



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**LİTYUM İYON ARAÇ BATARYALARIN EFEKTİF OLARAK
SOĞUTULMASI VE HOMOJEN SICAKLIK DAĞILIMININ
SAĞLANMASI İÇİN FARKLI YÖNTEMLERİN SAYISAL VE
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Ferhat AKKUŞ

**Ekim-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**LİTYUM İYON ARAÇ BATARYALARIN EFEKTİF OLARAK
SOĞUTULMASI VE HOMOJEN SICAKLIK DAĞILIMININ
SAĞLANMASI İÇİN FARKLI YÖNTEMLERİN SAYISAL VE
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Ferhat AKKUŞ

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Zerrakki IŞIK**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Prof. Dr. İbrahim UZUN

Doç. Dr. Battal DOĞAN

**Ekim-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ferhat AKKUŞ tarafından hazırlanan “Lityum İyon Araç Bataryaların Efektif Olarak Soğutulması ve Homojen Sıcaklık Dağılımının Sağlanması için Farklı Yöntemlerin Sayısal ve Deneysel Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması 16/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. İbrahim UZUN

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Zerrakki IŞIK

.....

Üye

Prof. Dr. Bahattin IŞCAN

.....

Üye

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

.....

Üye

Doç. Dr. Battal DOĞAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı (2022/2) tarafından 1649B032205256 nolu başvuru numarası ve Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2022-Doktora-04 nolu projesi ile desteklenmiştir.

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Ferhat AKKUŞ
16.10.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

LİTYUM İYON ARAÇ BATARYALARIN EFEKTİF OLARAK SOĞUTULMASI VE HOMOJEN SICAKLIK DAĞILIMININ SAĞLANMASI İÇİN FARKLI YÖNTEMLERİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Ferhat AKKUŞ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Zerrakki IŞIK

2025, 159 Sayfa

Günümüzde elektrikli araçlar çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda hızla yaygınlaşmakta olup, sistem performanslarında bataryalar kritik öneme sahiptir. Çevrim ömrünün ve enerji yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle tercih edilen lityum iyon bataryalar, şarj-deşarj döngülerinde oluşan ısı yükleri sonucu performans kaybı ve güvenlik sorunları yaşayabilmektedir. Bu nedenle batarya termal yönetim sistemleri tasarımları yapılarak batarya paketlerinin, optimum sıcaklık aralığında ve hücreler arası sıcaklık farkı düşük olacak şekilde çalıştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada 28 adet 18650 silindirik tip hücreden oluşan batarya paketleri, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli olmak üzere dört farklı dizilimde tasarlanmış; hava, ısı borulu ve sıvı soğutmalı olmak üzere üç farklı termal yönetim sistemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Hava soğutma çalışmalarında 10 A akım değerinin üzerindeki akımlarda doğal taşınım yetersiz kalmış, bu nedenle zorlanmış konveksiyon uygulanmıştır. Giriş fan hızlarının (4–12) m/s, çıkış fanlarının (0–7) m/s arasında değiştiği çalışmada, 10 A iledeşarjda tek çıkışlı yapı ile maksimum sıcaklık yaklaşık 31,5 °C seviyesinde oluşurken, iki çıkışlı yapı ile 29,8 °C'ye düşmüştür. 15 A akımda sıcaklık 52,8 °C seviyesinden 35 °C seviyelerine kadar düşürülmüş ve hava yönlendirme stratejisinin etkisi net biçimde gözlemlenmiştir. Ayrıca doğal taşınım ile 65 °C seviyelerine ulaşan paket sıcaklığı, 9,6 m/s giriş ve fanlı çıkış kullanımıyla 31,15 °C'ye kadar düşürülmüş ve yaklaşık %52 oranında iyileşme elde edilmiştir. Simetrik giriş-çıkış konfigürasyonlarında çoklu çıkış fanı kullanımı, hava soğutma sistemlerinde en yüksek termal homojenlik ve soğutma performansını sağlamıştır.

Isı borulu soğutma çalışmalarında hücreler arasına yerleştirilen farklı sayılardaki (1-2-3) bakır ısı boruları ve hava akışı birlikte değerlendirilmiştir. 5–20 m/s hava hızlarında gerçekleştirilen testlerde, içbükey dizilim tüm boru sayılarında en iyi performansı göstermiş, üç borulu yapı ve 20 m/s hava hızında sıcaklık farkı 1 °C'nin altına düşmüştür. Köşeli dizilimde 5 m/s hızda (9–10) °C olan sıcaklık farkı, üç borulu yapıda 20 m/s akış hızında yaklaşık 3 °C'ye kadar azaltılmıştır. Boru sayısının artırılması tüm dizilimlerde belirgin iyileşme sağlamıştır.

Sıvı soğutma sistemlerinde ise farklı boru sayılarında soğutucu akışkan olarak su ve antifriz kullanılmış, (0,25–0,93) L/dk debi aralıkları test edilmiştir. Debi arttıkça sıcaklıklar düşmüş, antifriz daha homojen sıcaklık dağılımı sağlayarak suya kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Yüksek ısı yüklerinde sıvı soğutmanın hava ve ısı borulu sistemlere göre daha düşük sıcaklık farkı ve kararlı termal davranış sağladığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, batarya modüllerinde hava, ısı borulu ve sıvı soğutma gibi farklı soğutma stratejilerinde dizilim geometrisinin ve debi kontrolünün termal performans üzerinde kritik rol oynadığını göstermektedir. Çoklu çıkış ve simetrik akış düzenleri hem maksimum sıcaklığı düşürmede hem de sıcaklık homojenliğini artırmada en etkili tasarımlar olarak öne çıkmıştır. Hava soğutma özellikle optimize fan yerleşimi ile başarılı sonuç verirken, ısı borulu ve sıvı soğutma sistemleri daha düşük sıcaklık farkı ve daha kararlı çalışma sunarak yüksek ısı yüklerinde üstünlük sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, batarya termal yönetim sistemleri, lityum iyon bataryalar, hava soğutma, ısı borulu soğutma, sıvı soğutma, uniform sıcaklık dağılımı



ABSTRACT
DOCTORAL THESIS
**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIFFERENT
METHODS FOR EFFECTIVE COOLING OF LITHIUM-ION VEHICLE
BATTERIES AND ENSURING HOMOGENEOUS TEMPERATURE
DISTRIBUTION**

Ferhat AKKUŞ

Batman University Graduate Education Institute

Mechanical Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Zerrakki IŞIK

2025, 159 Pages

Today, electric vehicles are rapidly becoming widespread in line with environmental sustainability goals, and batteries are critical to system performance. Lithium-ion batteries, preferred for their long cycle life and high energy density, can experience performance loss and safety issues due to thermal loads generated during charge-discharge cycles. Therefore, battery thermal management systems must be designed to ensure battery packs operate within an optimal temperature range and with minimal temperature differences between cells.

In this study, battery packs consisting of 28 cylindrical 18650 cells were designed in four different configurations: triangular, concave, convex, and angular. Three different thermal management systems—air-cooled, heat pipe-cooled, and liquid-cooled—were experimentally and numerically investigated.

In the air cooling studies, natural convection was insufficient at currents above 10 A, so forced convection was applied. In the study, where the inlet fan speeds varied between (4–12) m/s and the outlet fan speeds between (0–7) m/s, the maximum temperature was approximately 31.5 °C with a single outlet structure at 10 A discharge, while it dropped to 29.8 °C with a dual outlet structure. At a current of 15 A, the temperature was reduced from 52.8 °C to 35 °C, and the effect of the air direction strategy was clearly observed. Furthermore, the package temperature, which reached 65 °C with natural convection, was reduced to 31.15 °C using a 9.6 m/s inlet and fan-assisted outlet, achieving an improvement of approximately 52%. The use of multiple outlet fans in symmetric inlet-outlet configurations provided the highest thermal homogeneity and cooling performance in air cooling systems.

