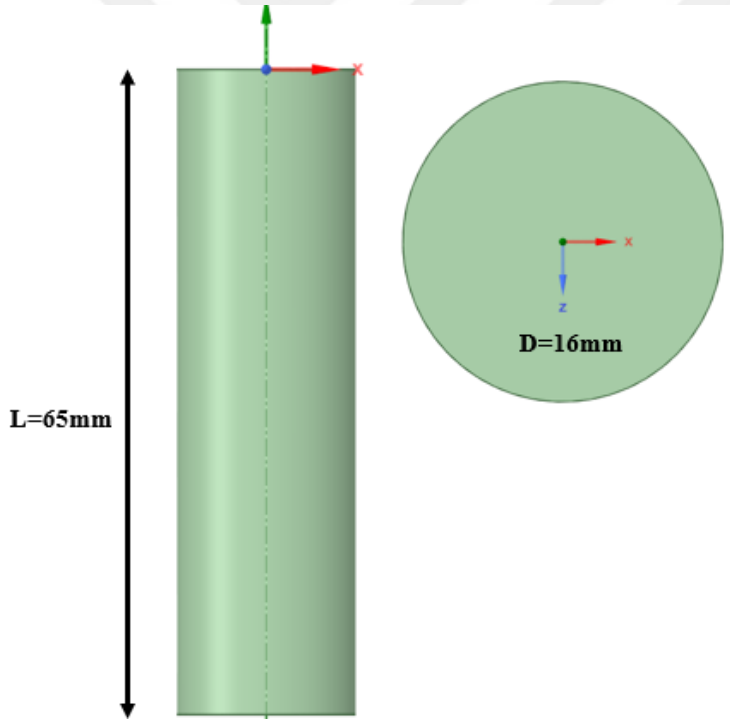
Bu çalışmada, bahsedilen olumsuzlukları gidermek veya azaltmak adına hali hazırda kullanılan batarya sistemleri incelenmiş, incelenen modeller üzerinden baz bir tasarım modeli oluşturulmuştur. İlgili baz model oluşturulurken SpaceClaim bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen baz model üzerinden yapılan tasarımsal değişiklikler/eklemeler ve farklı yaklaşımlar ile toplamda dört adet (baz model ile birlikte) olmak üzere sırayla: baz model, tasarım-1, tasarım-2, tasarım-3 adlı modeller elde edilmiştir. Tasarımsal değişiklikler baz modele eklenen farklı kanatçık yapılarını, yaklaşımlar ise zıt akış yönlerini içermektedir. Eklenen kanatçık yapıları ile birlikte oluşan yeni tasarımlar üzerinden maksimum sıcaklık, modül içindeki sıcaklık farkı (homojen dağılım) ve basınç kaybı gibi unsurlar incelenmiştir. Nihai analizlere geçmeden önce, ilgili analizlerde kullanılacak olan akışkanın belirlenmesi için farklı karışım oranlarına sahip etilen glikol-su (Eg-su) karışımları baz model üzerinden incelenmiş ve hesaplanan çıktılar grafikler ve görseller ile desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile birlikte nihai analizlerde kullanılacak olan soğutucu akışkan tespit edilmiş ve analizlere dahil edilmiştir. Bahsedilen tüm nümerik analizler Ansys Fluent (Release 2021 R2) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak değinilen veya özetlenen çalışmalar ilerleyen bölüm başlıklarında detaylı bir şekilde açıklanmış ve elde edilen sonuçlar ile desteklenmiştir.

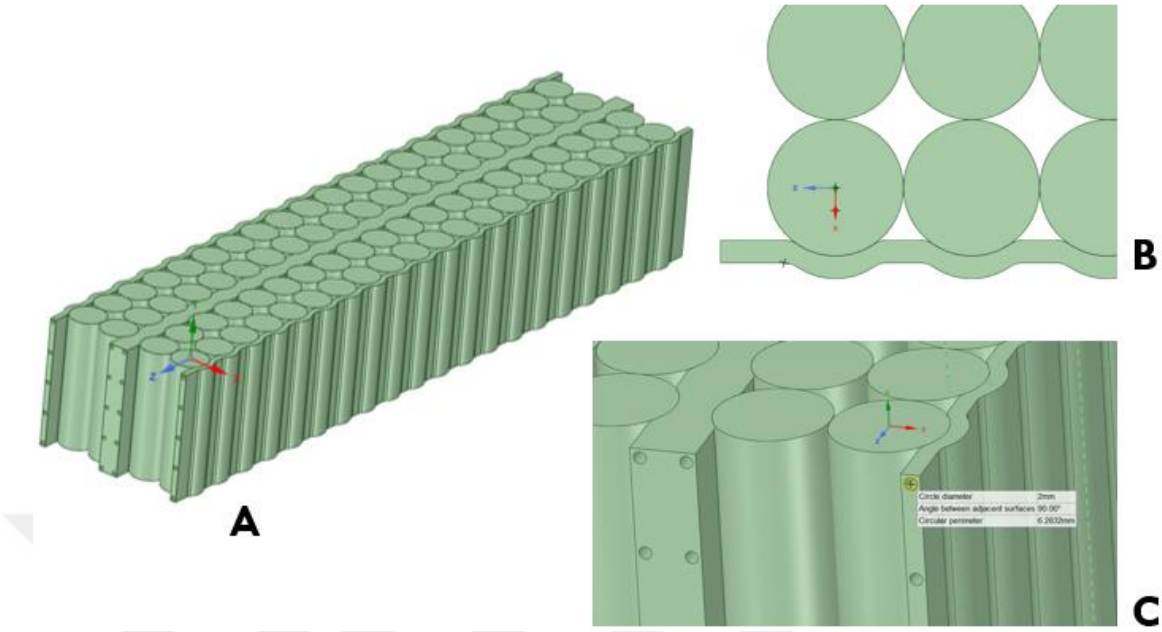
3.2. Batarya Modüllerinin Tasarım Detayları

Baz model ile birlikte toplamda dört farklı tasarıma veya yaklaşıma sahip batarya modülleri Şekil 3.2 – 3.6'da görseller ile detaylandırılmıştır. Tüm modeller dört seri yirmi paralel olmak üzere (4x20) toplam seksen adet 18650 tipli silindirik hücreden oluşmaktadır. 18650 tipli silindirik hücreler 18 mm çapa, 65 mm uzunluğa sahiptir. İlgili hücrelerin CAD modelde temsil edilmiş hali Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

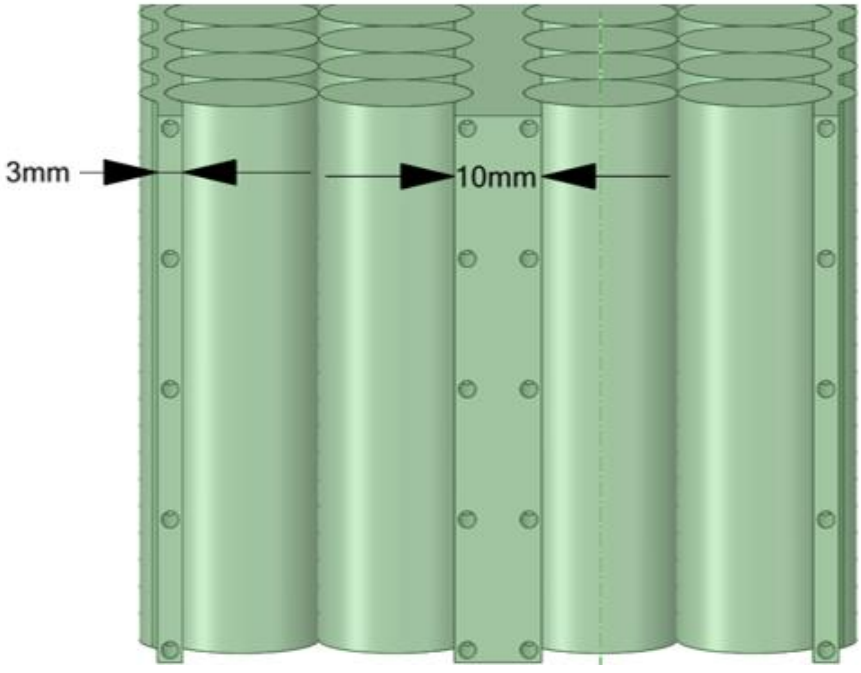
Baz model 3 mm kalınlığa sahip 0,5 mm et kalınlığı olan soğutma plakası içermektedir. Soğutma plakası ikişer seri dizilimdeki hücre gruplarına her iki taraftan yanal temas sağlamaktadır. Modelin orta kısmındaki soğutma plakası tasarım gereği 10 mm kalınlığa sahiptir. Bahsedilen baz model Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de detaylandırılmıştır.



Şekil 3.1. 18650 tip silindirik hücrenin genel ölçüleri

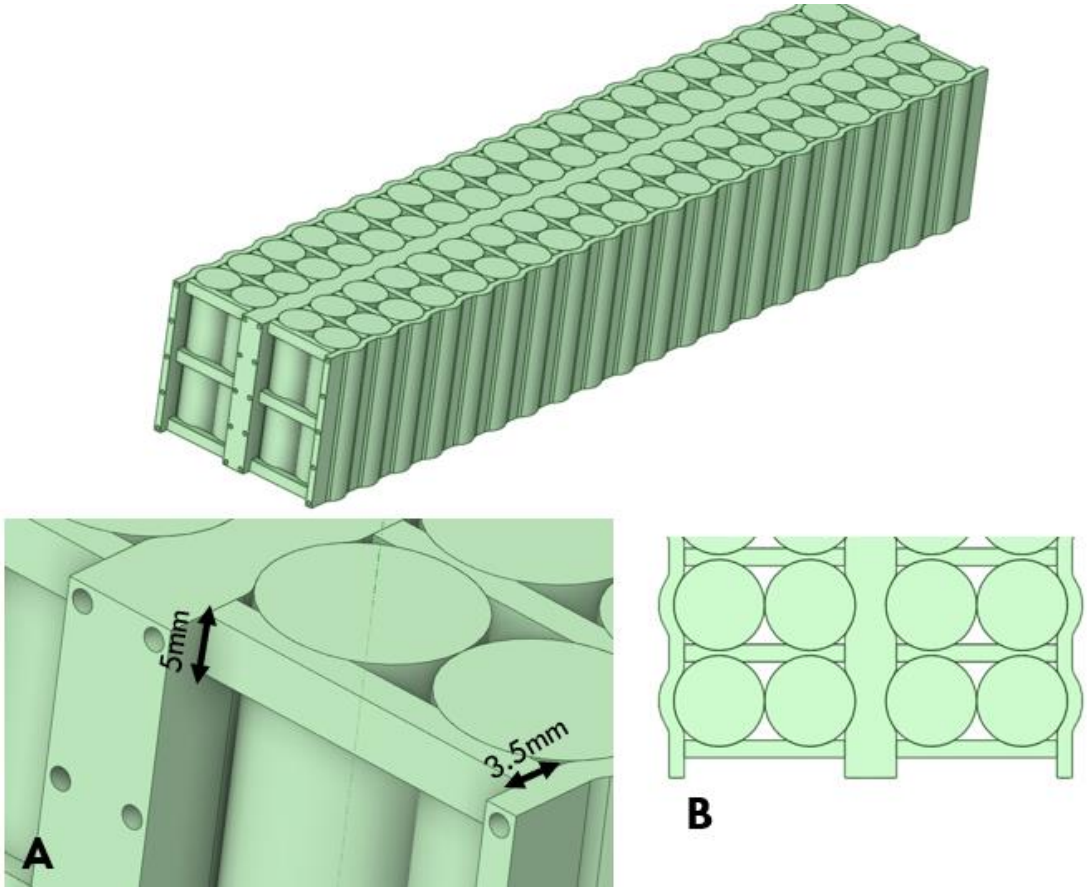


Şekil 3.2. Baz model tasarımının genel görünümü
A) İsometrik görünüm **B)** Üstten görünüm **C)** Yakınlaştırılmış görünüm



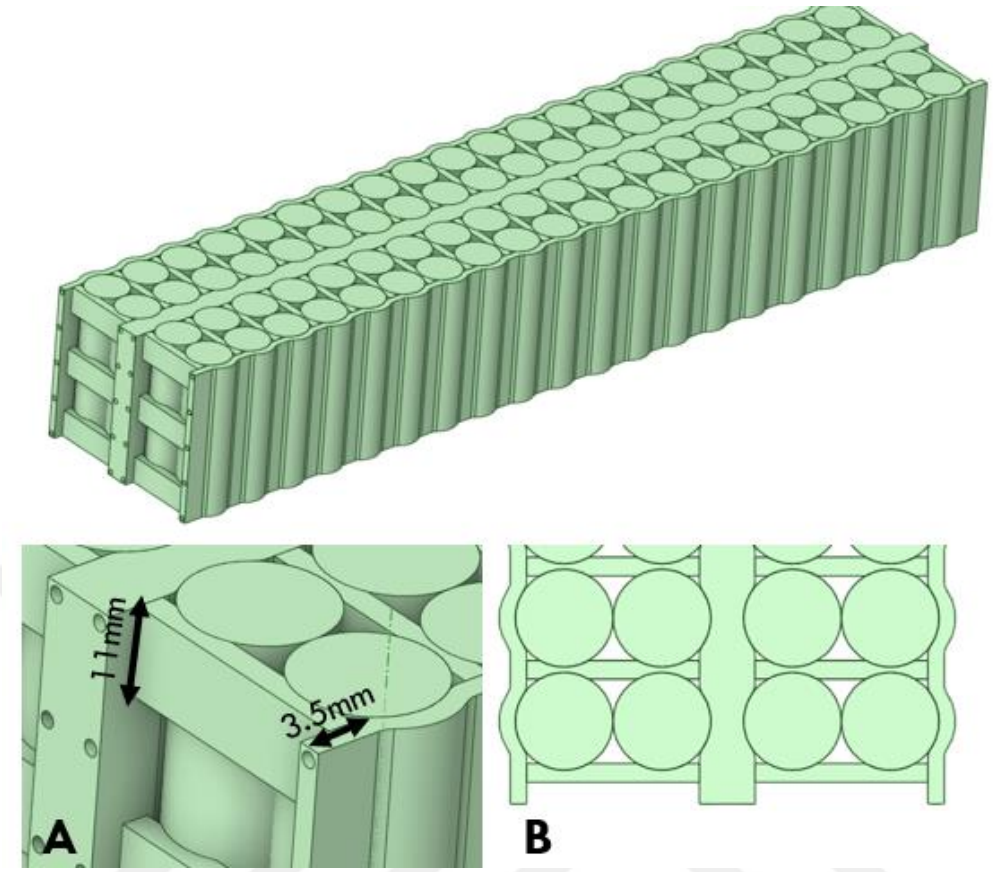
Şekil 3.3. Baz model tasarımının önden görünümü

Belirtilen baz model tasarımına, temas yüzeyini arttırarak, silindirik hücrelerde üretilen yüksek ısının emilmesini sağlamak amacıyla kanatçıklar eklenmiş ve tasarım-1 modeli oluşturulmuştur. Bahsedilen kanatçıklar üç adet olmak üzere tüm silindirik hücre aralarına konumlandırılmıştır. Belirtilen kanatçıklar bir silindirik hücreye orantılı bir şekilde üst, orta ve alt kısımdan temas ettirilmiştir. Tasarım-1 modelinin geometrik detayları Şekil 3.4'de belirtilmiştir.



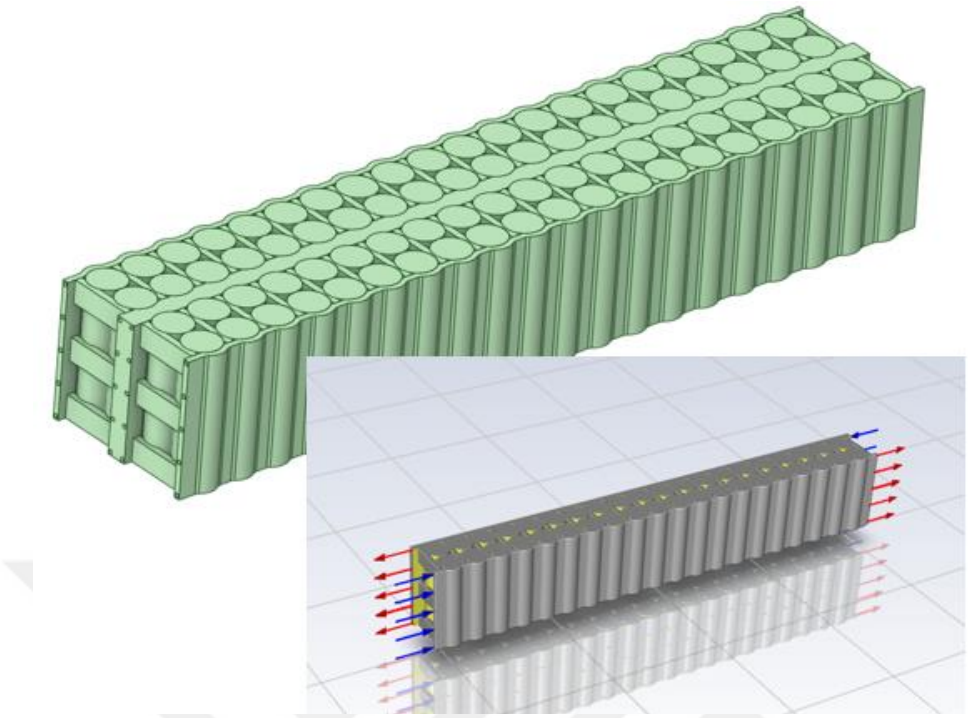
Şekil 3.4. Tasarım-1 genel görünüm **A)** Kanatçık ölçüleri **B)** Üstten Görünüm

Tasarım-1 elde edildikten sonra kanatçıklar ile sağlanan ekstra teması daha da fazla arttırmak ve ısıl performansı gözlemlemek adına genişletilmiş kanatçıklar ile birlikte tasarım-2 modeli elde edilmiştir. Tasarım-2 modeli de üç adet ve silindirik hücreyi orantılı bir şekilde kapsayan kanatçıklara sahiptir. Bahsedilen tasarım-2 modeli detayları Şekil 3.5'de belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Tasarım-2 genel görünüm **A)** Kanatçık ölçüleri **B)** Üstten Görünüm

İlgili modellerde kurgulanan senaryoda literatürdeki birçok çalışmaya benzer şekilde soğutucu akışkan soğutma plakalarına aynı yönden girmekte ve yine aynı yönden çıkmaktadır. Soğutucu akışkan soğutma kanallarına başlangıç sıcaklığı ile girmekte ve soğutma plakasından çıkana kadar da ısı emilimi ile sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklığı artmış olan soğutucu akışkan batarya modülünde bulunan son sıralardaki silindirik hücreleri, ilk sıradaki hücrelere kıyasla yeteri seviyede soğutamamaktadır. Bu durumun izlenmesi ve özellikle kanatçık temas yüzeyleri arttırılmış olan tasarım-2 modelindeki etkilerini görmek adına çapraz akış/zıt akış yaklaşımı benimsenmiştir. Özet olarak tasarım-2 modelindeki tüm geometrik detaylar sabit tutulmuştur. Farklı olarak bir soğutma plakasından soğutucu akışkan giriş yapıyorken, paraleldeki diğer soğutma plakasından soğutucu akışkan çıkış yapmaktadır. Bu yaklaşım ile birlikte tasarım-3 modeli elde edilmiştir (Şekil 3.6). Şekil 3.6'da belirtilen mavi oklar giriş (input) halindeki soğutucu akışkanı, kırmızı oklar ise çıkış (output) halindeki soğutucu akışkanı temsil etmektedir.

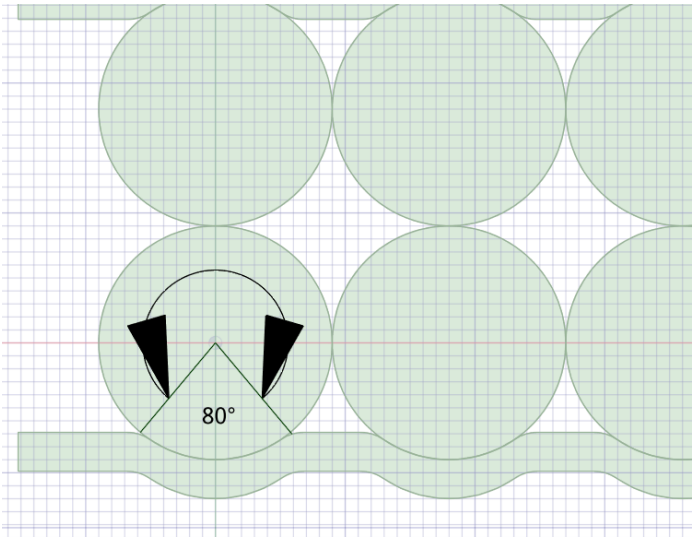


Şekil 3.6. Tasarım-3 modelinin genel görünümü ve akışkanın giriş çıkış gösterimi

3.2.1. Temas yüzeyi ve açı detayları

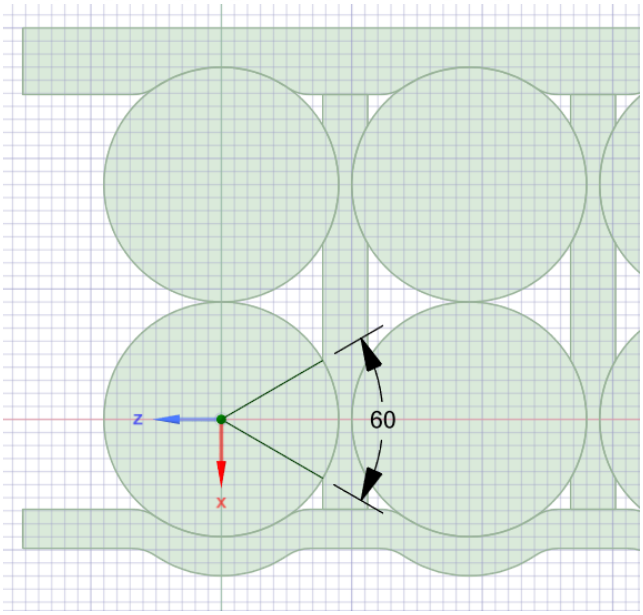
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hem batarya hücrelerinin kendi arasındaki hem de batarya hücreleri ve soğutma plakası arasındaki temas açısının ısıl performansa olan etkilerinin araştırıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalar sonrasında batarya hücreleri arasındaki temas açısının ısıl performans üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir (Zhao vd, 2018). Bu yüzden hücreler arasında teğetsel bir temas bulunmaktadır.

Batarya hücreleri ve soğutma plakası arasındaki açının önemi ile ilgili olan çalışmalar incelendiğinde ise ilgili temas açısının ısıl performansı kayda değer bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir (Y. Wang vd, 2019). Bu yüzden batarya hücreleri ve soğutma plakası arasına tasarımsal imkanlar dahilinde 80 derecelik (°) bir alfa (α) temas açısı tanımlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Batarya ve soğutma plakası arasındaki temas açısı (α)

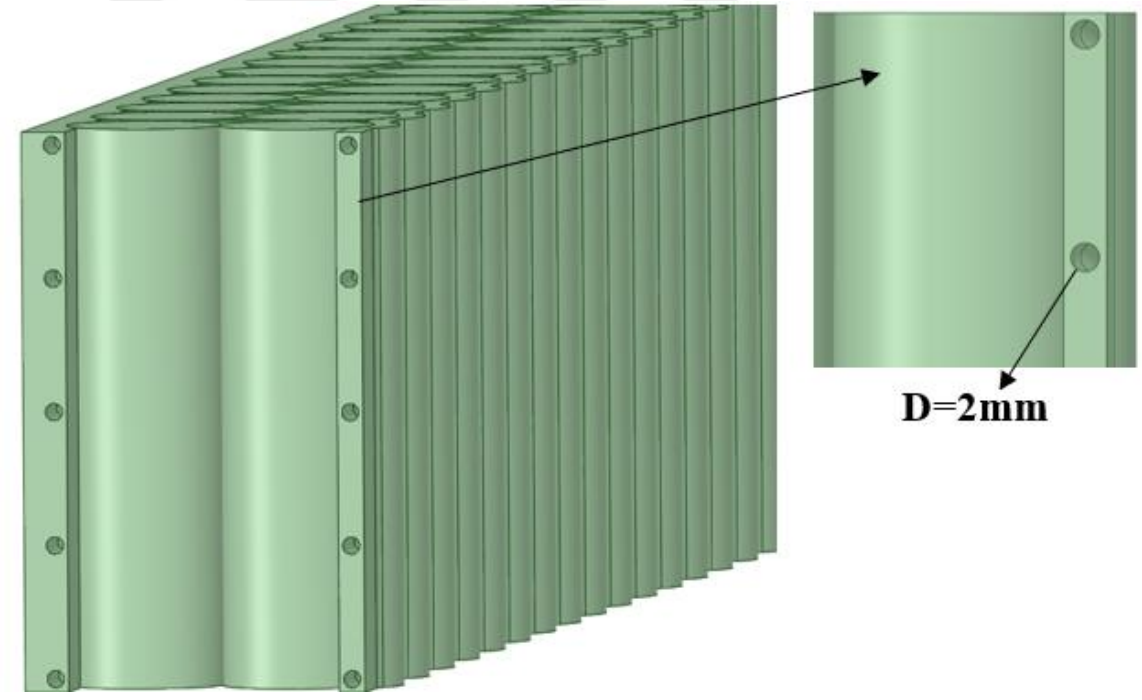
Tasarım-1, 2 ve 3 modellerinde baz modelden farklı olarak kanatçıklar bulunmaktadır. İlgili kanatçıkların batarya hücreleri ile olan temas açıları da önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalar ve tasarımsal imkanlar dahilinde kanatçıklar ve hücreler arasında 60°'lik bir beta (β) temas açısı bulunmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Batarya hücresi ve kanatçık arasındaki temas açısı (β)

3.2.2. Soğutma plakası akış kanalı detayları

Literatür ve bilimsel çalışmalar incelendiğinde soğutma plakası üzerindeki akış kanalların sayısının batarya sistemi bünyesinde üretilen yüksek ısıyı emme noktasında ciddi bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Soğutma plakası üzerinde açılan akış kanallarının sayısı belli bir seviyeye kadar arttıkça verimli sonuçlar vermiştir. Basınç kaybı, maliyet ve tasarımsal dezavantajlar göz önünde bulundurulduğunda kanal sayısının olması gereken optimum sayı genel anlamda tespit edilmiş ve tespit edilen sayının beş adet olduğu öngörülmüştür (You, 2023). Akışkan kanalının sayısı kadar konumu ve çap (D) değeri de ısıl performansı etkilemektedir. Önceki çalışmalar incelendiğinde akış kanal sayısının soğutma plakası boyunca beş adet olması ve ilgili kanalların 2 mm çapa sahip olması kararı verilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Soğutucu kanal detayları

3.3. Malzeme Detayları

Li-iyon bataryalar metal bir ceket içerisine yerleştirilen, her biri farklı termofiziksel özelliklere sahip elektrotlar, elektrolit ve ayırıcıdan oluşan katmanlı bir yapıdan meydana gelmektedir. Bu yüzden her elementin malzeme modelini ideal bir şekilde oluşturmak veya modellemek beraberinde ciddi zaman ve çalışma gerektirmektedir. Çalışma kapsamında bu adımı daha pratik hale getirmek için bazı kabuller yapılmıştır. Her bir batarya hücresinin kendi içinde dengeli ve homojen bir dağılıma sahip olduğu varsayılarak, tek bir malzeme modeli üzerinden pilin malzeme özellikleri atanmıştır. Silindirik bataryalarda eksenel yöndeki ısı iletim direnci çok düşük olduğu için ihmal edilmiş ve tüm hücre kapsamında radyal yöndeki katsayı genel ısı iletim katsayısı olarak referans alınmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Bir batarya hücresinin homojenleştirilmiş termofiziksel özellikleri (Korkut vd., 2024)

Pil Tipi	18650 / Silindirik / Lityum iyon
Isı İletim Katsayısı	3,63 W/mK
Isı Kapasitesi	1679 j/kgK
Yoğunluk	2087 kg/m^3

Çizelge 3.2'de literatürden alınan 25°C'de etilen glikol-su (eg-su) karışımlarının termofiziksel özellikleri özetlenmiştir. Tabloda etilen glikol (Eg) miktarının toplam karışıma oranı belirtilmiştir. Soğutma plakası ve kanatçıklara ise Ansys Fluent malzeme kütüphanesi üzerinden standart alüminyum özellikleri atanmıştır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.2. Soğutucu akışkan termofiziksel özellikler (TheEngineeringToolBox, 2024)

Akışkan Türü	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Özgül Isı (J/kg K)**	**İletim Katsayısı (W/m K)**	**Dinamik Viskozite (Pa s)**
Su	998	4182	0.6	0.001003
%40 Eg	1060.3	3660.5	0.44	0.0022
%50 Eg	1076	3488.5	0.395	0.0028
%60 Eg	1091.8	3301.5	0.35	0.0038

Çizelge 3.3. Soğutma plakası ve kanatçıklar için malzeme özellikleri (Alüminyum)

Malzeme	Alüminyum
Isı İletim Katsayısı	202,4 W/mK
Isı Kapasitesi	871 j/kgK
Yoğunluk	2719 kg/m^3

3.4. Soğutucu Akışkanın Belirlenmesi

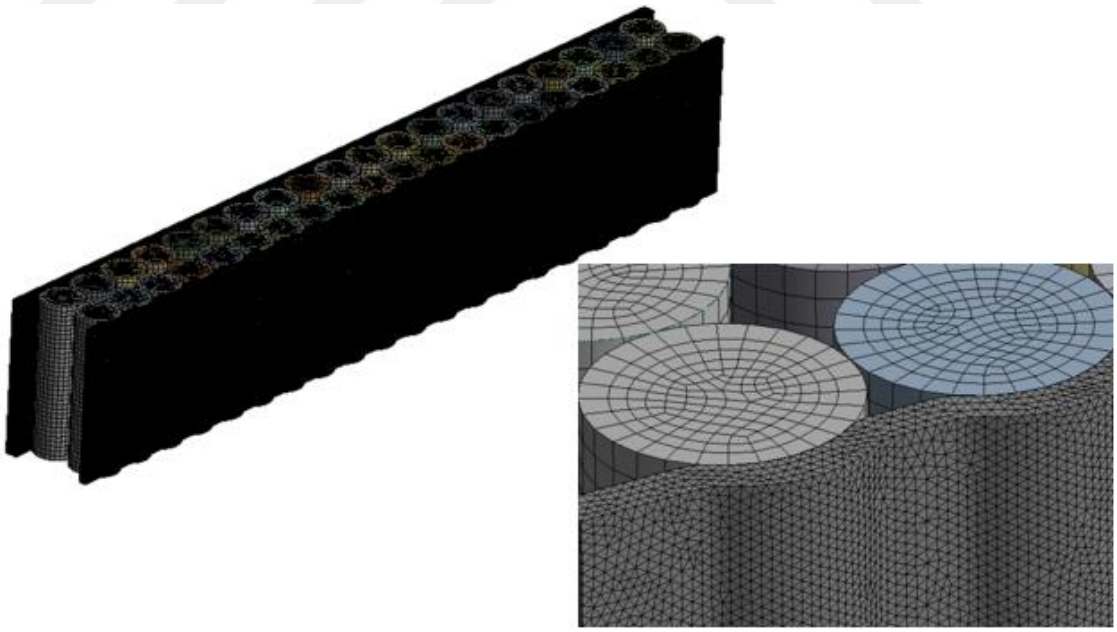
Batarya soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanlar, bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışması için büyük bir önem arz etmektedir. Optimum soğutucu akışkanın seçilmesi ve efektif soğutma sistemlerinin kullanılması, bataryaların termal yönetimini iyileştirerek ısıl performans artışı sağlar ve güvenlik risklerini azaltır. Bu sebeple, batarya soğutma sistemlerinin oluşturulmasında soğutucu akışkanların işlevi ve özellikleri titizlikle incelenmeli, değerlendirilmeli ve bu doğrultuda seçim yapılmalıdır.