In heat pipe cooling studies, different numbers (1-2-3) of copper heat pipes placed between the cells and air flow were evaluated together. In tests conducted at air speeds of 5–20 m/s, the concave arrangement showed the best performance for all numbers of pipes, and the temperature difference fell below 1 °C for the three-pipe structure at an air speed of 20 m/s. The temperature difference of (9–10) °C at 5 m/s in the angular arrangement was reduced to approximately 3 °C in the three-pipe structure at a flow velocity of 20 m/s. Increasing the number of pipes provided a significant improvement in all arrangements.

In liquid cooling systems, water and antifreeze were used as coolants with different numbers of pipes, and flow rates ranging from (0.25–0.93) L/min were tested. Temperatures decreased as the flow rate increased, and antifreeze provided more homogeneous temperature distribution, yielding more successful results compared to water. It was determined that liquid

cooling provides a lower temperature difference and more stable thermal behavior compared to air and heat pipe systems under high heat loads.

The results obtained demonstrate that the arrangement geometry and flow rate control play a critical role in the thermal performance of battery modules under different cooling strategies, such as air, heat pipe, and liquid cooling. Multiple outlet and symmetrical flow patterns have emerged as the most effective designs for both reducing maximum temperature and increasing temperature homogeneity. Air cooling has yielded successful results, particularly with optimized fan placement, while heat pipe and liquid cooling systems have demonstrated superiority under high heat loads by offering lower temperature differences and more stable operation.

Keywords: Electric vehicles, battery thermal management systems, lithium-ion batteries, air cooling, heat pipe cooling, liquid cooling, uniform temperature distribution.



ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve tecrübeleriyle yanımda olan, akademik ve kişisel gelişimime büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet Zerrakki IŞIK' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince yapıcı değerlendirme ve yönlendirmeleriyle çalışmama katkı sağlayarak bana yol gösteren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Bahattin İŞCAN ve Prof. Dr. Hüseyin AYDIN' a teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde finansal olarak katkı sağlayan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na ve Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu süreçte sabır ve anlayışlarıyla yanımda olan desteğiyle bana güç veren sevgili eşime ve varlığıyla benim için en büyük güç, umut ve ilham kaynağım olan biricik kızıma teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan, sevgileriyle beni her daim ayakta tutan en büyük güç kaynağım sevgili annem, babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ferhat AKKUŞ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖN SÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri.....	9
1.1.1. Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri.....	10
1.1.2. Isı borulu soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri.....	10
1.1.3. Sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri.....	11
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	33
3.2. Isı Borulu Batarya Termal Yönetim Sistemleri	45
3.3. Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63
4.1. Hava Soğutma Bulguları.....	63
4.1.1. Üçgen dizilim hava soğutma bulguları	64
4.1.1.1. Üçgen dizilim deneysel bulgular	64
4.1.1.2. Üçgen dizilim simülasyon bulguları	72
4.1.2. Diğer dizilimlerin hava soğutma bulguları	84
4.2. Isı Borulu Soğutma Bulguları	101
4.3. Sıvı Soğutma Bulguları.....	120
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	145
5.1 Hava Soğutma Sonuçları	146
5.2 Isı Borulu Soğutma Sonuçları.....	147
5.3 Sıvı Soğutma Sonuçları	148
5.4 Öneriler	150
KAYNAKLAR	151
EKLER	160

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Hava için farklı hız değerlerinde Reynolds Sayısı hesaplamaları	35
Tablo 3.2. Üçgen dizilim deneylerinde zorlanmış taşınım hava akış konfigürasyonları	39
Tablo 4.1. Üçgen dizilime sahip batarya paketi için incelenen hava giriş-çıkış konfigürasyonları	73
Tablo 4.2. Üçgen dizilimin farklı giriş-çıkış konfigürasyonlarına ait sayısal simülasyon sonuçları ve soğutma performans karşılaştırması	82
Tablo 4.3. Üçgen dizilimde 10 amper için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması	83
Tablo 4.4. İçbükey dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri	88
Tablo 4.5. Dışbükey dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri	92
Tablo 4.6. Köşeli dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2022 yılında küresel ölçekte enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı (Statistical Review of World Energy 2022, 2022).....	3
Şekil 1.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması ve genel yapıları (Kalkan, 2021).....	4
Şekil 1.3. Batarya konfigürasyonları	5
Şekil 1.4. Lityum iyon bataryaların içyapısı ve çalışma prensibi (Jones, 2024)	7
Şekil 2.1. Elektrikli araçlara yönelik yapılan yayın çalışmaları, 2000-2024 (kaynak: Scopus; anahtar kelime elektrikli araçlar; tarih: 13 Mart 2025)	13
Şekil 2.2. Batarya termal yönetim sistemlerine ilişkin yapılan yayın çalışmaları (2000-2024) (kaynak: Scopus; anahtar kelime batarya termal yönetimi; tarih: 15 Mart 2025)	14
Şekil 3.1. Batarya hücreleri dizilim plakaları	25
Şekil 3.2. Üçgen dizilime sahip alt plakalı batarya paketi.....	25
Şekil 3.3. İçbükey dizilime sahip alt plakalı batarya paketi	26
Şekil 3.4. Dışbükey dizilime sahip alt plakalı batarya paketi.....	27
Şekil 3.5. Köşeli dizilime sahip alt plakalı batarya paketi.....	27
Şekil 3.6. Kapalı ve Doğal Taşınım durumlarında akım sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.7. Hava soğutma deney düzeneği	44
Şekil 3.8. Üçgen dizilim için ısı borulu soğutma modelleri	46
Şekil 3.9. Bir borulu üçgen dizilime sahip batarya paketi.....	47
Şekil 3.10. İçbükey dizilim için ısı borulu soğutma modelleri.....	49
Şekil 3.11. İki borulu içbükey dizilime sahip batarya paketi	49
Şekil 3.12. Dışbükey dizilim için ısı borulu soğutma modelleri	51
Şekil 3.13. Üç borulu dışbükey dizilime sahip batarya paketi	51
Şekil 3.14. Köşeli dizilim için ısı borulu soğutma modelleri	52
Şekil 3.15. İki borulu köşeli dizilime sahip batarya paketi	53
Şekil 3.16. Isı borulu deney düzeneği ve kullanılan ekipmanlar.....	55
Şekil 3.17. Dizilimlere ait sıvı soğutma deney düzenekleri	57
Şekil 3.18. a. Üçgen b. İçbükey c. dışbükey d. köşeli dizilim sıvı soğutma tasarımları	58
Şekil 3.19. Sıvı soğutma deney düzeneği ve kullanılan ekipmanlar	61
Şekil 4.1. 10 A akımda fan hızı ve konum değişiminin maksimum batarya paket sıcaklığına etkisi	64
Şekil 4.2. Hava akış hızının 4 m/s olması durumunda farklı konfigürasyonlarda maksimum sıcaklık - akım değişimi	65
Şekil 4.3. 8 m/s hava akış hızında maksimum sıcaklık - akım değişimi	66
Şekil 4.4. 15 Amper akım deneysel çalışmaları	68
Şekil 4.5. Fan hızı, akım ve çıkış konfigürasyonlarının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi.....	69
Şekil 4.6. Yüksek akımlarda çıkış fanı kullanımının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi.....	70
Şekil 4.7. Sayısal analizlerde kullanılan üçgen dizilim batarya paket konfigürasyonlarının genel görünümü.....	74
Şekil 4.8. Konfigürasyon A 'da batarya paketinin sıcaklık dağılımı.....	75
Şekil 4.9. Konfigürasyon B 'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı.....	76
Şekil 4.10. Konfigürasyon C'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 4.11. Konfigürasyon D'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı.....	78
Şekil 4.12. Konfigürasyon E'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı	79
Şekil 4.13. Konfigürasyon F'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı	80
Şekil 4.14. Konfigürasyon G'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı.....	81
Şekil 4.15. İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilim sayısal model tasarımları	86