Güncel batarya soğutma sistemleri incelendiğinde, en yaygın kullanılan soğutucu akışkanlardan biri eg-su karışımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hem donma ve buharlaşma noktası açısından sağladığı avantajlar hem de ısıl performansının tatmin edici seviyede olması eg-su karışımını cazip kılmaktadır. Bu doğrultuda nihai analizlere geçmeden öncede baz model üzerinden çeşitli eg-su karışım oranlarına göre ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. İlgili analizler sırayla %40, 50 ve 60 oranlarında etilen glikol içeren karışım üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile birlikte baz model üzerinde oluşan maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve basınç kaybı incelenmiştir. İncelemeler sonucunda nihai analizler için uygun olan soğutucu akışkan karışımı analiz girdilerine atanmıştır.

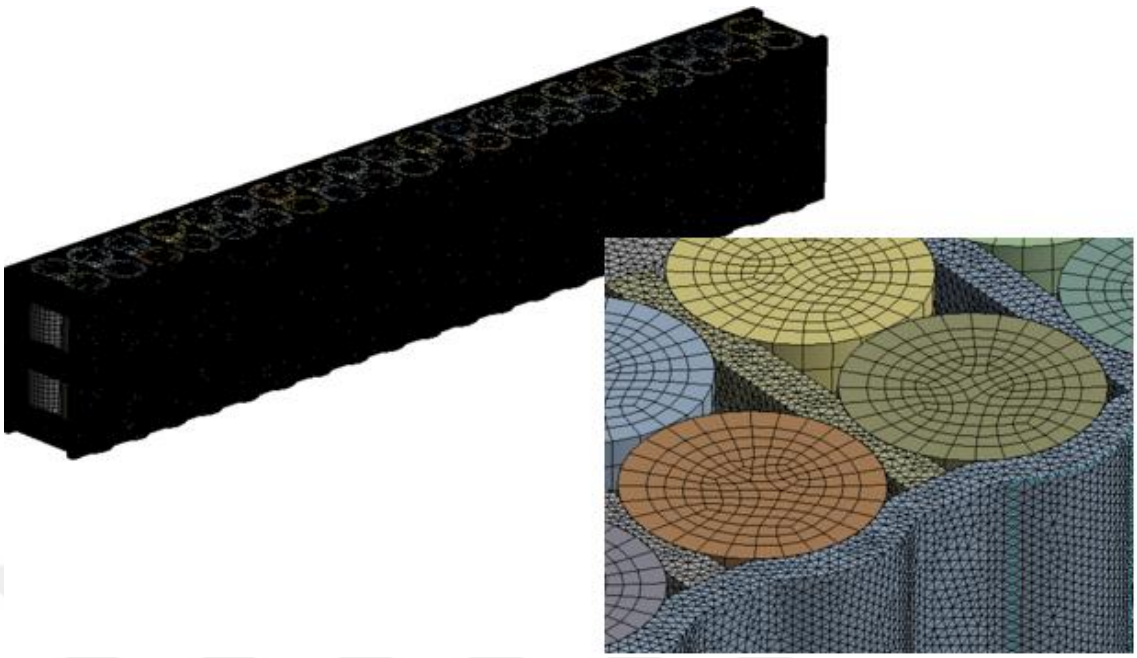
3.5. Batarya Modülünün Ağ (Mesh) Yapısı

Nihai analizlere başlamadan önce ilgili modelin literatürde de mesh olarak ifade edilen ağ örme işleminin yapılması gerekmektedir. Bu aşamada model küçük parçalara bölünerek analizlere hazır hale getirilir.

Modelde ağ örme işlemi gerçekleştirilirken bütünü oluşturan parçaların geometrik yapısı ve boyutları tercih edilen mesh yapısını, metodunu ve boyutlarını da etkilemektedir. Bu veriler ile birlikte modelde silindirik hücrelere sweep metod ile hexahedral (Hex) elemanlar tanımlanmıştır. Bahsedilen metod silindirik hücreler boyunca hex elemanların homojen bir şekilde dağılmasını sağlamıştır. Soğutma plakası ve kanatçık yapıları için mesh oluştururken ise geometrik şartlar göz önünde bulundurularak tetrahedral (Tet) elemanlar kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde girintili, çıkıntılı, değişken veya süreksiz yüzeylere sahip modellerin ağ yapısı problemsiz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken mesh boyutları hassaslaştırılmış ve eleman kaliteleri de göz önünde bulundurularak nihai ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11).



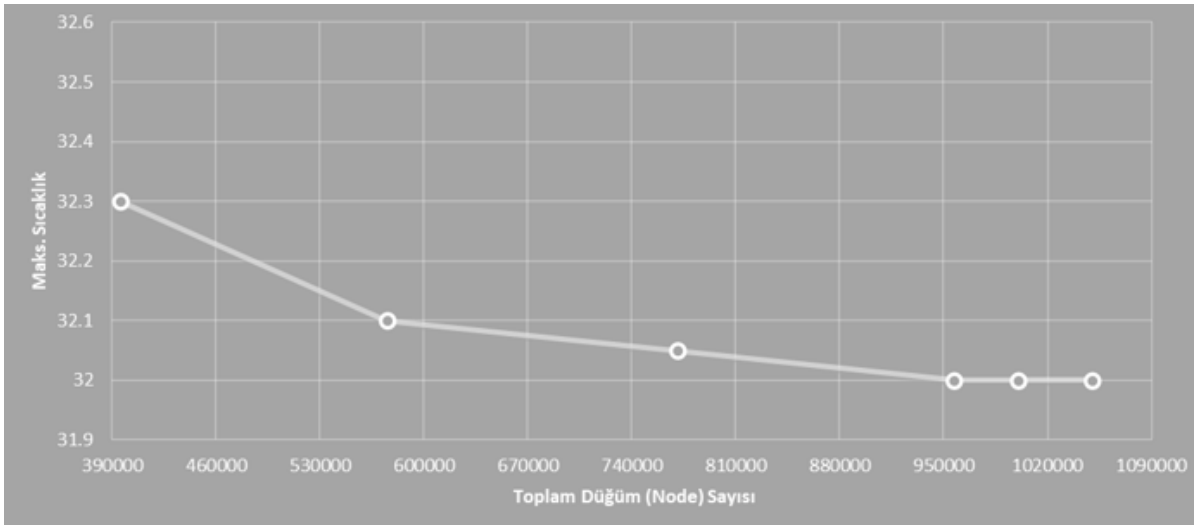
Şekil 3.10. Baz model tasarımının genel ve yakınlaştırılmış mesh görünümü



Şekil 3.11. Tasarım-2 modelinin genel ve yakınlaştırılmış mesh görünümü

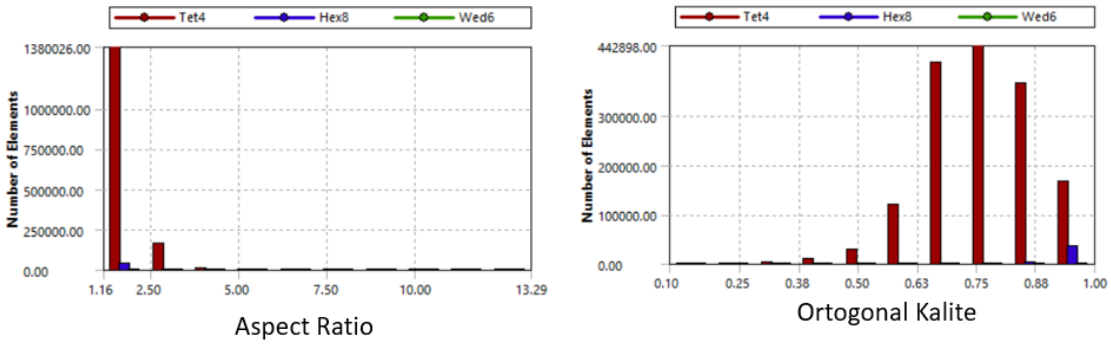
3.5.1. Ağdan bağımsızlık (Doğrulama) çalışmaları

Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) hesaplamalarında kullanılacak olan mesh metodunun ve boyutunun analiz sonuçlarına etkisi büyüktür. Temelde modelin olabildiğince küçük parçalara bölünmesi arzu edilir. Bu sayede daha kesin ve rasyonel sonuçlar elde edilebilir. Fakat analizin gerçekleştirildiği bilgisayar ortamının da bir çözüm kapasitesi bulunmaktadır ve mesh yapısı hassaslaştırıldıkça da bu kapasite bazen aşılmakta ve donanımsal sebepli olarak, analiz sonuçları elde edilememektedir. Ayrıca mesh sayısı ne kadar fazla olursa analiz süresi de bir o kadar artmaktadır. Bu durumda mühendisleri veya analizleri gerçekleştirecek olan kişileri, zaman yönetimi açısından zorlamaktadır. Tüm bu unsurlar göz önünde bulundurulduğunda nihai analizlere geçmeden önce sonuçların model ağ yapısından bağımsızlığının yani doğrulamasının simülasyon ortamında ispatlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda baz model üzerinden çeşitli eleman boyutları ile birlikte doğrulama işlemi gerçekleştirilmiş ve ağ yapısı (mesh) değişkeninde, maksimum sıcaklık değeri üzerinden yapılan incelemeler ile nihai mesh boyutu belirlenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Toplam düğüm sayısı ile maksimum sıcaklık değişim grafiği

Şekil 3.12 incelendiğinde yaklaşık olarak toplam 950 000 düğüm (node) sayısından sonra maksimum sıcaklık değişiminin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda ilgili değişimin sabitlendiği son nokta referans alınmış ve analiz modeli 1 050 000 toplam düğüm sayısına sahip olduğu mesh boyutlarında nihai analizlere dahil edilmiştir. Mesh doğrulama çalışması baz model üzerinden yapıldığı için buradan elde edilen mesh boyutları diğer modeller içinde kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 3.13'de nihai mesh boyutları sonrası genel yapının ortogonal kalitesini ve aspect oranı değerlerini gösteren grafikler paylaşılmıştır. Ortogonal kalite için mesh elemanlarının 0,6 - 1 aralığında olması yüksek kaliteye işaret ederken, aspect ratio için bu değer 1 - 5 arası olmaktadır (Ansys, 2013). Grafikler incelendiğinde model bütününün genel anlamda yüksek kaliteye sahip mesh elemanlarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13. Genel mesh yapısının ortogonal kalite ve aspect oranı değerleri

3.6. Analizlerde Kullanılan Denklemler, Kabuller ve Yaklaşımlar

3.6.1. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri

Sabit özellikli sıkıştırılamaz akış, sıvının yoğunluğunun ne zaman ne de mekânda değişmediği bir durumu ifade eder. Bu tip akışlarda, özellikle zamana bağlı olarak değişen durumları analiz ederken, su gibi sıkıştırılamaz sıvıların hareketini incelemek için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır. Bu denklemler, akış alanındaki fiziksel süreçleri matematiksel olarak modelleyerek, akışın zaman içinde nasıl evrildiğini anlamamıza olanak tanır.

Sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemi, sıkıştırılamaz akışlarda kütlenin korunmasını ifade eder ve üç boyutlu durumda şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}} = 0 \tag{3.1}$$

Burada u, v, w sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız (m/s) bileşenleridir.

Sıkıştırılamaz bir akış için momentum denklemleri, x, y ve z yönlerinde ayrıştırılarak elde edilebilir. Bu denklemler, Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinmektedir ve her eksende ayrı ayrı momentum korunumunu açıklar.

X yönü için:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+f_x \tag{3.2}$$

Y yönü için:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+f_y \tag{3.3}$$

Z yönü için:

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+f_z \tag{3.4}$$

Burada u, v, w sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız (m/s) bileşenleridir. ρ yoğunluğu (kg/m³) ifade eder ve sabit kabul edilir. p basınç (Pa), μ ise dinamik viskoziteyi (Pa·s) ifade eder. f_x, f_y, f_z sırasıyla x, y ve z yönlerindeki kuvvet bileşenlerini Newton (N) cinsinden belirtmektedir.

Sabit özellikli sıkıştırılamaz soğutucu akışkan için enerji denklemleri aşağıda belirtilmiştir.

X yönü için:

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

Y yönü için:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}\right) = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + q_y \tag{3.6}$$

Z yönü için:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}\right) = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + q_z \tag{3.7}$$

İlgili denklemlerde u, v, w sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız (m/s) bileşenlerini, ρ yoğunluğu (kg/m³), c_p ısıl kapasiteyi (J/kg·K), T sıcaklığı (K veya °C), k ısı iletim katsayısını (W/m·K) ifade etmektedir. Ayrıca q_x, q_y, q_z sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki ısı alışverişini (W/m^3) ifade etmektedir.

3.6.2. Pil ısı üretim hesabı

Bataryalarda hesaplanan toplam ısı üretimi, enerji depolama ve salınım süreçlerinin doğal bir sonucu olarak karşımıza çıkmakta ve genellikle tersinmez ısı (Q_{irrev}), tersinir ısı (Q_{rev}) ve ohmik ısı (Q_{ohm}) olarak üç ana kategori ile tanımlanmaktadır (Bernardi vd., 1985).

$$Q_{toplam} = Q_{irrev} + Q_{rev} + Q_{ohm} \tag{3.8}$$

Tersinmez ısı (Q_{irrev}), genel manada yan reaksiyonlar ve polarizasyon gibi geri dönüşü olmayan süreçlerden ortaya çıkan bir ısı türüdür. Tersinmez ısı için, spesifik veya değişken reaksiyonlara ve batarya kimyasına bağlı olduğu için genel bir formül vermek zor olsa dahi, genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{irrev} = I \cdot (V_{ocv} - V_{cell}) \cdot t \tag{3.9}$$

Bu denklemde:

- I: Bataryadan geçen akım (A),
- V_{ocv}: Açık devre voltajı (V),
- V_{cell}: Hücre voltajı (V),
- t: Zaman (s).

İlgili formülde $V_{\text{ocv}} - V_{\text{cell}}$ farkı batarya hücresi içindeki kayıpları ifade etmektedir.

Tersinir ısı (Q_{rev}), batarya hücresinin şarj veya deşarj anında gerçekleştirdiği entropi değişimiyle alakalıdır. Şu ifade ile açıklanır:

$$Q_{\text{rev}} = -nF\Delta ST \tag{3.10}$$

Burada,

- n: Reaksiyona giren elektron sayısı,
- F: Faraday sabiti (96,485 C/mol),
- ΔS: Entropi değişimi (J/(mol·K)),
- T: Mutlak sıcaklık (K).

Ohmik ısı (Q_{ohm}) ise, iç direnç nedeniyle akım akışının meydana getirdiği ısıdır ve şu ifadeyle açıklanır:

$$Q_{\text{ohm}} = I^2 R_{\text{int}} t \tag{3.11}$$

Denklemde:

- R_{int}: Bataryanın iç direnci (Ω),
- I: Bataryadan geçen akım (A),
- t: Zaman (s) olarak ifade edilmektedir.

Pil içinde üretilen ısının hesabı, yukarıda verilen denklemler ile birlikte birçok faktör ile birlikte değişiklik göstermekte ve kompleks bir hal almaktadır. Bataryanın ısı hesabını etkileyen başlıca etkenler:

- **Akım:** Daha yüksek akımlar, ohmik ısınmayı ve potansiyel kayıpları arttırmaktadır.

- **Şarj durumu (SOC):** Bataryanın iç direnci ve potansiyeli şarj durumu ile direkt ilgilidir. Bu durum da üretilen ısı miktarını etkilemektedir. Yine aynı şekilde batarya sağlığı (SOH), bataryanın ne kadarının kullanıldığını veya boşaltıldığını ifade eden deşarj derinliği (DOD) de ısı miktarına direkt etki etmektedir.

- **Şarj/Deşarj hız oranı (C):** Bu oran, bir bataryanın kapasitesini tamamen şarj etmek veya deşarj etmek için gereken akım miktarını belirlemektedir. Bu oranın artması ile pil içinde üretilen ısı miktarı da artmaktadır.

- **Sıcaklık:** Sıcaklık iç dirence ve reaksiyon kinetiğine etki ederek yan reaksiyonlara sebebiyet vermekte ve sıcaklığa bağlı olarak ısı üretiminin zamana bağlı değişimini tahrik etmektedir.

- **Pil tasarımı ve Malzemeler:** Elektrot ve elektrolit türü, pil tasarımı, üretim veya malzeme kalitesi ve pil kimyası da ısı üretimini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Pil üretim hesabının bu denli karmaşık bir temele dayanması ve çalışma koşullarında sonuca doğrudan etki eden birçok faktörün bulunması, çalışma kapsamında daha basit bir yaklaşımın kullanılmasına sebebiyet vermiştir. Bu yüzden bahsedilen kompleks ve doğrusal olmayan girdileri içeren, bir hücre başına ısı üretim hesabı yerine literatürden elde edilen değerler referans alınmıştır. Şekil 3.14'te nümerik analizlerde referans alınacak ısı üretim grafiği bulunmaktadır. İlgili grafik incelendiğinde, bahsedilen analizlerde kullanılmak üzere 3C deşarj durumundaki ısı üretim eğrisi referans alınmıştır. Grafikteki ısı üretim eğrisi deşarj derinliğine (DOD) bağlı olarak değişkenlik

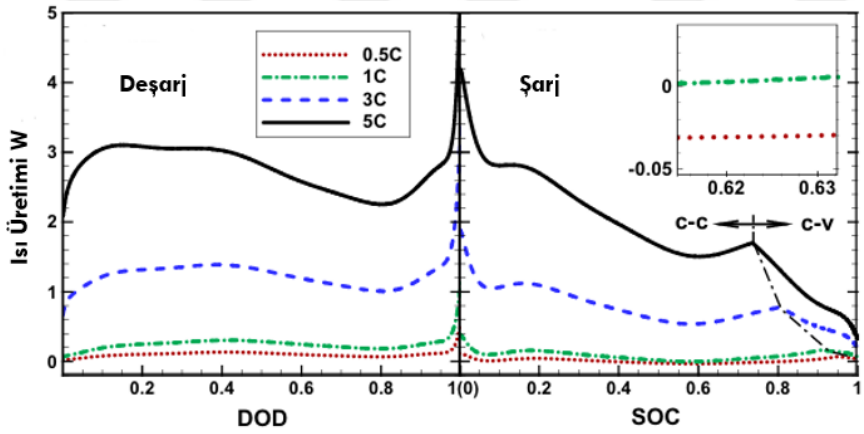
göstermektedir. Analizi daha stabil ve doğrusal hale getirmek için ilgili grafik üzerinden ortalama bir değer olarak 1,1W değeri dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılacak olan batarya hücresinin (18650) hacmi dikkate alındığında (yaklaşık hacim: $1{,}65\text{x}10^{-5}$ m^3) hücre başına düşen ısı üretimi 66 500 W/m^3 olmaktadır.

$$V = \pi r^2 h \tag{3.12}$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{V} \tag{3.13}$$

İlgili denklemlerde:

- V: Silindirin hacmi (m^3) = $1{,}65\text{x}10^{-5}$ m^3
- Q: Grafikten elde edilen ortalama ısı miktarı (W) = 1,1 W (3C hız oranı)
- $\dot{Q}$: Hacimsel ısı üretimi (W/m^3) = 66 500 W/m^3



Şekil 3.14. Bir hücre için şarj /deşarj durumlarında farklı C (şarj/deşarj hızı) oranlarındaki ısı üretimi (Zhao vd., 2018)

3.6.3. Reynolds sayısı

Reynolds Sayısı (Re), bir akışkanın akış karakterini tanımlamak için kullanılan boyutsuz sayıdır. Re işle birlikte ilgili akışın laminer veya türbülanslı alanda olduğu tespit edilebilir. İlgili denklemde ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), u karakteristik hızı (m/s),

L karakteristik uzunluk veya boyutu (örneğin boru çapı, m), μ ise dinamik viskoziteyi (Pa·s) belirtmektedir.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \tag{3.14}$$

Reynolds sayısının anlamı (boru içi akışlar için):

- Re < 2000: Akış genellikle laminerdir, yani akışkan tabakaları birbirine paraleldir.
- 2000 < Re < 4000: Geçiş bölgesi, yani akış hem laminer hem de türbülanslıdır.
- Re > 4000: Akış genellikle türbülanslıdır, yani akışkan düzensiz ve karmaşıktır.

3.6.4. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerine dayanarak, akışkanların etkileşimlerini (ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar, aerodinamik etkiler, vbg.) içeren kompleks problemlerin bilgisayar tabanlı simülasyonlarla çözümleme bilimidir (Ansys, 2024). Akışkanlar ve akışkanlar mekaniği hayatımızın her alanında bulunmakta ve yaşamımızı ciddi oranda etkilemektedir. Havacılık, otomotiv, savunma, makine, uzay, denizcilik gibi çok geniş bir yelpazede birçok endüstride etkin bir şekilde HAD yaklaşımları kullanılmaktadır. HAD sayesinde fiziksel test imkânı sınırlı olan veya test öncesi sınanmak, performansı değerlendirilmek istenen sistemler çözümlenmekte ve elde edilen sonuçlar ile ilgili sistemlerin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede kullanıcı sistemlerin çalışma mekaniğini, performansını veya eksikliğini önceden tespit edebilecek ve çalışmalarını bu doğrultuda ilerletebilecektir.

Analizlerde kullanılan denklemler, büyük ölçüde 1800'lerde geliştirilen Navier-Stokes denklemlerine dayanmaktadır. İlgili denklemler sayesinde akışkandaki hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluğun birbiri ile olan ilişkileri tanımlanmaktadır. Bu denklemler, bir akış problemine yönelik birleşik diferansiyel denklemler grubunu temsil eder ve çeşitli matematiksel tekniklerle teorik olarak çözülebilir. Ancak, pratikte bu denklemleri analitik olarak çözmek neredeyse imkansızdır, Geçmişte mühendisler, bahsedilen denklemleri çözebilecekleri bir denklem bütününe dönüştürmek için, bazı yaklaşımlarda ve

varsayımlarda bulunmuşlardır. Günümüzde, bu denklemler HAD'nin alt dalları olan sonlu fark, sonlu hacim, sonlu eleman ve spektral metotlar gibi çeşitli yaklaşımlar ile bilgisayar tabanlı simülasyonlarla çözülmektedir (Alınca, 2023).

Ticari HAD paketleri, çözüm yeteneklerine pratik erişim için problem parametrelerinin girilmesi ve çıktıların incelenmesi amacıyla gelişmiş kullanıcı arayüzleri içermektedir. Bu nedenle genel olarak HAD yazılımları üç ana unsur içermektedir: ön işlemci (Pre-processor), bir çözücü (solver) ve son işlemci (post-processor).

Ön İşlemci (Pre-processor):

Ön işleme, arayüz aracılığıyla analizle ilgili tüm girdilerin çözücü tarafından kullanılabilecek bir forma dönüştürülmesi süreci olarak özetlenebilir. Bu kısımda, geometri tanımı, ağ oluşturma, fiziksel veya kimyasal girdiler, akışkan özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmakta veya belirlenmektedir.

Çözücü (solver):

Bu kısımda HAD'nin alt dallarından biri olan sonlu hacimler yöntemi devreye girmektedir. Genel manada 3 adımdan oluşmaktadır:

- Akışkanın temel denklemlerinin tüm sonlu hacimler üzerine entegrasyonu,
- Elde edilen integral denklemlerinin bir cebirsel denklemler sistemine dönüştürülmesi,
- Cebirsel denklemlerin yinelemeli (iteratif) bir yöntemle çözülmesi.

Son işlemci (Post-processor):

Bu kısımda analizler sonrası elde edilen sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesi mümkün kılınmıştır. Birçok bilgisayar tabanlı iş istasyonu ve ticari HAD paketleri sayesinde, alan geometrisi, vektör grafikleri, 2D ve 3D yüzey grafikleri, sonuç kontur grafikleri ve parçacık takibi gibi üstün çıktılar elde edilebilmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

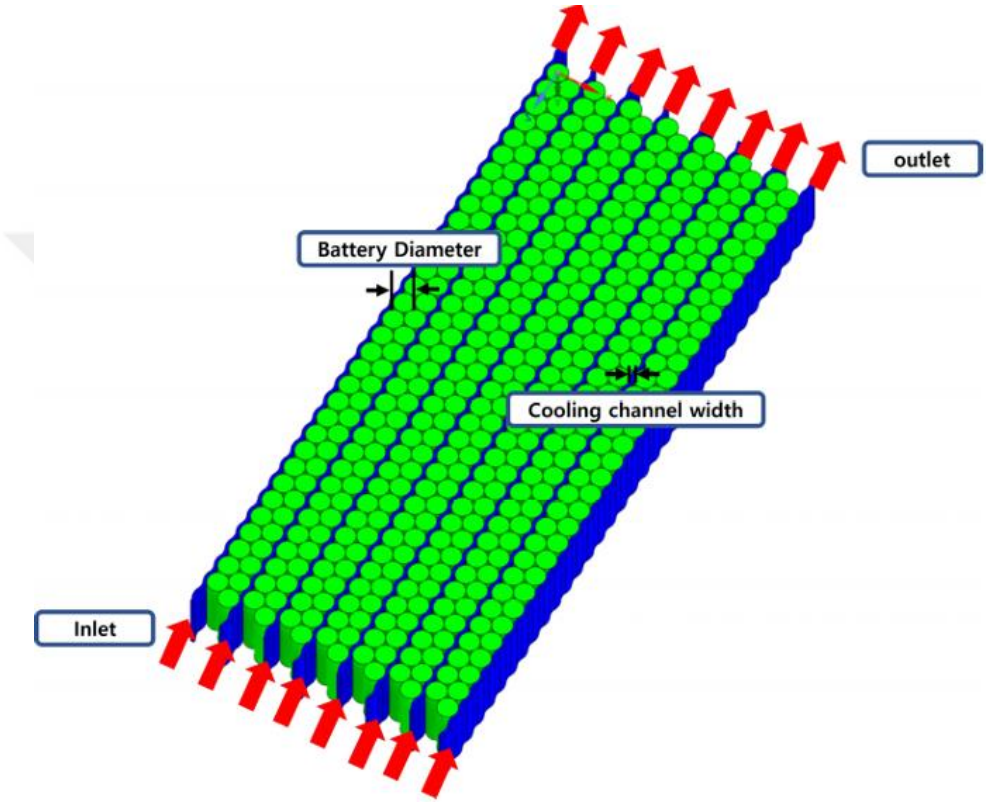
3.7. Literatür Üzerinden Model Validasyonu ve Karşılaştırmalı Analiz

Nümerik tabanlı çalışmalarda, analizlerde kullanılacak olan modelin güvenilirliğini ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürde kabul görmüş çalışmalar üzerinden geçerliliğinin sınanması gerekmektedir. Doğrulama çalışması sayesinde ilgili çalışmanın gerçek dünya uygulamalarında kabul edilirliği arttırılabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile referans alınan yaklaşımların performansını karşılaştırma imkânı ve hangi yöntemlerin hangi senaryolar için daha etkili olduğunu anlama fırsatı ortaya çıkmaktadır. Mevcut literatürle uyumlu olan veya ciddi sapmalar gösteren sonuçlar, modelin bilimsel dayanağını güçlendirmekte ve zayıf yönlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

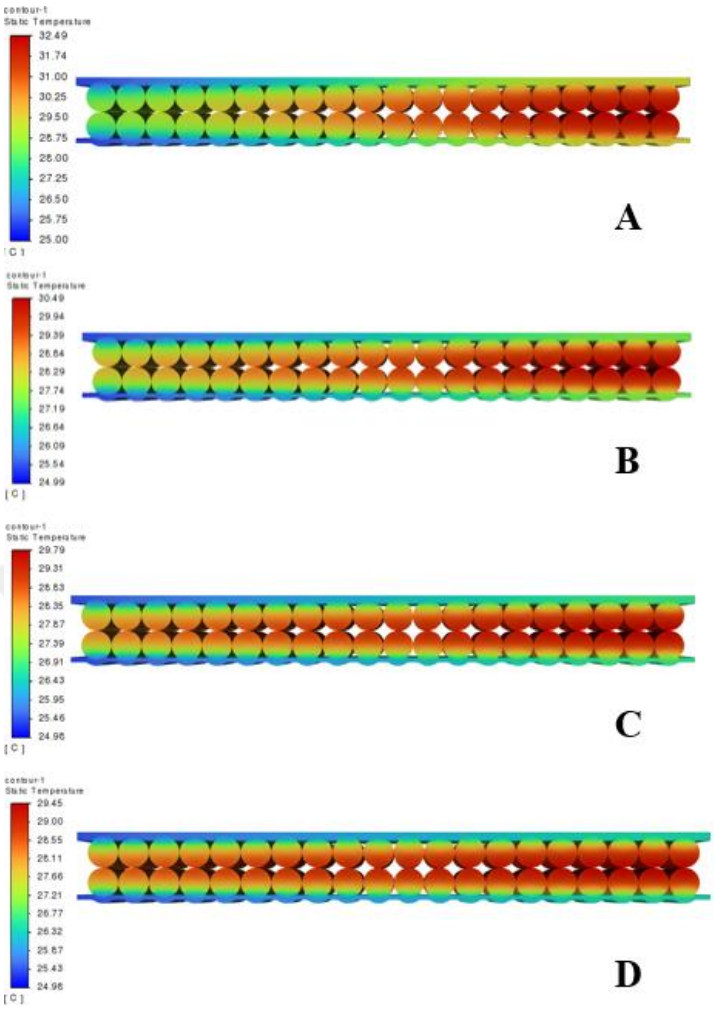
Literatür çalışmaları ile doğrulama kapsamında Jeon vd.'nin (2023) çalışması ve çalışmada kullandıkları parametreler referans alınmıştır. İlgili literatür çalışmasında, çalışma kapsamında kullanılacak olan model ile (baz model) birçok açıdan benzerliğe sahip paralel akışlı soğutma plakasına sahip bir tasarım bulunmaktadır. Referans alınan modelde 32 x 14 sıra (yatay x dikey) 18650 tip hücre bulunmaktadır (Şekil 3.15). Baz modelde ise 20 yatay sıra hücre bulunduğu için, referans modeldeki sonuçlar incelenirken 20.sıradaki pil sıcaklığı dikkate alınmıştır.

Doğrulama çalışmasının en ideal şekilde yapılabilmesi için referans model analizleri için kullanılan tüm girdiler, yaklaşımlar ve sınır şartları bire bir şekilde baz modele de uygulanmıştır. Suyun giriş sıcaklığı 25°C, çıkış basıncı ise atmosferik basınca eşitlenmiştir. Referans model kapsamında her hücre için ısı üretimi 3C deşarj oranı için 74 800 W/m^3 olarak atanmış ve ısının homojen şekilde dağıldığı ve analiz boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Suyun giriş yaptığı ve çıkış yaptığı yüzeyler dışında tüm duvarlar adyabatik olarak tanımlanmıştır. Soğutucu akışkanın sıkıştırılamaz ve kararlı olduğu varsayılmıştır. Katı-akışkan yüzeyleri için kayma sınır koşulu kullanılmamıştır. Kıyaslamalar yapılırken sırayla soğutucu akışkanın; 0,1 m/s, 0,2 m/s, 0,3 m/s, 0,4 m/s olarak atandığı analiz sonuçları incelenmiştir. Son olarak ise analizlerde laminer akış modeli kullanılmıştır.