Şekil 4.16. İçbükey dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları.....	89
Şekil 4.17. 10 Amper akım için içbükey dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi	90
Şekil 4.18. Dışbükey dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları.....	93
Şekil 4.19. 10 Amper akım için dışbükey dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi	95
Şekil 4.20. Köşeli dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları	98
Şekil 4.21. 10 Amper akım için köşeli dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi.....	99
Şekil 4.22. 1 borulu üçgen dizilime sahip batarya paketi deneysel veriler	102
Şekil 4.23. 1 borulu üçgen dizilim sayısal sonuçları	103
Şekil 4.24. Üçgen dizilim 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları	105
Şekil 4.25. İçbükey dizilim 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 4.26. İçbükey dizilim 2 borulu deneysel sonuçları.....	109
Şekil 4.27. Dışbükey dizilime ait 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları.....	111
Şekil 4.28. 3 borulu dışbükey dizilim deneysel sonuçlar	113
Şekil 4.29. Köşeli dizilime ait 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları	115
Şekil 4.30. 2 borulu köşeli dizilim deneysel sonuçları	117
Şekil 4.31. 1 borulu üçgen dizilimde su ve antifriz için 10 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları.....	121
Şekil 4.32. 1 borulu üçgen dizilimde su ve antifriz için 15 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları.....	123
Şekil 4.33. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 1 borulu sayısal sonuçlar.....	125
Şekil 4.34. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 2 borulu sayısal sonuçlar.....	125
Şekil 4.35. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 3 borulu sayısal sonuçlar.....	126
Şekil 4.36. İçbükey dizilimde 10 Amper akımda 1 borulu simülasyon sonuçları.....	128
Şekil 4.37. 2 borulu içbükey dizilimde su ve antifriz için 10 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları.....	130
Şekil 4.38. 2 borulu içbükey dizilimde su ve antifriz için 15 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları.....	131
Şekil 4.39. 2 borulu içbükey dizilimde 10 Amper akımda sayısal analiz sonuçları.....	132
Şekil 4.40. 3 borulu içbükey dizilimde 10 Amper akımda sayısal analiz sonuçları.....	133
Şekil 4.41. 1 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları	135
Şekil 4.42. 2 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları	136
Şekil 4.43. 3 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı akımlarda soğutma deneysel sonuçları.....	137
Şekil 4.44. 3 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için aynı debide sayısal analiz sonuçları	138
Şekil 4.45. 1 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları.....	139
Şekil 4.46. 2 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı akımlarda soğutma deneysel sonuçları.....	140
Şekil 4.47. 2 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için aynı debide sayısal analiz sonuçları.....	141

Şekil 4.48. 3 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları.....	142
---	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	: Şarj/deşarj oranı
g	: Giriş
ç	: Çıkış
T	: Sıcaklık (°C veya K)
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
c_p	: Özgül ısı kapasitesi (J/kg·K)
Pa	: Pascal
kPa	: Kilo Pascal
T _{max}	: Maksimum sıcaklık
°C	: Santigrat derece
K	: Kelvin
J	: Joule
lt	: Litre
s	: Saniye
dk	: Dakika
sa	: Saat
A	: Amper
V	: Voltaj
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
v (u,v,w)	: Akışkan hızı (Hız bileşenleri) (m/s)
d	: Karakteristik uzunluk/boru çapı (m)
k	: Isıl iletkenlik katsayısı (W/m·K)
k (turb.)	: Türbülans kinetik enerjisi
ε	: Türbülans dağılım oranı
G _k , G _{β} , Y _m , S _k , S ε	: k- ε model terimleri
p	: Basınç (Pa)
μ	: Dinamik viskozite (Pa.s)
ν	: Kinematik viskozite (m ² /s)
∂	: Kısmi türev
Ah	: Amper-saat
q	: Isı akısı (W/m ²)
P	: Güç (W)
W	: Watt (J/s)
R	: Direnç (Ω)
$\tilde{V}$	: Hacimsel debi (lt/dk)
V (hacim)	: Hacim (lt)
A (alan)	: Alan (m ²)
t	: Zaman (s)

Kısaltmalar

LPG	: Liquefied petroleum gas Sıvılaştırılmış petrol gazı
EJ	: Exajoule
BEV	: Battery Electric Vehicle Tam elektrikli araçlar
HEV	: Hybrid Electric Vehicle Hibrit elektrikli araçlar
PHEV	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle Fişli hibrit elektrikli araçlar
EV	: Electric Vehicle Elektrikli Araç
BTMS	: Battery Thermal Management System Batarya termal yönetim sistemleri
PCM	: Phase Change Material Faz Değiştiren Malzeme
LiCoO ₂	: Lityum kobalt oksit
LiMn ₂ O ₄	: Lityum mangan oksit
LiFePO ₄	: Lityum demir fosfat
Li ⁺	: Lityum katyonu
Li-ion	: Lityum-iyon
Re	: Reynolds sayısı
CFD	: Computational Fluid Dynamics Hesaplama akışkanlar dinamiği
CAD	: Computer-aided design Bilgisayar destekli tasarım
SoC	: State of Charge Şarj Durumu
k-ε	: k-epsilon türbülans modeli

1. GİRİŞ

Canlılar, yaşamlarını sürdürebilmek ve biyolojik süreçlerini devam ettirebilmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Enerji, yalnızca bireysel yaşamın temel bir unsuru olmakla kalmayıp, aynı zamanda toplumların ekonomik, teknolojik ve sosyal gelişimlerinin de temel yapı taşlarından biridir. Son yıllarda, dünya genelinde nüfus artışı, kentleşme ve sanayi alanındaki hızlı ilerlemeler, enerji talebinde önemli bir artışa neden olmuştur. Bu artış, enerji kaynaklarının daha verimli yönetilmesi ve çevresel etkilerinin azaltılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır (Alkan & Albayrak, 2020; Saçlı, 2025).

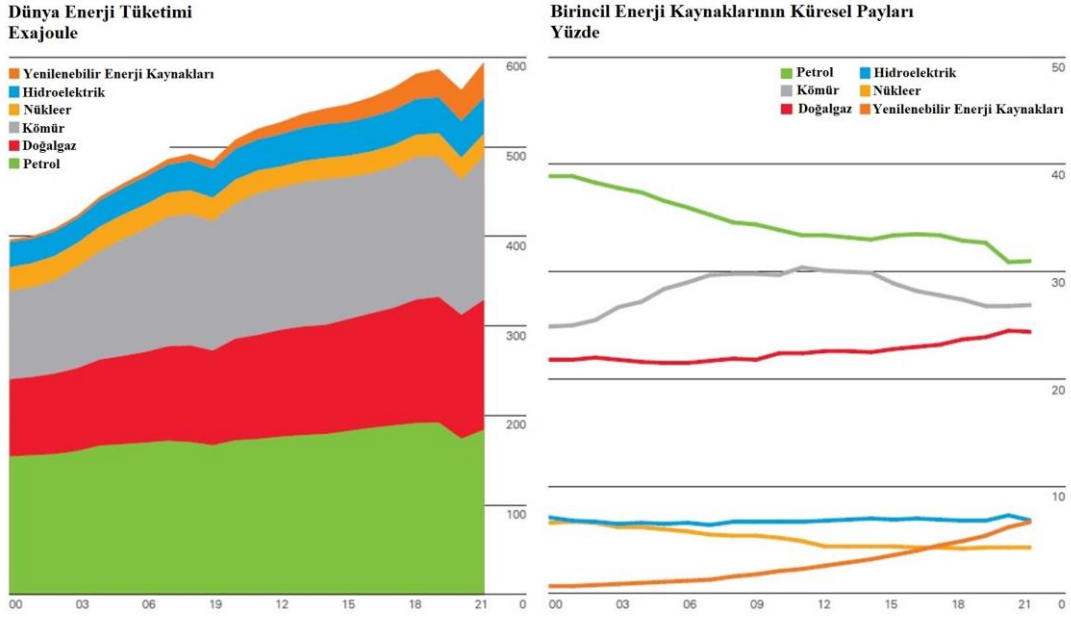
21. yüzyıla kadar, enerji ihtiyacının büyük bölümü petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenemeyen fosil yakıtlarla karşılanmıştır. Ancak bu kaynakların sınırlı rezervlere sahip olması, çevresel kirliliğe yol açması ve iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri, enerji politikalarında köklü değişikliklere neden olmuştur. Bu doğrultuda, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler, enerji üretiminde daha sürdürülebilir ve çevreye daha duyarlı yöntemlere yönelerek yenilenebilir kaynakları kullanmaya başlamışlardır. Rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, güneş ve dalga enerjisi gibi kaynaklar, enerji üretimindeki bu dönüşümün temel bileşenlerini oluşturmaktadır (Angin, 2005).

Enerji kaynakları, kullanım özelliklerine göre iki ana kategoriye ayrılmaktadır: yenilenebilir (temiz enerji) ve yenilenemez (fosil yakıtlar) enerji kaynakları (Herzog vd., 2001). Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerde tükenmeyen, sürekli olarak kendini yenileyebilen ve çevreye minimum zarar veren kaynaklardır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve dalga enerjisi bu kategorideki başlıca örneklerdir. Bu kaynakların kullanımı enerji güvenliğini güçlendirmenin yanı sıra karbon salınımlarını düşürerek iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Buna karşın, yenilenemez enerji kaynakları bir kez kullanıldığında tükenen ve kendini yenileyemeyen kaynaklardır. Petrol, doğalgaz ve kömür bu gruba dâhildir. Her ne kadar yüksek enerji yoğunluğuna sahip olsalar da, sınırlı rezervleri ve çevresel etkileri nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadırlar. Enerji kaynakları, dönüştürülebilirlik özelliklerine göre de primer (birincil) ve sekonder (ikincil) enerji kaynakları olarak sınıflandırılır. Primer enerji, herhangi bir dönüşüme uğramamış doğal hâldeki enerjiyi ifade eder ve doğal gaz, petrol, kömür, biyokütle, hidroelektrik, dalga, rüzgâr ve güneş

bu gruba örnektir. Sekonder enerji kaynakları, primer enerji kaynakların çeşitli dönüştürme süreçlerinden geçirilmesiyle elde edilir; benzin, dizel yakıtı, sıvılaştırılmış petrol gazı LPG ve elektrik bu tür enerji kaynaklarına örnektir (Alrwashdeh, 2022; Ang vd., 2022; Farret & Simões, 2005; Karatepe vd., 2012; Kartal, 2022; Michaelides, 2012; Şenel, t.y.).

British Petroleum'un 2022 Enerji Raporu'na göre, dünya genelinde enerji kaynaklarının tüketimi ve bu talebin karşılanmasındaki dağılım incelendiğinde, yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımında azalma eğilimi görülürken, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında belirgin bir artış dikkat çekmektedir (Şekil 1.1.). Şekil 1.1'in sol tarafında, dünya enerji tüketiminin yıllara göre değişimi Exajoule (EJ) cinsinden gösterilmektedir. Exajoule, 10^{18} joule enerjiye eşdeğer olan ve büyük ölçekli enerji miktarlarını ifade etmekte kullanılan bir birimdir. Petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, toplam tüketimde hâlâ önemli bir paya sahip olmakla birlikte, özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketiminde kayda değer bir artış yaşandığı görülmektedir. Bu durum, enerji sektöründe sürdürülebilirlik odaklı bir dönüşümün başladığını açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 1.1. 'in sağ tarafında ise, küresel birincil enerji kaynaklarının yüzdelik dağılımı yer almaktadır. Petrol ve kömür gibi fosil yakıtların toplam enerji üretimindeki payı yıllar içinde azalma eğilimi göstermiştir. Özellikle kömürün payında belirgin bir düşüş yaşanırken, doğalgazın payı nispeten sabit kalmıştır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi) toplam enerji üretimindeki payı, 2000'li yılların başından itibaren sürekli bir artış eğilimi sergilemiştir. Hidroelektrik enerji ise, yenilenebilir kaynaklar arasında hâlâ önemli bir paya sahip olsa da, rüzgâr ve güneş gibi diğer yenilenebilir enerji türlerinin hızlı büyümesi nedeniyle toplam enerji üretimindeki görece önemi azalmıştır (Statistical Review of World Energy 2022, 2022).

Bu veriler, enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek daha fazla ön plana çıktığını ve fosil yakıtların yerini almaya başladığını göstermektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının artış eğilimi, enerji güvenliğini artırma, karbon emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliği ile mücadele etme hedefleri doğrultusunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu eğilim, gelecekteki enerji politikalarının yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla odaklanacağını ve bu kaynakların enerji üretimindeki payının giderek artacağını işaret etmektedir.

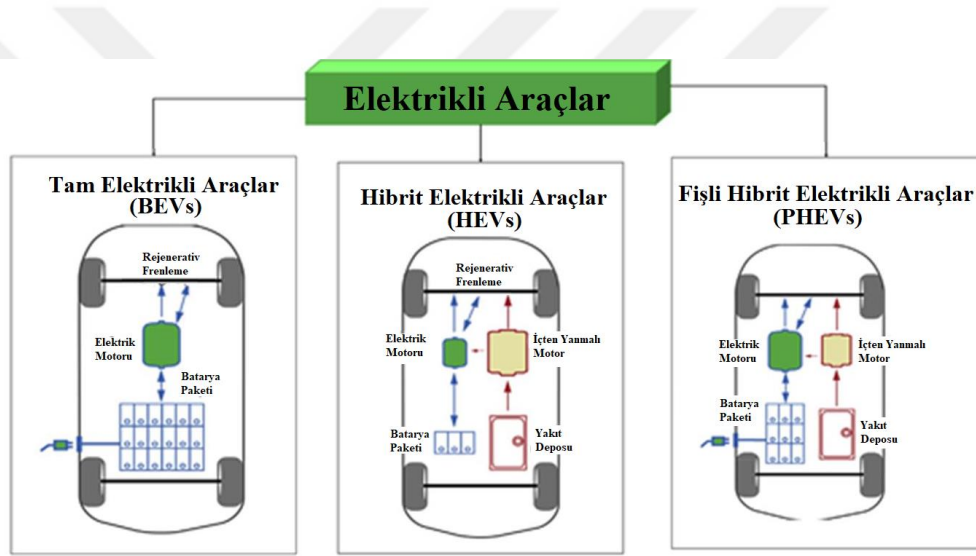


Şekil 1.1. 2022 yılında küresel ölçekte enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı (Statistical Review of World Energy 2022, 2022)

Nüfus artışı ve enerji tüketimindeki sürekli yükseliş, ulaşım sektörünün kullanımını her geçen gün artırmaktadır. Ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılan benzin, dizel yakıtı ve LPG gibi fosil kökenli yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlu taşıtlar, yalnızca petrol kaynaklarının hızla tükenmesine neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda küresel ısınma, hava kirliliği ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu sorunların çözümüne yönelik olarak, toplumlar ulaşım sektöründe çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olan elektrikli araçlara yönelmeye başlamıştır (Emadi, 2018; Lahnaoui vd., 2018).