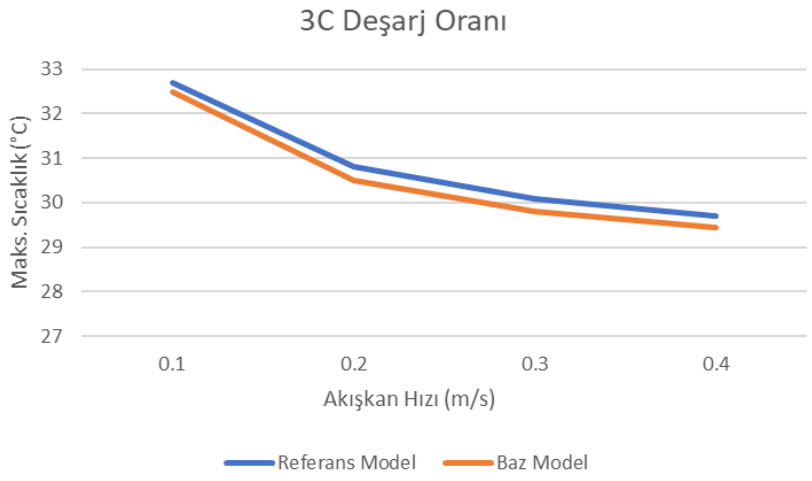
Şekil 3.16'da baz modelde elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 3.17'de ise referans model ve baz modelinin kıyaslamalı grafiği bulunmaktadır. İlgili grafikte her iki modelde de elde edilen maksimum sıcaklık seviyesi (20.hücre için) referans alınmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem sıcaklık seviyesi hem de sıcaklık dağılımının eğilimi ve yönelimi açısından büyük benzerlik ve tutarlılık görülmektedir.



Şekil 3.15. Referans modelin genel görünümü (Jeon vd., 2023)



Şekil 3.16. Baz modelinin akışkan hızına bağlı sonuçları
A) 0,1 m/s **B)** 0,2 m/s **C)** 0,3 m/s **D)** 0,4 m/s



Şekil 3.17. Referans model ve baz modelin karşılaştırılması

3.8. Nihai Analiz İçin Sınır Şartları

Analiz modeli kurulurken, sınır koşulları için bazı varsayımlar yapılmıştır. Çalışmanın gayesi özellikle kanatçık ekleyerek temas yüzeyini arttırmak ve bazı yaklaşımları uygulayarak, tasarımları kendi içinde kıyaslamaktır. Sınır şartları için kullanılan her girdiyi kendi içinde incelemek veya ispatlamak çalışmanın süresini ciddi oranda arttırmakta ve çalışmanın asıl amacından uzaklaşmaya sebebiyet vermektedir. Bu yüzden sınır şartları oluşturulurken genel kabuller yapılmıştır. Öncelikle modeller simetrik bir yapıya sahip olduğu için, analiz sürelerinden tasarruf edebilmek adına, ilgili modellere simetrik sınır şartı uygulanmıştır. Batarya sisteminin bulunduğu ortam sıcaklığı 25°C olarak atanmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı 25°C, çıkış basıncı ise atmosferik basınca eşitlenmiştir. Literatürden elde edilen veriler doğrultusunda her hücre için ısı üretimi oranı 66 500 W/m^3 olarak referans alınmıştır (Bkz. başlık 3.5.2). Akışkanın giriş yaptığı ve çıkış yaptığı yüzeyler dışında tüm duvarlar adyabatik olarak tanımlanmıştır. Soğutucu akışkanın sıkıştırılamaz ve kararlı olduğu varsayılmıştır. Katı-akışkan yüzeyleri için kayma sınır koşulu kullanılmamıştır.

Yukarıda bahsedilen sınır şartları hem soğutucu akışkan tespitinin yapıldığı analizlerde de hem de tüm modeller için yapılan nihai analizlerde kullanılmıştır. Soğutucu akışkan analizlerinde eg-su karışımı için sırayla %40, %50, %60 etilen glikol oranına sahip karışım kullanılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Nihai analizlerde tüm modeller için, soğutucu akışkan hızı V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olmak üzere üçer adet analiz yapılmıştır. En yüksek akışkan hızı olan 0,3 m/s ile denklem (3.14) dikkate alınarak, Reynolds sayısı (Re) hesaplanmıştır. Hesaplanan Reynolds sayısı 2300 değerinin altında olduğu için analizlerde laminer akış modeli kullanılmıştır.

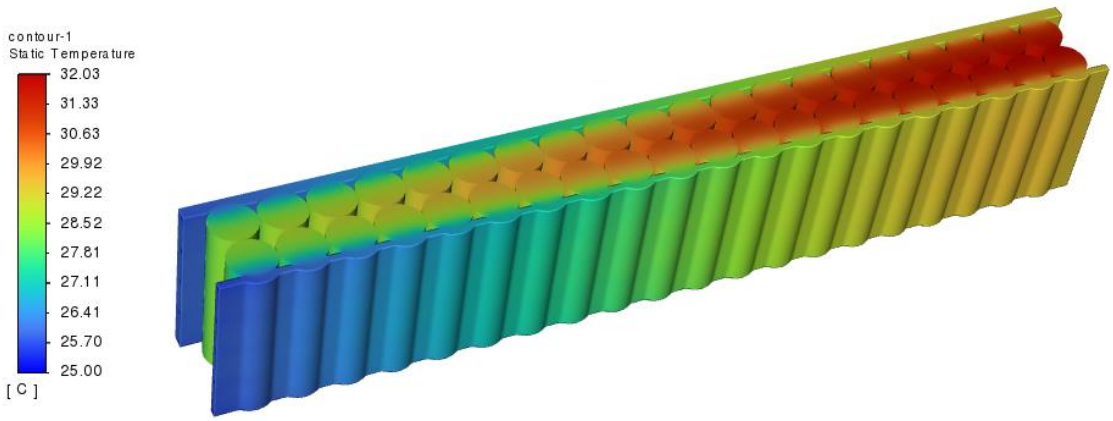
4. BULGULAR

4.1. Genel Giriş

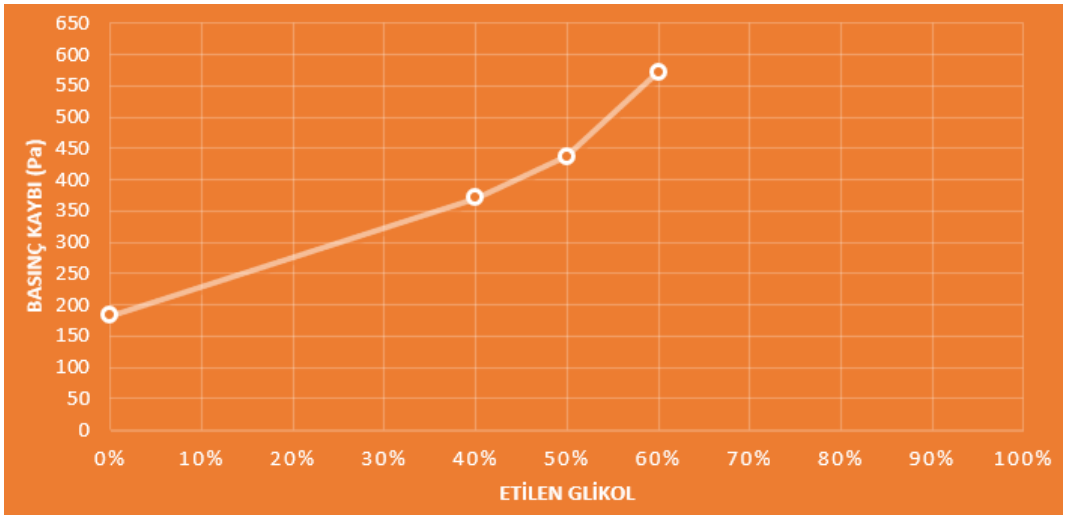
Bu bölümde farklı tasarımlarda ve yaklaşımlardaki dört farklı batarya modülüne, sırayla akışkan hızı V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olacak şekilde ayrı ayrı analiz senaryoları kurgulanmıştır. İlk olarak nihai analizlere geçmeden önce baz model tasarımı üzerinden soğutucu akışkan türünün yani karışım oranının belirlenmesi adına akışkan karışım oranları üzerinden kıyaslamalı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendikten sonra nihai analizlere ilgili soğutucu akışkan ile girdi sağlanmıştır.

4.2. Soğutucu Akışkan Tespit Analiz Sonuçları

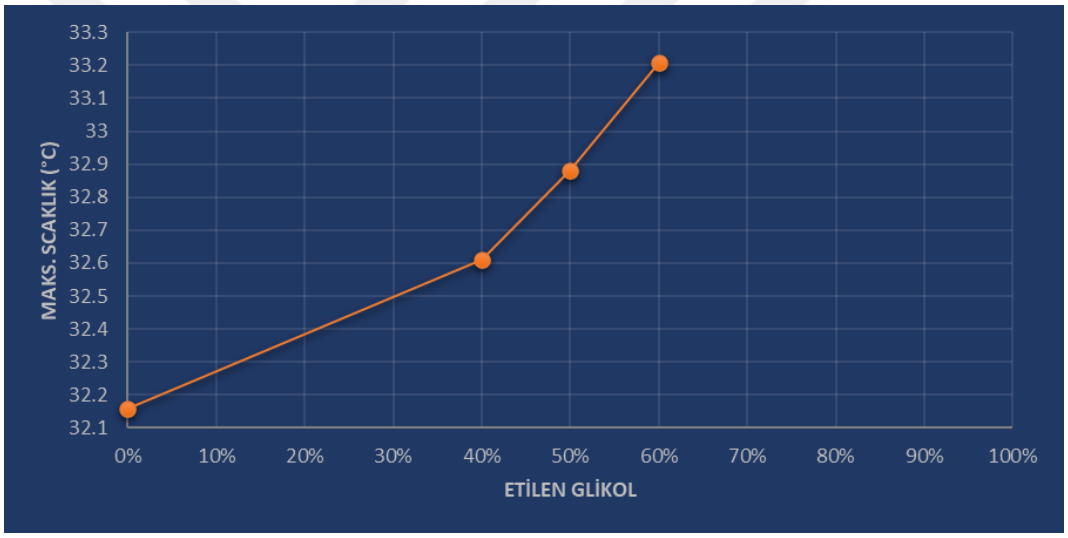
Bu kısımda etilen glikol-su karışımı için sırayla %40, %50, %60 etilen glikol oranına sahip karışımlar analizlerde kullanılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Analizler gerçekleştirilirken sınır şartları (Başlık 3.7) başlığında belirtilen sınır koşulları uygulanmıştır. Akışkan hızı için sadece 0,1 m/s değeri referans alınarak kıyaslamalar yapılmıştır. %40 etilen glikol oranına sahip karışım için maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı Şekil 4.1'de belirtilmiştir. Ayrıca değişken oranlara sahip etilen glikol-su karışımlarının maksimum sıcaklık ve basınç kaybı değerleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de grafikler ile vurgulanmıştır.



Şekil 4.1. %40 Eg-su karışımına sahip soğutucu akışkanlı modelin sıcaklık dağılımı



Şekil 4.2. Eg-su oranına bağlı olarak baz model üzerindeki basınç değişim grafiği

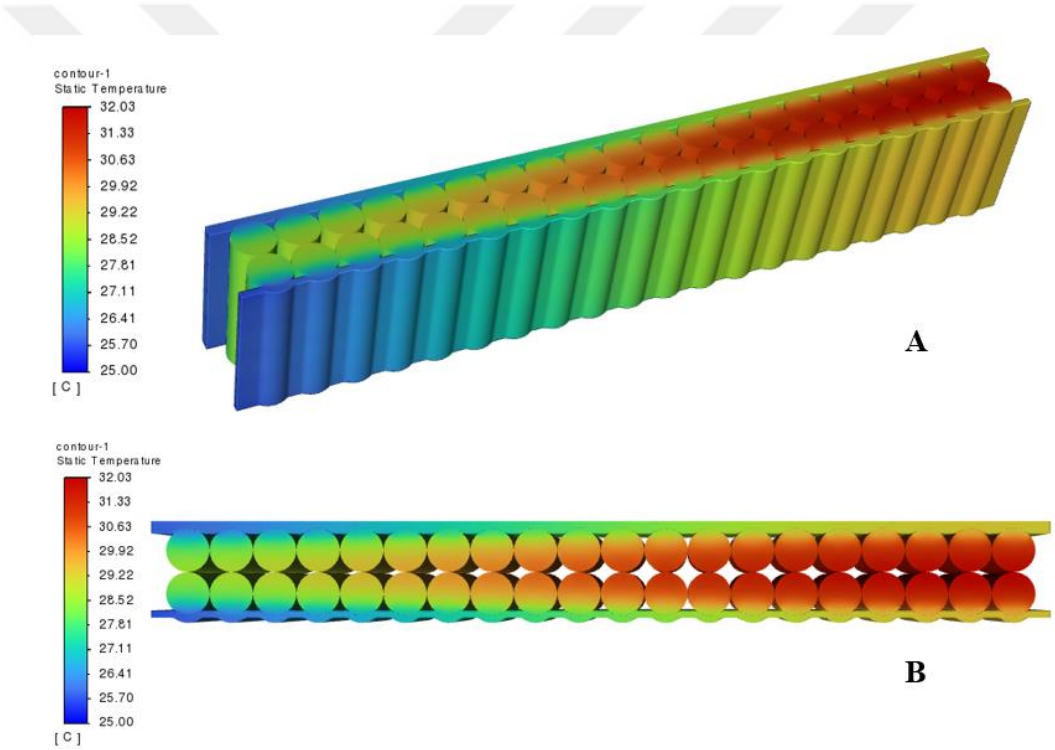


Şekil 4.3. Eg-su oranına bağlı baz model üzerindeki maks. sıcaklık değişim grafiği

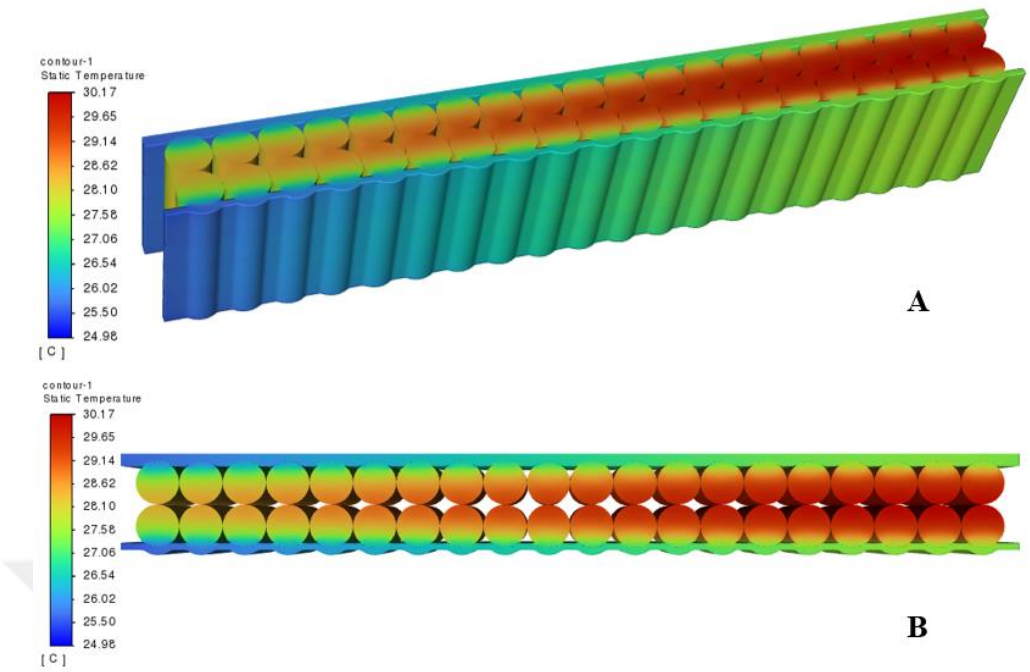
İlgili analiz sonuçlarında sadece kıyaslamak adına saf su kullanıldığında oluşan sonuçlarda bulunmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde etilen glikol oranı arttıkça modelde oluşan maksimum sıcaklık ve basınç kaybı değeri artmaktadır. Eg-su karışımının donma ve kaynama noktasında sağlayacağı avantajlar göz önünde bulundurulduğunda %40 etilen glikol oranına sahip olan soğutucu akışkan tercih edilmiş ve nihai analizlere girdi olarak sağlanmıştır.