Elektrikli araçlar, çevreye zarar vermeyen, yüksek verimlilik sunan ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlara sahip teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Şekil 1.2' de, elektrikli araçların genel yapıları ve sınıflandırılması detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Elektrikli araçlar, yapılarına ve çalışma prensiplerine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır: tam elektrikli araçlar (BEV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV). Tam elektrikli araçlar yalnızca elektrik motoru ile çalışan ve içten yanmalı motor içermeyen araçlardır. Enerji, bataryalarda depolanır ve araç tamamen elektrikle çalışır. Bu araçlar, sıfır emisyon üretmeleri nedeniyle çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Hibrit elektrikli araçlar, içten yanmalı ve elektrik motorlarını eş zamanlı veya ayrı ayrı çalıştırabilen bir sistemle donatılmıştır. Bu araçlar frenleme sırasında kazanılan enerjiyi depolayarak verimliliği artırır. Elektrik motoru ve içten

yanmalı motor, birlikte çalışarak yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır. Fişli hibrit elektrikli araçlar ise, içten yanmalı motorun yanı sıra harici bir güç kaynağından şarj edilebilen bir elektrik motoru içermektedir. Bu araçlar hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motorun avantajlarını birleştirerek daha esnek bir kullanım sunar. Şekil 1.2’ de, elektrikli araçların farklı türlerini ve bu türlerin enerji depolama ve kullanım sistemlerini görsel olarak açıklamaktadır. Bu sınıflandırma, elektrikli araçların teknolojik çeşitliliğini ve her bir türün farklı kullanım avantajlarını ortaya koymaktadır. Elektrikli araçların bu çeşitliliği, ulaştırma sektöründe fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve çevresel etkileri minimize etme hedefleri doğrultusunda önemli bir potansiyel sunmaktadır (“Front Matter”, 2021; Han vd., 2014; Koyama vd., 2019; X. Li vd., 2019; Lyu vd., 2019; Natkunarajah vd., 2015; Pesaran, 2002; Wei & Agelin-Chaab, 2019; Zhu vd., 2014).



Şekil 1.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması ve genel yapıları (Kalkan, 2021)

Elektrikli araçlarda enerjinin depolanması ve kullanımı açısından en kritik bileşeni bataryalardır. Diğer bataryalara göre elektrikli araçlarda en çok kullanılan batarya türü olan lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür, kendi kendine deşarj oranının düşük olması ve hafıza etkisinin olmaması gibi üstün özellikler sayesinde öne çıkmaktadır. Hafıza etkisi, nikel-kadmiyum ve nikel-metal hidrit bataryalarda görülür. Bu etki, batarya tam şarj-deşarj edilmeden sürekli aynı seviyelerde şarj edilip boşaltıldığında bataryanın "o seviyeyi hatırlaması" ve tam kapasitesini kullanamaması durumudur. Örneğin; Batarya her seferinde % 40 ile % 80 arasında kullanılıyorsa, sanki toplam kapasitesi bu aralık kadarmış gibi davranmasıdır. Elektrikli araçların yüksek çalışma performansı, hafifliği ve iyi termal performans parametrelerini

sağlamak için en önemli bileşenlerden biri lityum iyon bataryalardır. Lityum iyon bataryalar üç farklı tasarım biçimiyle karşımıza çıkmaktadır: kese, prizmatik ve silindirik (Şekil 1.3). Kese tip lityum iyon bataryalar, düşük elektrik direnci, hafiflik ve güvenlik gibi avantajlara sahip olmasına rağmen yüksek oranlardaki şarj/deşarj sırasında bataryanın yüzeyinden merkezine doğru sıcaklık farkının değişken olması, termal yönetim kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu durum, termal yönetim sistemlerinin daha dikkatli bir şekilde tasarlanmasını gerektirmektedir. Prizmatik tip lityum iyon bataryalar, elektrot malzemesinin yeterli miktarda bulunması sayesinde yüksek enerji gereksinimlerini karşılayabilmekte ve daha fazla kapasite isteyen uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, prizmatik bataryaların soğutulacak yüzey alanının daha büyük olması, termal yönetim açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Silindirik tipteki lityum iyon bataryalar ise kompakt tasarımları ve yüksek güç yoğunlukları ile öne çıkmaktadır. Bu bataryalar, özellikle enerji yoğunluğu ve mekanik dayanıklılığın kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir (Akkuş & Işık, 2023; Bai vd., 2019; Baran vd., 2019; Etacheri vd., 2011; Huang vd., 2017; Y. Li vd., 2019; Mastali vd., 2018; Panchal vd., 2016; W. Wu vd., 2018; Xie vd., 2020; Y. Zhang vd., 2019).



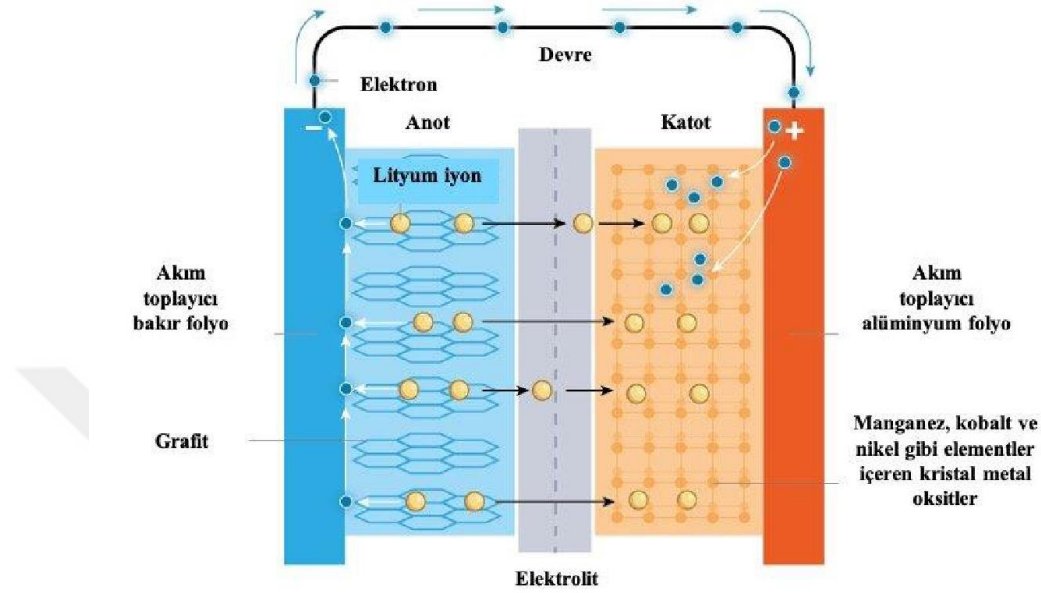
Şekil 1.3. Batarya konfigürasyonları

Çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri olan elektrikli araçlar, hızla yayılmakta olup, bu araçların verimliliği ve güvenliği büyük ölçüde kullanılan batarya teknolojilerine bağlıdır. Lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlarda enerji yoğunluğunun yüksek ve uzun çevrim ömrünün uzun olması nedeniyle öne çıkan enerji depolama seçeneğidir. Ancak, bu bataryalar yüksek maliyet, sınırlı ömür ve sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyet gibi önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Özellikle sıcaklık,

bataryaların performansını, şarj-deşarj hızını ve ömrünü doğrudan etkileyen en kritik parametrelerden biridir. Lityum iyon bataryalar, sıcaklık değişimlerine oldukça duyarlıdır ve aşırı sıcaklık artışları veya düşüşleri, batarya hücrelerinin kimyasal yapısını olumsuz etkileyebilir, bu da performans kaybına ve güvenlik risklerinin artmasına yol açabilir. Bu nedenle, bataryaların optimum sıcaklık aralığında tutulması, verimliliklerinin korunması ve güvenliklerinin sağlanması için etkin bir termal yönetim sistemi büyük bir öneme sahiptir. Elektrikli araçların bataryalarının performansının en üst seviyeye çıkabilmesi için sadece batarya teknolojisinin değil, aynı zamanda çevresel koşulların ve iç sıcaklık dengesinin de dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir (Conte, 2006; W. Li vd., 2019; Mohammed vd., 2019).

Lityum iyon bataryaların performansı, ömrü ve güvenliği üzerinde etkili olan en önemli faktörlerden biri sıcaklıktır. Bataryalar, özellikle şarj vedeşarj sırasında sıcaklık değişimlerine çok hassastır. Bataryanın şarj vedeşarj hızını belirleyen C oranı, doğrudan batarya sıcaklığını etkileyen bir parametredir. Örneğin, 1C oranındadeşarj edilen bir batarya, kapasitesini bir saat içinde boşaltabilirken, daha yüksek C oranları ile bu süre kısılır ve bataryanın daha fazla ısı üretmesine neden olur. Yüksek C oranlarında oluşan sıcaklık artışı, bataryanın termal dengesizliğe girmesine, performans kaybına ve ömrünün kışalmasına yol açar. Elektrikli araçlardaki hızlanma, rejeneratif frenleme ve iklimlendirme gibi yüksek güç talepleri, batarya yükünü artırarak C oranının 1C'nin üzerine çıkmasına neden olur ve bu da etkili bir termal yönetim sisteminin gerekliliğini zorunlu hale getirir. Lityum iyon bataryalar -40 °C ile 50 °C arasında çalışabilmesine rağmen, 20 °C ile 40 °C aralığı optimum çalışma sıcaklık aralığı olup hücreler arasındaki sıcaklık farkının 5°C'den fazla olmaması gerekmektedir. Ayrıca, çevresel sıcaklıklar da batarya performansını doğrudan etkileyerek verimliliğini ve güvenliğini belirler. Optimum sıcaklık aralığının dışına çıkıldığında bataryanın termal performansı olumsuz yönde etkilenir ve aşırı sıcaklıklar, güvenlik risklerini artırabilir. Çalışma sıcaklığının 25 °C'den 5 °C'ye düşmesi,deşarj kapasitesinde belirgin bir azalmaya yol açmakta olup, artan C oranları ve düşük çevresel sıcaklıklar batarya performansını ciddi şekilde olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, lityum iyon bataryaların güvenliği, verimliliği ve uzun ömürlü kullanımını sağlamak için sadece C oranının kontrol edilmesi değil, aynı zamanda etkili bir termal yönetim sisteminin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır (Buchmann, 2011; Fan vd., 2013; Huang vd., 2019; Z. Li vd., 2014; Ling vd., 2014; Lisbona & Snee, 2011; Malik vd., 2018; Panchal vd., 2017; Sun vd., 2016; Q. Wang vd., 2012; J. Xu vd., 2017; Z. Zhang vd., 2018, 2018).

Lityum iyon bataryalarda karşılaşılan sorunları daha iyi anlayabilmek için bu bataryaların bileşenleri ve çalışma prensiplerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Lityum iyon bataryaların içyapısı ve çalışma prensibi (Jones, 2024)

Lityum iyon bataryalar, dört temel bileşenden oluşmaktadır: pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), sıvı veya jelden oluşan ayırıcı ve elektrolit. Bu bileşenler, bataryaların işleyişinde ve performansında kritik bir rol oynamaktadır. Bataryanın temel bileşenlerinden biri olan anot, genellikle grafit (karbon) malzemelerden üretilirken, katot ise lityum metal oksitlerden (örneğin, LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4) yapılmaktadır. Anot ve katot arasında yer alan ayırıcı, gözenekli bir membran yapısına sahiptir ve iki önemli işlevi yerine getirir: kısa devreyi önlemek ve lityum iyonlarının geçişine izin vermek. Ayırıcı, hücre içerisinde iyon transferini mümkün kılarken, aynı zamanda anot ile katotun fiziksel temasını engelleyerek bataryanın güvenliğini sağlar. Elektrolit ise lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareket etmesini sağlayan iletken bir sıvı veya jel formundadır. Elektrolitin bu iletken yapısı, bataryanın enerji depolama ve iletim süreçlerinde hayati bir rol oynar. Bu bileşenlerin uyumlu bir şekilde çalışması, lityum iyon bataryaların performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Lityum iyon bataryalarda, anot ve katot bir şarj cihazına bağlandığında, elektrotlar bir indirgeme-oksidasyon (redoks) reaksiyonuna girer. Şarj işlemi sırasında katotta oksidasyon meydana gelir; bu süreç, elektronların kaybına (oksidasyon durumunun artması) yol açar

ve bu elektronlar harici bir devre üzerinden anoda iletilir. Aynı zamanda, katotta lityum iyonları üretilir ve bu iyonlar elektrolit aracılığıyla negatif elektrota (anot) doğru hareket eder. Anot, karbon tabakalı bir yapıya sahiptir ve çok sayıda mikro gözenek içerir. Lityum iyonları, negatif elektrota ulaştığında, karbon tabakasının mikro gözeneklerine gömülür. Gömülen lityum iyonlarının miktarı arttıkça, bataryanın şarj kapasitesi de o oranda yükselir. Katottan gelen lityum iyonları, elektrolit tarafından ayırıcı aracılığıyla anoda taşınır. Anot, indirgeme adı verilen bir işlemle (oksidasyon durumunun azalması) katottan gelen elektronları alır. Bu süreçte, lityum iyonları ve elektronlar anotta birleşir. Şarj sırasında, lityum iyonları katottan anoda doğru hareket ederken, elektronlar da harici devreden geçerek aynı yönde akar. Lityum iyonlarının karbon tabakasının mikro gözeneklerine gömülmesi, anotta lityum iyonlarının depolanmasını sağlar. Deşarj sırasında ise bu süreç tersine işler. Anot oksidasyona uğrarken, daha önce oksidasyona uğramış olan katot, lityum iyonları ve elektronlarla birleşerek bir indirgeme reaksiyonuna girer. Bu sırada, elektronlar harici devre boyunca akarak cihazın çalışmasını sağlar. İndirgeme-oksidasyon reaksiyonları, lityum iyon bataryaların enerji depolama ve serbest bırakma süreçlerini düzenler ve böylece şarj ve deşarj döngüleri gerçekleşir. Standart bir anot ve katot sistemi, Li^+ iyonlarının hareketi ve elektronların transferi sayesinde büyük miktarda enerji üretilmesine olanak tanır (Bulut, 2022; Choudhari vd., 2020; Jones, 2024; J. Liu vd., 2024; S. Liu vd., 2023; C. Wu vd., 2023; X. Xu vd., 2022; J. Yang vd., 2023).