4.3. Baz Model İçin Analiz Sonuçları

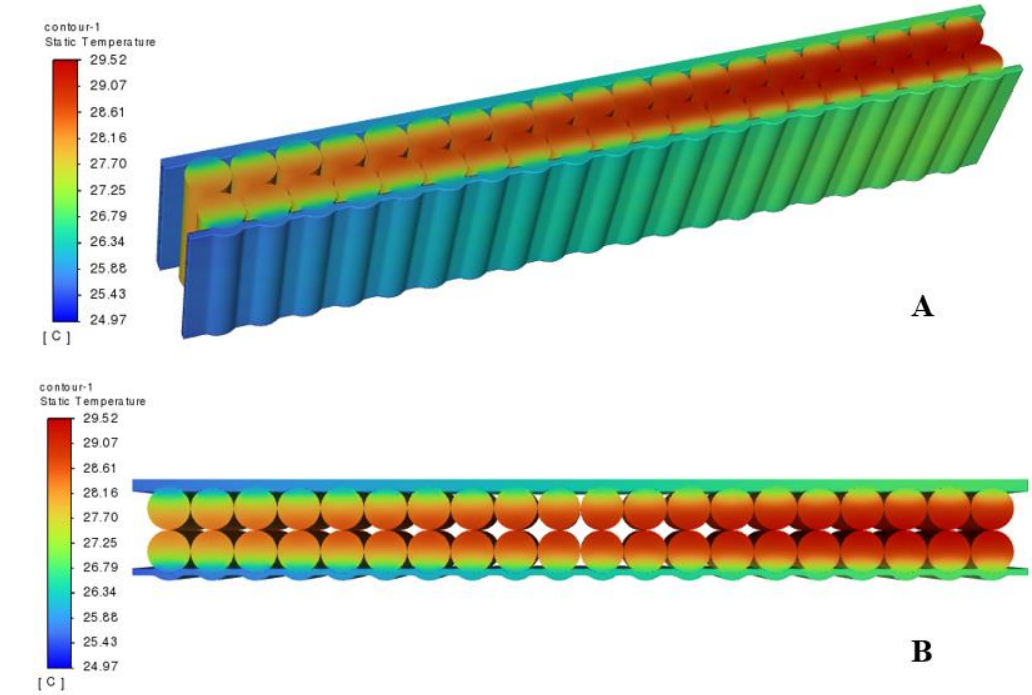
İlgili bölümde soğutucu akışkan hızının değişmesiyle birlikte baz model üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı sonuçları özetlenmiştir. Şekil 4.4 – 4.6 sırayla akışkan hızının V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olduğu durumlarda elde edilen sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık gösterilmektedir. Şekil 4.7'de ise akışkan hızına bağlı olarak baz modelde oluşan basınç kaybı grafik haline getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde soğutucu akışkan hızı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü, basınç kaybının ise arttığı görülmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.1'de tablo haline getirilmiştir.



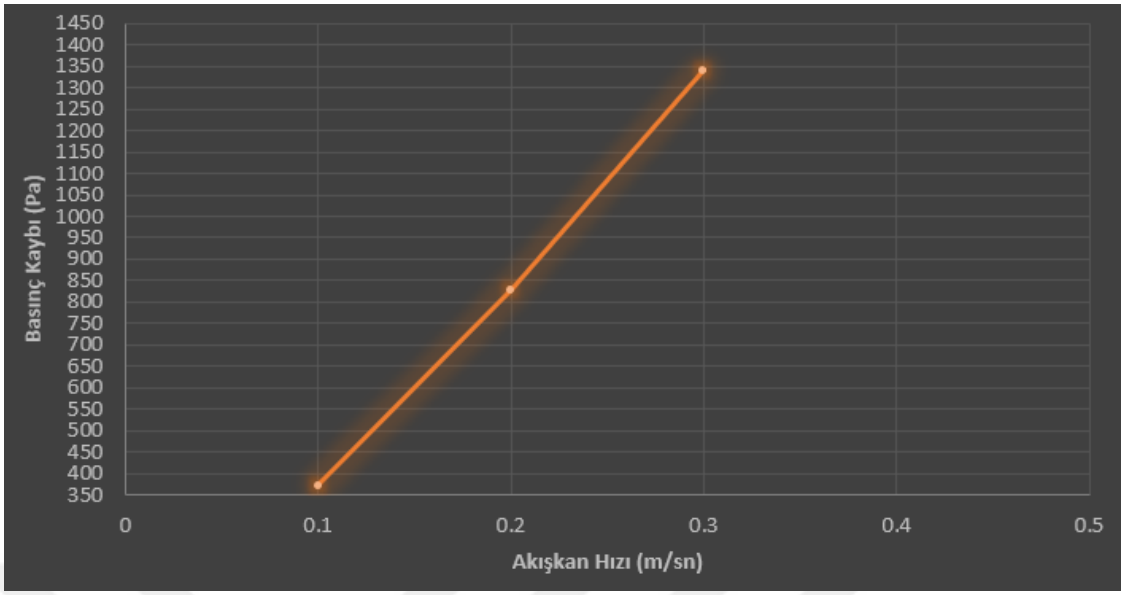
Şekil 4.4. 0,1 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.5. 0,2 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.6. 0,3 m/s akışkan hızı için baz modelde oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



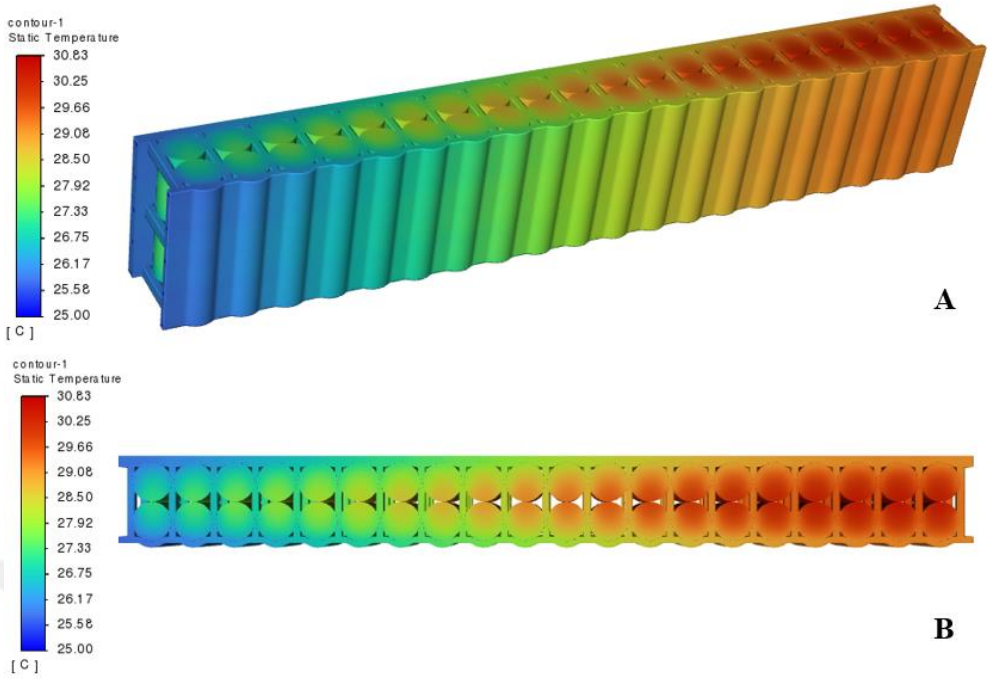
Şekil 4.7. Değişken akışkan hızı için baz modeldeki basınç kaybı değişim grafiği

Çizelge 4.1. Akışkan hızına bağlı olarak baz model üzerinde elde edilen sonuçlar

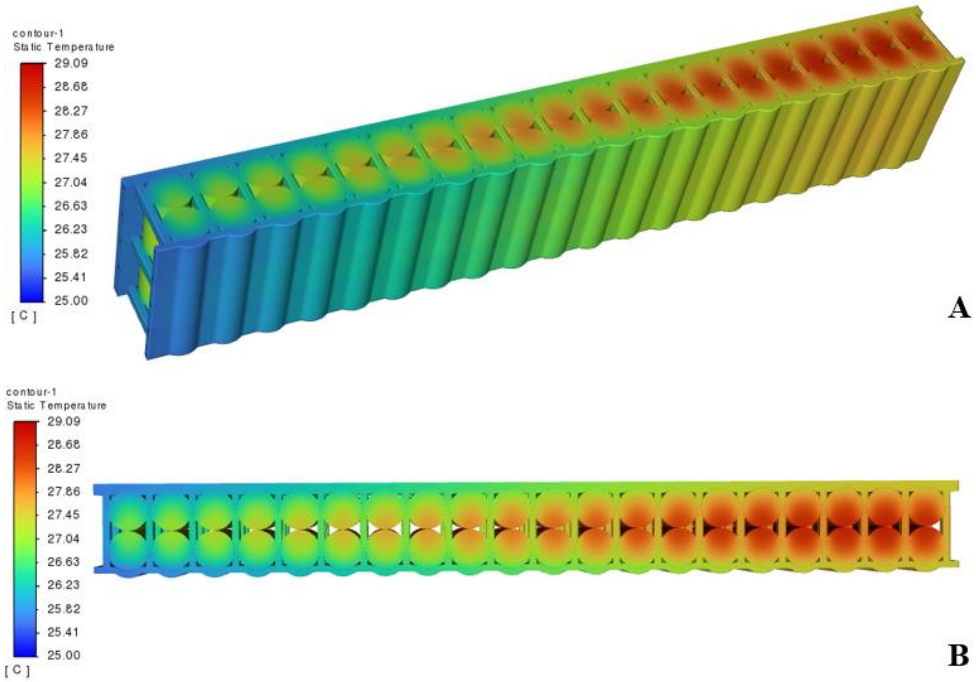
Akış Hızı (m/s)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Ortalama Basınç Kaybı (Pa)
0,1	32,03	7,03	371
0,2	30,17	5,17	829
0,3	29,52	4.52	1340

4.4. Tasarım-1 Modeli İçin Analiz Sonuçları

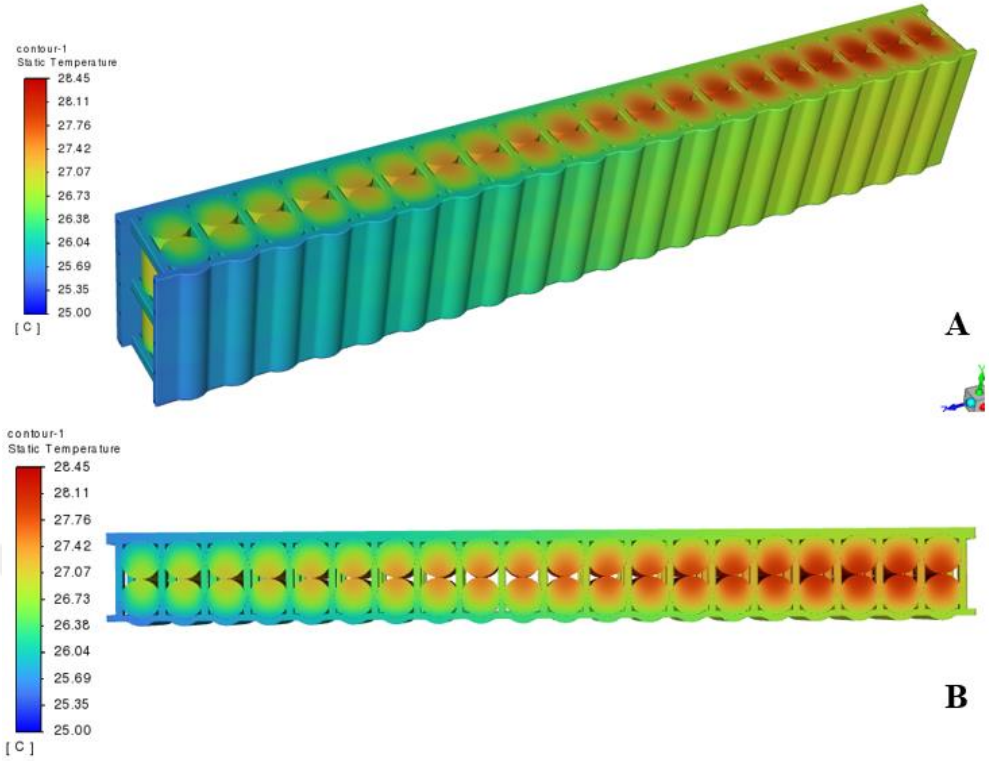
İlgili bölümde soğutucu akışkan hızının değişmesiyle birlikte tasarım-1 modeli üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı sonuçları özetlenmiştir. Şekil 4.8 – 4.10'de sırayla akışkan hızının V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olduğu durumlarda elde edilen sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık gösterilmektedir. Şekil 4.11'de ise akışkan hızına bağlı olarak tasarım-1 modelinde oluşan basınç kaybı grafik haline getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde soğutucu akışkan hızı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü, basınç kaybının ise arttığı görülmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.2'de tablo haline getirilmiştir.



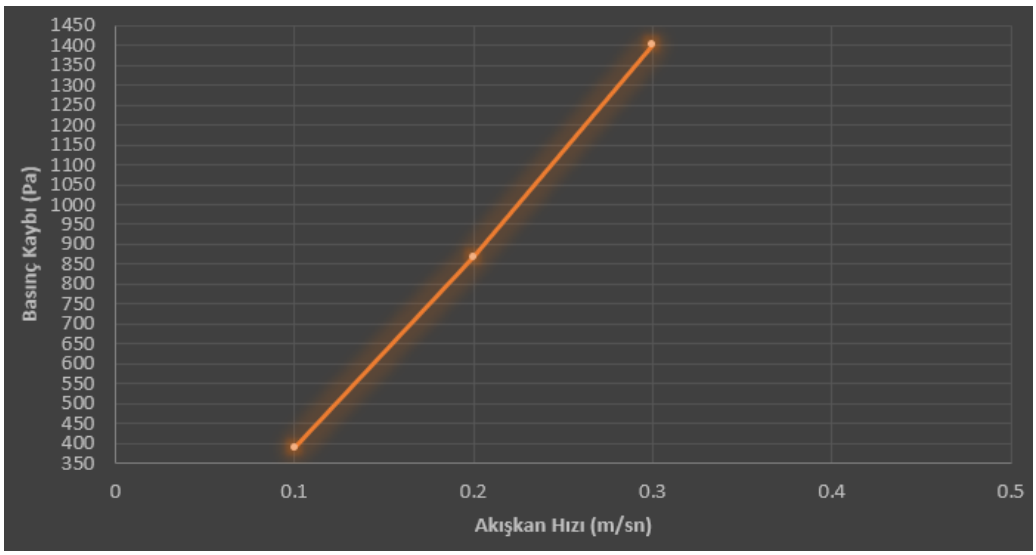
Şekil 4.8. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.9. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.10. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-1'de oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



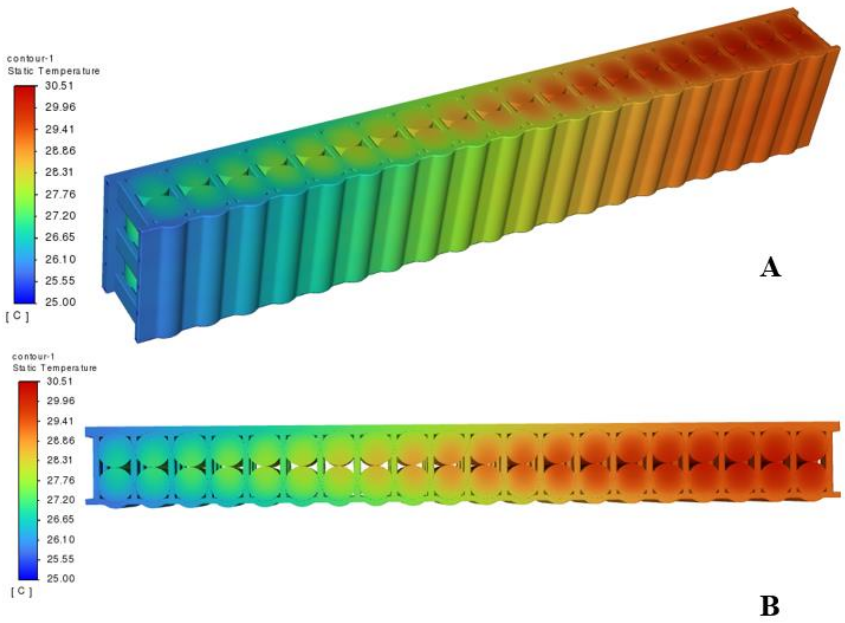
Şekil 4.11. Akışkan hızına bağlı tasarım-1 modelinde basınç kaybı değişim grafiği

Çizelge 4.2. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-1 üzerinde elde edilen sonuçlar

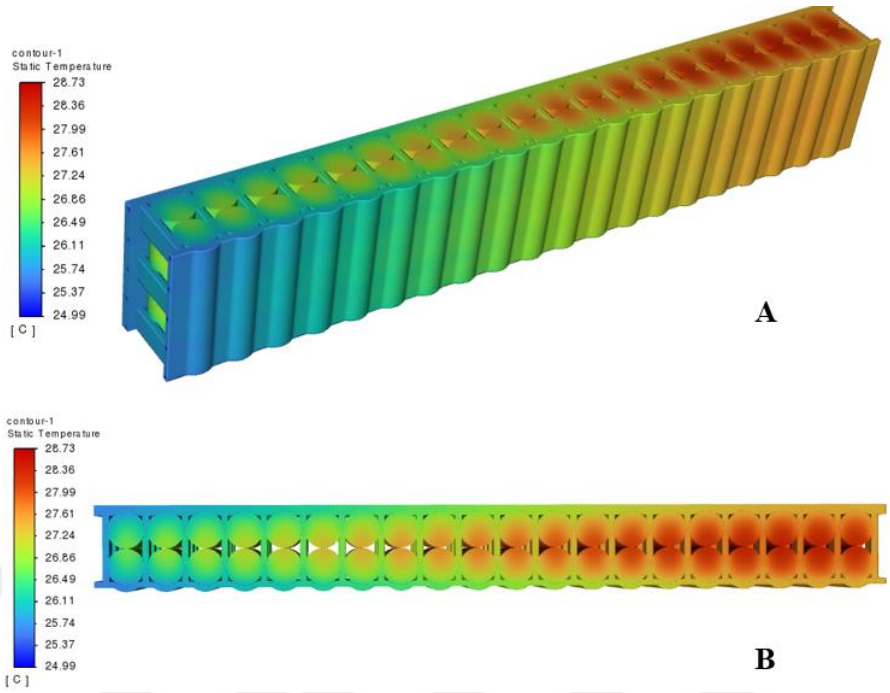
Akış Hızı (m/s)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Ortalama Basınç Kaybı (Pa)
0,1	30,83	5,83	389
0,2	29,09	4,09	869
0,3	28,45	3,45	1402

4.5. Tasarım-2 Modeli İçin Analiz Sonuçları

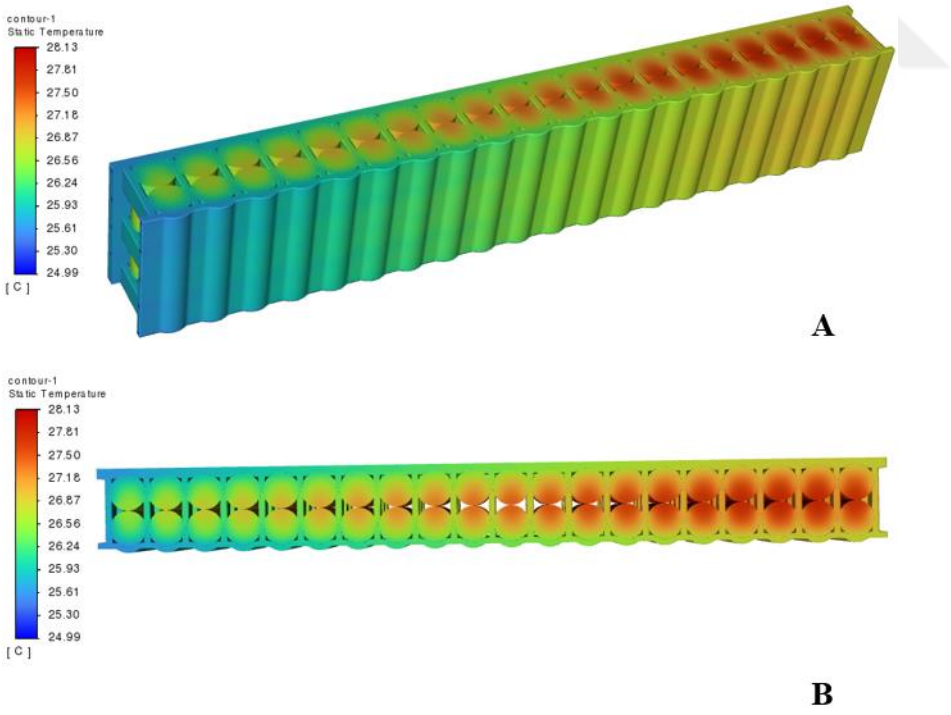
İlgili bölümde soğutucu akışkan hızının değişmesiyle birlikte tasarım-2 modeli üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı sonuçları özetlenmiştir. Şekil 4.12 – 4.14'de sırayla akışkan hızının V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olduğu durumlarda elde edilen sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık gösterilmektedir. Şekil 4.15'de ise akışkan hızına bağlı olarak tasarım-2 modelinde oluşan basınç kaybı grafik haline getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde soğutucu akışkan hızı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü, basınç kaybının ise arttığı görülmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.3'de tablo haline getirilmiştir.



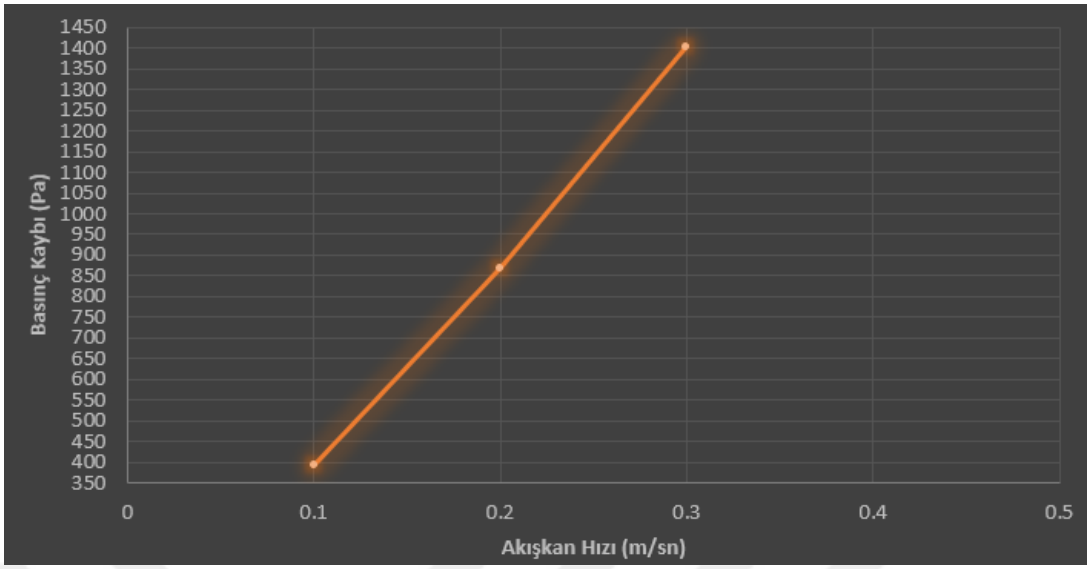
Şekil 4.12. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.13. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı **A)** Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.14. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-2'de oluşan sıcaklık dağılımı **A)** Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



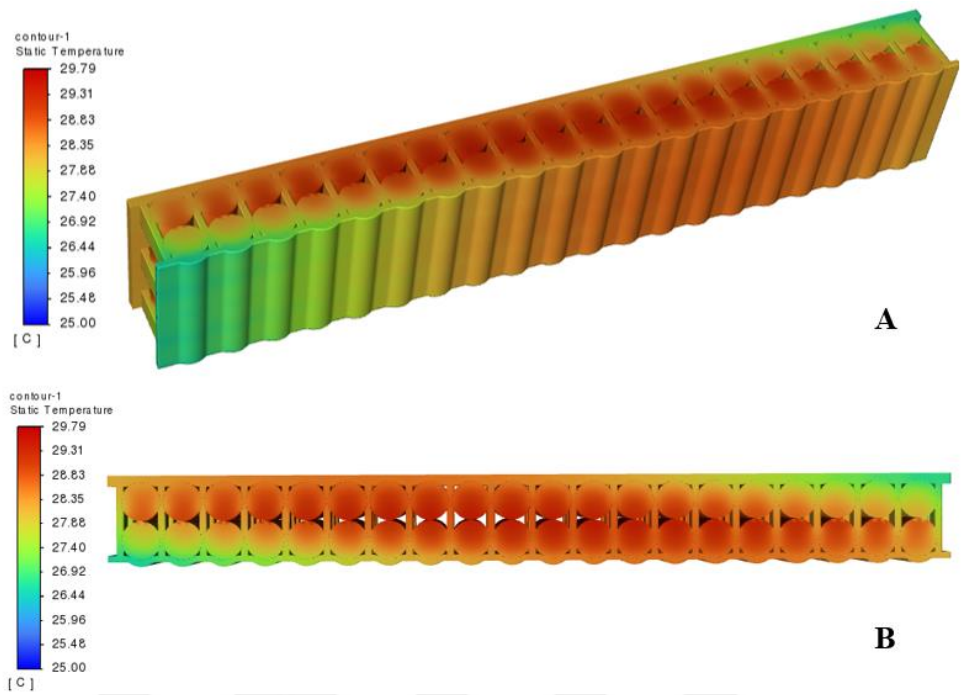
Şekil 4.15. Akışkan hızına bağlı tasarım-2 modelinde basınç kaybı değişim grafiği

Çizelge 4.3. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-2 üzerinde elde edilen sonuçlar

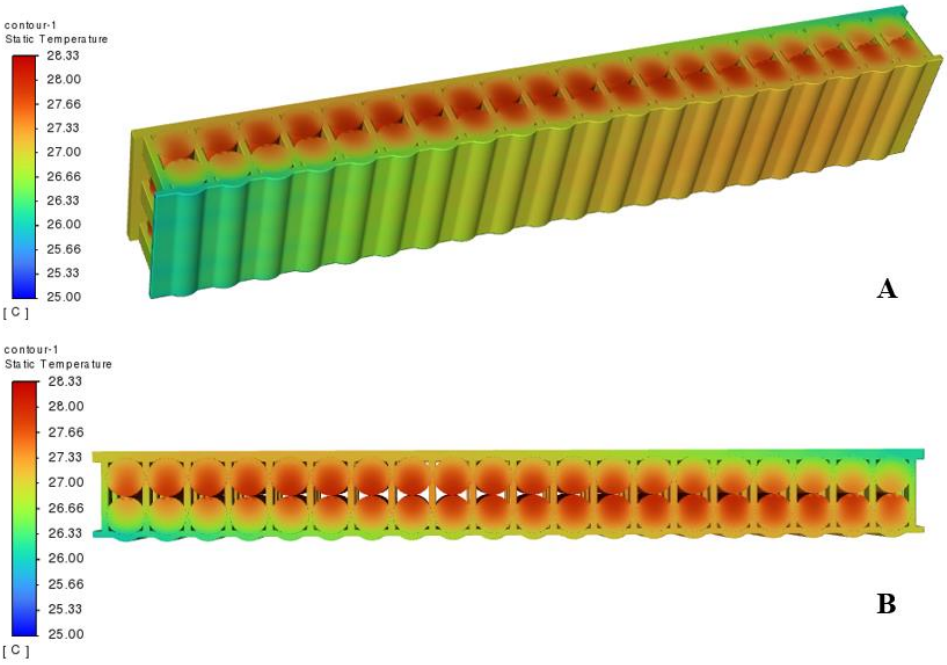
Akış Hızı (m/s)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Ortalama Basınç Kaybı (Pa)
0,1	30,51	5,51	391
0,2	28,73	3,73	870
0,3	28,13	3,13	1403

4.5. Tasarım-3 Modeli İçin Analiz Sonuçları

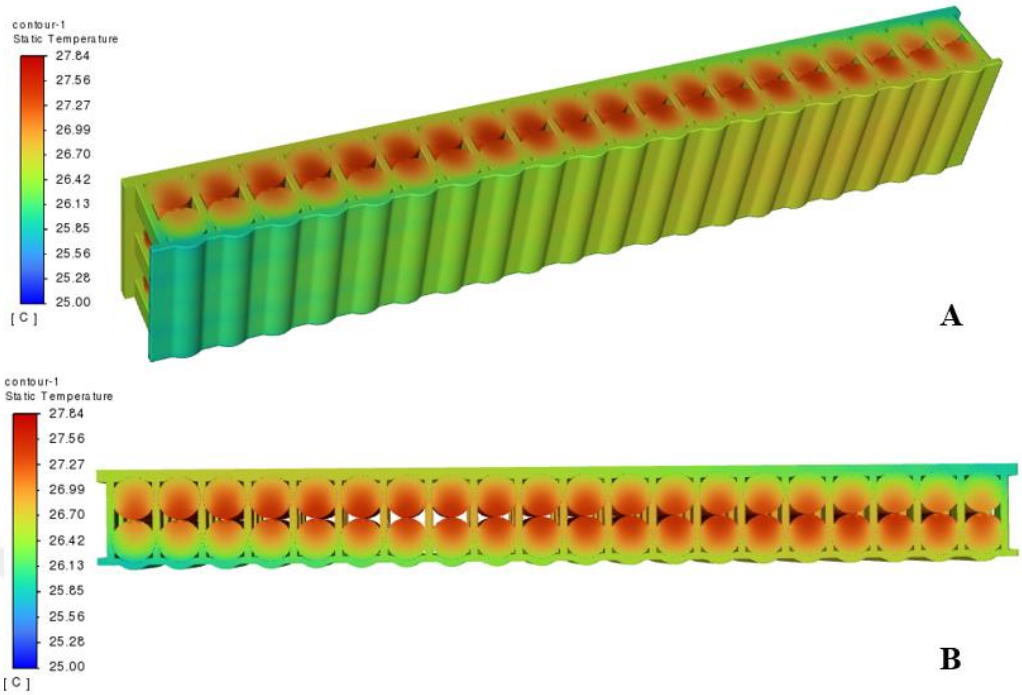
İlgili bölümde soğutucu akışkan hızının değişmesiyle birlikte tasarım-3 modeli üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı sonuçları özetlenmiştir. Şekil 4.16 – 4.18'de sırayla akışkan hızının V = 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olduğu durumlarda elde edilen sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık gösterilmektedir. Şekil 4.19'de ise akışkan hızına bağlı olarak tasarım-3 modelinde oluşan basınç kaybı grafik haline getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde soğutucu akışkan hızı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü, basınç kaybının ise arttığı görülmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.4'de tablo haline getirilmiştir.