Bataryaların çalışma sıcaklığı, hem güvenlik hem de performans açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, lityum-iyon bataryaların uygun şekilde üretilmesi ve geliştirilmesi, elektrikli araç teknolojisinin ilerlemesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçlarda yer alan lityum iyon bataryaların verimli ve güvenli çalışması için sıcaklıklarının 20–40 °C aralığında tutulması önemlidir. Belirtilen sıcaklık aralığının dışına çıkılması, bataryanın termal performansını olumsuz yönde etkilemekte ve özellikle aşırı yüksek ya da düşük sıcaklıklarda ciddi güvenlik riskleri ortaya çıkmaktadır. Optimum sıcaklık aralığında çalışan bir bataryanın sıcaklığının kontrolsüz biçimde yükselmesi ve oluşan ısının zamanında uzaklaştırılamaması, termal kaçak riskini doğurmaktadır. Termal kaçak genellikle bir hücrede başlayan iç kısa devre, aşırı şarj, mekanik hasar, üretim kusurları veya separator (ayırıcı) erimesi gibi olaylar sonucu ortaya çıkar; hücre içindeki SEI tabakasının bozulması, elektrolit ayrışması ve katot/ana madde reaksiyonları gibi ekzotermik kimyasal tepkimeler hızla ısı üretir. Bu ısı yeterince hızlı uzaklaştırılamadığında hücre sıcaklığı artar, gaz üretimi ve basınç yükselir; komşu hücrelere ısı iletimi (iletim, konveksiyon, ışıyım) yoluyla yayılım göstererek hücre veya

paket seviyesinde zincirleme bir termal kaçak (propagasyon) oluşmasına neden olabilir. Termal kaçak; zararlı gaz salınımı, duman, yangın ve patlama gibi ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir. Bu tür termal risklerin önlenmesi ve bataryaların güvenli şekilde çalışmasının sağlanması amacıyla Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTMS – Battery Thermal Management Systems) büyük önem taşımaktadır. BTMS, lityum-iyon bataryaların sıcaklıklarını kontrol altında tutarak optimum çalışma aralığında kalmalarını sağlamak üzere tasarlanmış sistemlerdir. Bu sistemler; bataryaların aşırı ısınmasını önlemek, hücreler arası sıcaklık farkını en aza indirmek ve termal kaçak riskini azaltmak için aktif ve pasif soğutma yöntemleri, ısıtma mekanizmaları ve termal izolasyon teknolojilerinden yararlanmaktadır. BTMS, bataryaların termal performansını iyileştirerek hem güvenlik risklerini en aza indirir hem de bataryaların ömrünü uzatır. Ayrıca, elektrikli araçların enerji verimliliğini artırarak daha güvenilir ve sürdürülebilir bir kullanım sağlar. Bu nedenle, BTMS, lityum iyon bataryaların performansı ve güvenliği açısından kritik bir bileşen olarak kabul edilmektedir (Kshetrimayum vd., 2019; H. Liu vd., 2017).

1.1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Lityum iyon batarya hücrelerinin optimum çalışma sıcaklığında, normal güç ve akım yüklerinde kontrol edilmesi nispeten kolaydır. Ancak yüksek sıcaklıklar, yerel ısı oluşumunu artırarak batarya hücresi veya paketinde aşırı sıcaklık yayılmasına neden olabilir. Elektrikli araçların tasarımında, üreticilerin öncelikli olarak güvenliği sağlamak amacıyla verimli bir BTMS geliştirmesi gerekmektedir. Bu sistem, bataryalarda üretilen ısının hızlı ve kontrollü bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak hem güvenliği artırmakta hem de bataryaların performansını ve ömrünü optimize etmektedir. BTMS, kullanılan yöntemlere göre pasif, aktif ve hibrit olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Pasif BTMS, bataryanın sıcaklığını kontrol etmek için enerji tüketmeden ısıyı doğal yollarla dağıtan veya emen malzemeler (örneğin, faz değişim malzemeleri) kullanır ve düşük maliyetli bir çözüm sunar, ancak yüksek sıcaklık artışlarını kontrol etmede sınırlıdır. Aktif BTMS ise harici enerji kaynakları ve mekanik sistemler kullanarak sıcaklığı kontrol eder; bu sistemler hava soğutma, sıvı soğutma ve ısıtma mekanizmalarını içerir. Hava soğutma düşük maliyetli ancak sınırlı bir performansa sahipken, sıvı soğutma daha yüksek termal yönetim kapasitesi sunar ancak maliyeti ve karmaşıklığı daha yüksektir. Soğuk hava koşullarında ise ısıtma sistemleri bataryanın optimum sıcaklıkta çalışmasını

sağlar. Hibrit BTMS ise pasif ve aktif yöntemlerin bir kombinasyonunu kullanarak hem enerji tasarrufu sağlar hem de yüksek performans sunar; örneğin, faz değişim malzemeleri ile sıvı soğutma sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler, termal yönetimde verimliliği artırır. Bu sistemlerin her biri, elektrikli araçların tasarım gereksinimlerine ve kullanım koşullarına göre seçilerek bataryaların güvenliğini, performansını ve ömrünü optimize eder (Akkuş & Işık, 2023; H. Liu vd., 2017; J. Liu vd., 2024; Rao & Wang, 2011; Thakur vd., 2020).

1.1.1. Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri

Bataryaların soğutulması ve ortaya çıkan ısıнын homojen şekilde yayılması amacıyla, elektrikli araçlarda genel olarak hava soğutma yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemin tasarımının basit olması, düşük maliyetli olması, bakımının kolaylığı, hafifliği, uzun ömürlü olması, hücre değişiminin kolaylığı ve düşük enerji tüketimi gibi avantajları, havayla soğutmayı tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir.

Hava soğutma yöntemi, zorlanmış taşınımın uygulandığı aktif soğutma ve doğal taşınımın uygulandığı pasif soğutma teknikleriyle gerçekleştirilmektedir. Pasif soğutma, düşük maliyetli, hafif ve basit bir çözüm sunmasına karşın, düşük ısı transfer katsayısı ve yetersiz enerji yoğunluğu nedeniyle yaygın tercih edilmemektedir. Zorlanmış taşınım yöntemiyle yapılan aktif soğutma ise, batarya paketine fan veya kompresör gibi cihazlar yardımıyla basınçlı hava gönderilerek gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin ısı transfer katsayısı doğal taşınıma kıyasla daha yüksek ve daha etkili bir soğutma performansı sunmaktadır. Aktif soğutma, bataryaların termal yönetiminde daha verimli bir çözüm sağlayarak, bataryaların optimum sıcaklık aralığında çalışmasını desteklemekte ve termal kaçak riskini azaltmaktadır (Akinlabi & Solyali, 2020; Chen vd., 2017; Giuliano vd., 2012; Kim vd., 2023; Na vd., 2018; N. T. Tran vd., 2019; W. Wu vd., 2019) .