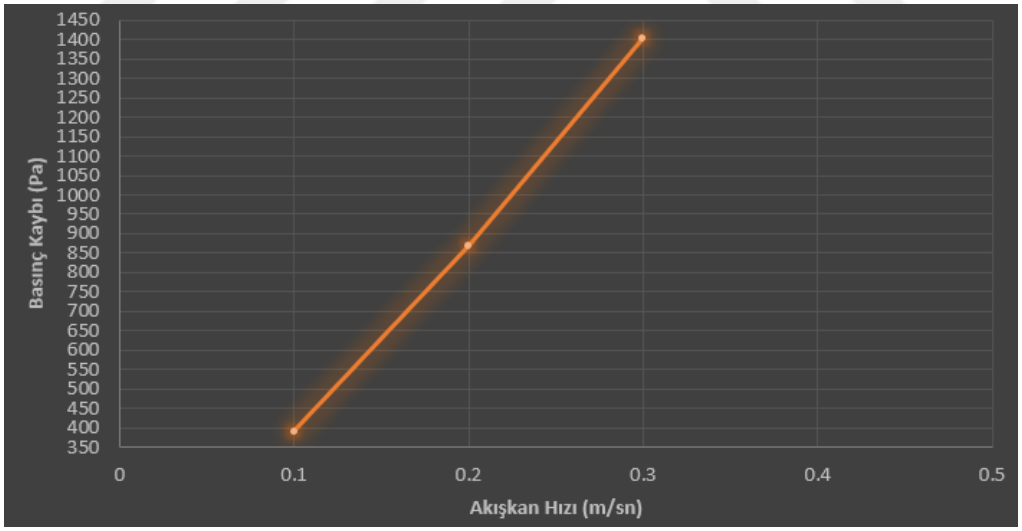
Şekil 4.16. 0,1 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı **A)** Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.17. 0,2 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı **A)** Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.18. 0,3 m/s akışkan hızı için tasarım-3'de oluşan sıcaklık dağılımı
A) Genel görünüm **B)** Üstten görünüm



Şekil 4.19. Akışkan hızına bağlı tasarım-3 modelinde basınç kaybı değişim grafiği

Çizelge 4.4. Akışkan hızına bağlı olarak tasarım-3 üzerinde elde edilen sonuçlar

Akış Hızı (m/s)	**Maksimum Sıcaklık (°C)**	**Sıcaklık Farkı (ΔT)**	**Ortalama Basınç Kaybı (Pa)**
0,1	29,79	4,79	390
0,2	28,33	3,33	869
0,3	27,84	2,84	1403

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada ilk etapta baz model üzerinden, akışkanın 0,1 m/s hıza sahip olması durumunda, değişken oranlara sahip etilen glikol-su karışımları referans alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İncelenen sonuçlar doğrultusunda, %40 etilen glikol oranına sahip soğutucu akışkan ile nihai analizlere giriş yapılmıştır.

Daha sonra dört farklı tasarım üzerinden, yani baz model, tasarım-1, tasarım-2 ve tasarım-3 ile soğutucu akışkan hızının sırasıyla 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,3 m/s olması durumunda elde edilecek sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Her bir model için üç adet olmak üzere, toplamda on iki adet analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerdeki asıl gaye, batarya modülündeki ısıl performansı arttırmak, maksimum sıcaklığı düşürerek modül içindeki sıcaklık farkını optimum seviyeye çekmektir. Böylece batarya modülü içinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilecektir. Tasarım-1 ve tasarım-2 modellerinde kanatçıklar vasıtasıyla batarya hücrelerine temas sağlanmış ve ısı iletimi ile yüksek ısının emilmesi amaçlanmıştır. Tasarım-2, tasarım-1'de oluşturulan kanatçık yapılarının genişletilmiş halini kapsamaktadır.

Analizler sonucunda, baz model referans alınarak yapılan iyileştirmeler ve yeni tasarımların batarya soğutma sistemine katkısı incelenmiştir. İncelemeler doğrultusunda, tasarım-3 modeli, yani hem genişletilmiş kanatçıkların hem de zıt yönlü akışın olduğu modelde, ısıl iyileşme en yüksek seviyede görülmekte ve en düşük maksimum sıcaklık değeri elde edilmektedir. Fakat analiz sonuçları ısıl homojenlik ve süreklilik açısından incelendiğinde, tasarım-3 istenilen performansı verememektedir (Bkz. Şekil 4.16 – 4.18). Batarya hücrelerinin kendi içindeki ısı dağılımında homojenlik görülmemekte, deyim yerindeyse hücrenin bir yüzeyi yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmışken diğer yanal yüzeyde tam tersi bir durum söz konusu olmaktadır. Bu durum batarya ısıl performansı için arzu edilen bir sonuç değildir. Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, tasarım-2 modelinin optimum sonuçları verdiği ve ısıl performansının en iyi durumda olduğu tespit edilmiştir.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur ise baz modele eklenen kanatçıklar ile elde edilen yeni tasarımların ağırlıklarında ve hacimlerinde görülecek olan artıştır. Bu durum hem maliyet hem tasarımsal yük hem de hacimsel artıştan dolayı montaj zorluğu yaratabilmektedir. Bu yüzden, tüm sonuçlar özetlenirken, yeni tasarımlar ile birlikte baz modeldeki ağırlık ve hacim artışı da göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 5.1 – 5.3'de özetlenmiştir. Çizelge 5.1'de, baz model referans alındığında sıcaklık farkında görülen yüzdelik iyileşmeler yeşil renk ile, ağırlık ve hacimde görülen yüzdelik artışlar ise kırmızı renk ile belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Akışkan hızı V = 0,1 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti

Akış Hızı (m/s)	**Modeller**	**Maksimum Sıcaklık (C°)**	**Sıcaklık Farkı (ΔT)**	**Toplam Ağırlık (kg)**	**Toplam Hacim (cm^3)**
0,1	Baz Model	32,03	7,03	1,78	830
	Tasarım-1	30,83	5,83 (%17)	1,87 (%5)	866 (%4)
	Tasarım-2	30,51	5,51 (%22)	1,96 (%10)	897 (%8)
	Tasarım-3	29,79	4,79 (%32)	1,96 (%10	897 (%8)

Çizelge 5.2. Akışkan hızı V = 0,2 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti

Akış Hızı (m/s)	**Modeller**	**Maksimum Sıcaklık (C°)**	**Sıcaklık Farkı (ΔT)**	**Toplam Ağırlık (kg)**	**Toplam Hacim (m^3)**
0,2	Baz Model	30,17	5,17	1,78	830
	Tasarım-1	29,09	4,09	1,87	866
	Tasarım-2	28,73	3,73	1,96	897
	Tasarım-3	28,33	3,33	1,96	897

Çizelge 5.3. Akışkan hızı V = 0,3 iken tüm modeller için analiz sonuçlarının özeti

Akış Hızı (m/s)	**Modeller**	**Maksimum Sıcaklık (C°)**	**Sıcaklık Farkı (ΔT)**	**Toplam Ağırlık (kg)**	**Toplam Hacim (m^3)**
0,3	Baz Model	29,52	4,52	1,78	830
	Tasarım-1	28,45	3,45	1,87	866
	Tasarım-2	28,13	3,13	1,96	897
	Tasarım-3	27,84	2,74	1,96	897

KAYNAKLAR

Ansys. (2024, July 20). *What is CFD ?* https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics

Ansys, I. (2013). ANSYS meshing user's guide. Vol, 15317, 724-746.

Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources* (C. 400, ss. 621-640). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020

Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A General Energy Balance For Battery Systems. *J. Electrochem.* Soc. 12,5-12

Borah, R., Hughson, F. R., Johnston, J., & Nann, T. (2020). On battery materials and methods. *Materials Today Advances* (C.6). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.100046

Battery University. (2024, June 15). *Summary Table of Lithium-based Batteries.* https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries.

Chen, R. (2022). *Battery Pack Design of Cylindrical Lithium-Ion Cells and Modelling of Prismatic Lithium-Ion Battery Based on Characterization Tests* (Master's thesis, Mcmaster University). McMaster University, Hamilton, Canada. Retrieved from [https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/27797/2/Chen_Ruiwen_202208_MASc.pdf]

Chidambaranathan, B., Vijayaram, M., Suriya, V., Sai Ganesh, R., & Soundarraj, S. (2020). A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system. *Materials Today*: Proceedings, 33, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.317

Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering* (C. 142, ss. 10-29). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043

Department of Energy's Office of Science. (2024, June 14). *How Lithium-ion Battery Works*. https://www.energy.gov/science/doe-explainsbatteries

Dinçer, I., Hamut, H. S., Javani, N. (2017). *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 457 pp.

Dursun, H. (2024). *Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Batarya Modülünün Isıl Performansının Sayısal Ve Deneysel Araştırılması*. (Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi). Uludağ Üniversitesi Açık Erişim Sistemi.

Eğin, G. (2019). *Elektrikli Araçların Batarya Sistemlerinde Isı Yönetimi*. (Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi). Uludağ Üniversitesi Açık Erişim Sistemi

Go Evin. (2024, June 17). *Electrıc Vehıcles 101*. https://goevin.com/ev101/

Jeon, H., Hong, S., Yun, J., & Han, J. (2023). Cooling Strategy Optimization of Cylindrical Lithium-Ion Battery Pack via Multi-Counter Cooling Channels. *Energies*, *16*(23). https://doi.org/10.3390/en16237860

Ji, Y., Zhang, Y., & Wang, C.-Y. (2013). Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(4), A636-A649. https://doi.org/10.1149/2.047304jes

Kaba, M. Y., Kalkan, O., & Celen, A. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar Ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 1119-1136. https://doi.org/10.36306/konjes.945819

Korkut, O., Fen, A. Ü., Enstitüsü, B., Torun, E., & Buyruk, E. (2024). Lityum İyon Pillerde Farklı Deşarj Hızlarında Oluşan Sıcaklık Profillerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması. *Journal of The Institute of Science and Technology* (C. 7, Sayı 2). https://orcid.org/0000-0003-4823-7843

Lai, Y., Wu, W., Chen, K., Wang, S., & Xin, C. (2019). A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *144*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118581

Lan, C., Xu, J., Qiao, Y., & Ma, Y. (2016). Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. *Applied Thermal Engineering*, *101*, 284-292. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.070

Lectron. (2024, July 18). *EV Battery Cooling. https://ev-lectron.com/blogs/blog/ev-battery-cooling-how-does-it-work*

Li, J., & Zhu, Z. (2014). *Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*. (Master's Thesis, Chalmers University of Technology). Chalmers University, Göteborg, Sweeden. Retrieved from [https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/200046/200046.pdf]

Ling, L., Li, L., Xie, Y., Wang, T., Zheng, K., Shan, S., Zhang, L., Bei, S., & Xu, Q. (2023). Optimal Design of Minichannel Cold Plate for the Thermal Management of Cylindrical Battery Modules. *Energy Technology*, *11*(4). https://doi.org/10.1002/ente.202201484

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* (C. 150, ss. 304-330). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016

Liu, J., Chen, H., Huang, S., Jiao, Y., & Chen, M. (2023). Recent Progress and Prospects in Liquid Cooling Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries. *Batteries* (C. 9, Sayı 8). *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI). https://doi.org/10.3390/batteries9080400

Lu, Z., Yu, X. L., Wei, L. C., Cao, F., Zhang, L. Y., Meng, X. Z., & Jin, L. W. (2019). A comprehensive experimental study on temperature-dependent performance of lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 158. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113800

Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International* (C. 28, Sayı 6, ss. 653-666). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002

Matthe, R., Turner, L., & Mettlach, H. (2011). VOLTEC Battery System for Electric Vehicle with Extended Range. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 1944-1962. https://doi.org/10.4271/2011-01-1373

MathWorks. (2024, June 14). *Build Model of Battery Pack with Cell Aging*. https://kr.mathworks.com/help/simscape-battery/ug/build-battery-pack-cell-aging.html

Nihan ALINCA, Z. (2023). *Optimization And Comparison Of The Liquid Cooling Plate Used In The Electric Vehicle Battery With Different Coolants As Water And Ethylene Glycol-Water Solutions*. (Master's Thesis, Uludağ University). Uludağ University Open Access System.

OneCharge. (2024, July 20). *Types of Lithium Batteries: Lithium Cell Format*. https://www.onecharge.biz/lithium-cell-format/

Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering, 123*, 1514-1522. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059

Rezvanizaniani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources* (C. 256, ss. 110-124). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085

S. Al-Maamary, H. M., A. Kazem, H., & T. Chaichan, M. (2017). Renewable energy and GCC States energy challenges in the 21st century: A review. *International Journal of Computation and Applied Sciences*, *2*(1), 11-18. https://doi.org/10.24842/1611/0018

Saft. (2024, July 21). *The impact of the temperature on your loT application's power consumption*.https://saft.com/energizing-iot/impact-temperature-your-iot application%E2%80%99s-power-consumption

Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities* (C. 4, Sayı 1, ss. 372-404). MDPI. https://doi.org/10.3390/smartcities4010022

Tang, Z., Min, X., Song, A., & Cheng, J. (2019). Thermal Management of a Cylindrical Lithium-Ion Battery Module Using a Multichannel Wavy Tube. *Journal of Energy Engineering*, *145*(1). https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000592

Trumony. (2024, july 15). *Microchannel Serpentine Cooling Tubes For Automobile Battery*. https://www.aluminiumfoilroll.com/sale-15431824-3003-grade-microchannel-serpentine-cooling-tubes-for-automobile-battery.html

TheEngineeringToolBox. (2024, June 17). *Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid Properties. https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html*

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition. www.pearsoned.co.uk/versteeg

Wang, H., Tao, T., Xu, J., Mei, X., Liu, X., & Gou, P. (2020). Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, *178*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115591

Wang, Y., Zhang, G., & Yang, X. (2019). Optimization of liquid cooling technology for cylindrical power battery module. *Applied Thermal Engineering*, *162*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114200

Wang, Z., Feng, G., Zhen, D., Gu, F., & Ball, A. (2021). A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Reports* (C7, ss.5141-5161). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.113

Warner, J. (2014). Lithium-Ion Battery Packs for EVs. Lithium-Ion Batteries: *Advances and Applications* (ss. 127-150). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00007-8

Xin, S., Wang, C., & Xi, H. (2023). Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, *224*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120100

Xu, Q., Xie, Y., Huang, Y., Li, X., Huang, H., Bei, S., Wang, H., Zheng, K., Wang, X., & Li, L. (2023). Enhancement of thermal management for cylindrical battery module based on a novel wrench-shaped design for the cold plate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *59*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103421

Yue, Q. L., He, C. X., Wu, M. C., & Zhao, T. S. (2021). Advances in thermal management systems for next-generation power batteries. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (C. 181). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121853

You, N., Ham, J., Shin, D., & Cho, H. (2023). Performance Analysis of the Liquid Cooling System for Lithium-Ion Batteries According to Cooling Plate Parameters. *Batteries*, 9(11), 538.

Zhao, C., Cao, W., Dong, T., & Jiang, F. (2018a). Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 751-762. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.083

Zhao, C., Cao, W., Dong, T., & Jiang, F. (2018b). Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfe*r, 120, 751-762. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.083

Zichen, W., & Changqing, D. (2021). A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 139). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110685