1.1.2. Isı borulu soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri

Isı boruları, düşük termal direnç, yüksek termal iletkenlik, basit yapı ve düşük ağırlık özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Isı boruları, sağladıkları yüksek ısı transfer performansı sayesinde enerji, havacılık, mikroelektronik, metalurji ve yapı malzemeleri gibi pek çok endüstride ve günlük hayatta sıkça kullanılmaktadır. Isı boruları, değişken tasarım imkanları sayesinde elektrikli araç bataryalarının ideal çalışma

sıcaklığını korumak ve sıcaklığı eşit olarak dağıtmak amacıyla kullanılmaktadır. Havayla soğutma sistemlerinin ani hızlanma ve yüksek hızlarda yetersiz kalması, sıvı soğutma sistemlerinin ise pompa, eşanjör ve depo gibi ek bileşenler gerektirmesi nedeniyle bakımının zor, maliyetinin yüksek ve ağırlığının fazla olması, ayrıca sızıntı riski taşıması, araştırmacıları batarya soğutma çalışmalarında alternatif çözümler aramaya yöneltmiştir. Bu bağlamda, ısı boruları, batarya soğutma sistemlerinde tek başına veya diğer yöntemlerle kombine edilerek kullanılmakta ve bu sayede hem verimlilik hem de güvenlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Rao vd., 2014; Smith vd., 2018; T.-H. Tran vd., 2014; Y. Ye vd., 2015, 2016; W. Zhang vd., 2020; Zhou vd., 2021).

1.1.3. Sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri

Hava soğutma yöntemi, ortam sıcaklığına bağlı olarak bataryayı soğutabilse de, hızdaki ani değişimler ve yüksek hızlarda artan sıcaklık durumlarında tek başına yeterli olmamaktadır. Bu gibi durumlarda, batarya termal yönetiminde daha etkili bir çözüm sunan sıvı soğutma yöntemi tercih edilmektedir. Sıvı soğutma, yüksek ısı transfer katsayısına sahip olması, hızlı şarj/deşarj durumlarında etkinliğini koruyabilmesi ve uzun süreli soğutma performansı sağlaması nedeniyle bataryaların termal yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı soğutma yöntemi, hem bataryanın maksimum sıcaklığını kontrol altında tutması hem de hücreler arasındaki sıcaklık farkını azaltarak bataryanın ömrünü uzatmasıyla ön plana çıkmaktadır. Bu yöntem, batarya hücresinin sıvıyla temasına bağlı olarak iki tipe ayrılmaktadır: direkt temaslı ve dolaylı temaslı sıvı soğutma. Direkt temaslı sıvı soğutma, batarya hücrelerinin soğutucu sıvıyla doğrudan temas ettiği bir yöntemdir ve yüksek ısı transfer verimliliği sunar. Dolaylı temaslı sıvı soğutma ise, batarya hücrelerinin sıvıyla doğrudan temas etmediği, ancak bir ara yüzey aracılığıyla ısının transfer edildiği bir yöntemdir. Batarya hücrelerinin yerleşimi, sıvı soğutma performansı ve sıcaklığın eşit dağılımı için kritik bir faktördür. Bu yöntemde su, mineral yağ, hidrojel, glikol ve sıvı-nano metal bazlı soğutucular tercih edilmektedir. Ancak, suyun donma riskinden dolayı, su-glikol karışımı sıvı soğutucular arasında en yaygın kullanılan seçeneklerden biridir. Bu karışım, düşük sıcaklıklarda donma riskini azaltırken, yüksek sıcaklıklarda da etkili bir soğutma performansı sunmaktadır (Al-Zareer vd., 2019; An vd., 2019; Cen vd., 2018; W. Wu vd., 2019; X. Xu vd., 2019; X.-H. Yang vd., 2016; B. Ye vd., 2019).

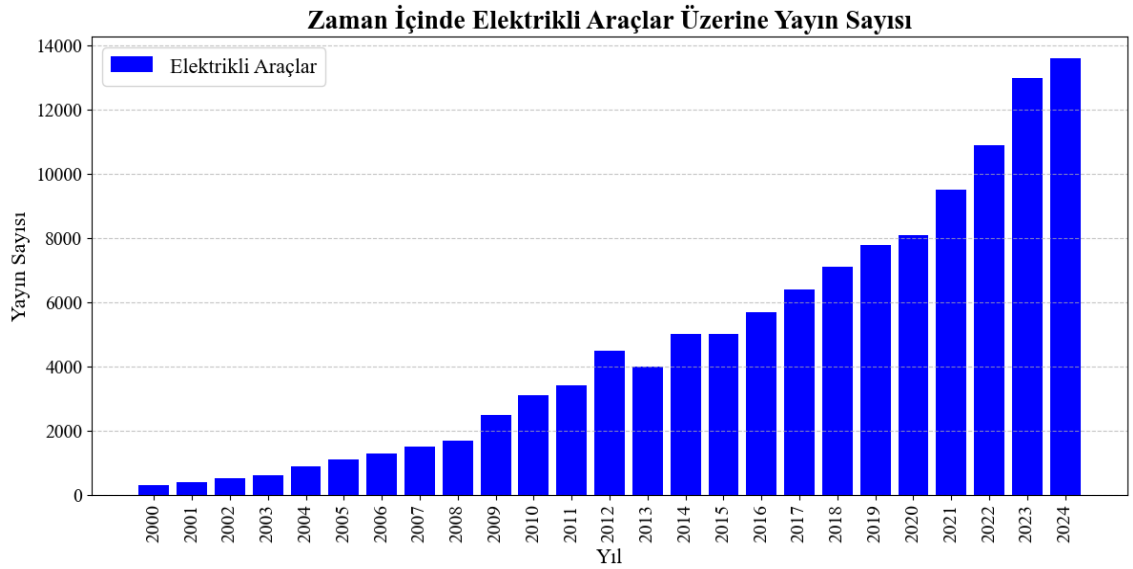
Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için etkin bir BTMS 'ne ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya hücreleri çalışma sırasında iç direnç kaynaklı ısı üretmekte; bu durum, sıcaklık artışına ve hücreler arasında termal dengesizliklere neden olmaktadır. Uygun şekilde tasarlanmamış bir soğutma sistemi, hem batarya performansını düşürmekte hem de termal kaçak riskini artırmaktadır. Bu nedenle, batarya paketlerinde sıcaklığın optimum aralıkta tutulması ve hücreler arası sıcaklık farkının minimum seviyede olması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, elektrikli araç batarya paketlerinde kritik öneme sahip termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu kapsamda, 4 seri 7 paralel dizilimden oluşan toplam 28 adet 18650 silindirik tip lityum-iyon bataryadan meydana gelen, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip bir batarya paketi için dört farklı hücre dizilimi (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) tasarlanmıştır. Her bir dizilim için hava soğutmalı, ısı borulu ve sıvı soğutmalı termal yönetim sistemleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, batarya paketinin optimum çalışma sıcaklığı aralığında (20–40 °C) çalıştırılması ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık homojenliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda farklı soğutma stratejileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, sıcaklık dağılımı, maksimum sıcaklık farkı ve akış davranışına ilişkin veriler değerlendirilmiştir.

Çalışmanın özgünlüğü, farklı soğutma yöntemlerinin farklı hücre dizilimine sahip batarya paketlerinin yapısı üzerinde, eşit sınır koşulları altında hem deneysel hem de sayısal olarak karşılaştırmalı biçimde analiz edilmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece, her bir dizilim için en uygun soğutma yöntemi belirlenmiş; elde edilen sonuçlar, batarya paketlerinin termal yönetim tasarımı ve optimizasyonuna yönelik önemli bilimsel ve mühendislik çıktıları sunmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araç teknolojisi üzerine yapılan akademik çalışmaların yıllara göre değişimi incelendiğinde, 2000 yılından itibaren sürekli olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu artışın, literatürde elektrikli araçlara yönelik ilginin zaman içerisinde nasıl geliştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 2.1’de yıllara göre elektrikli araçlarla ilgili yapılan yayın sayıları verilmiştir.

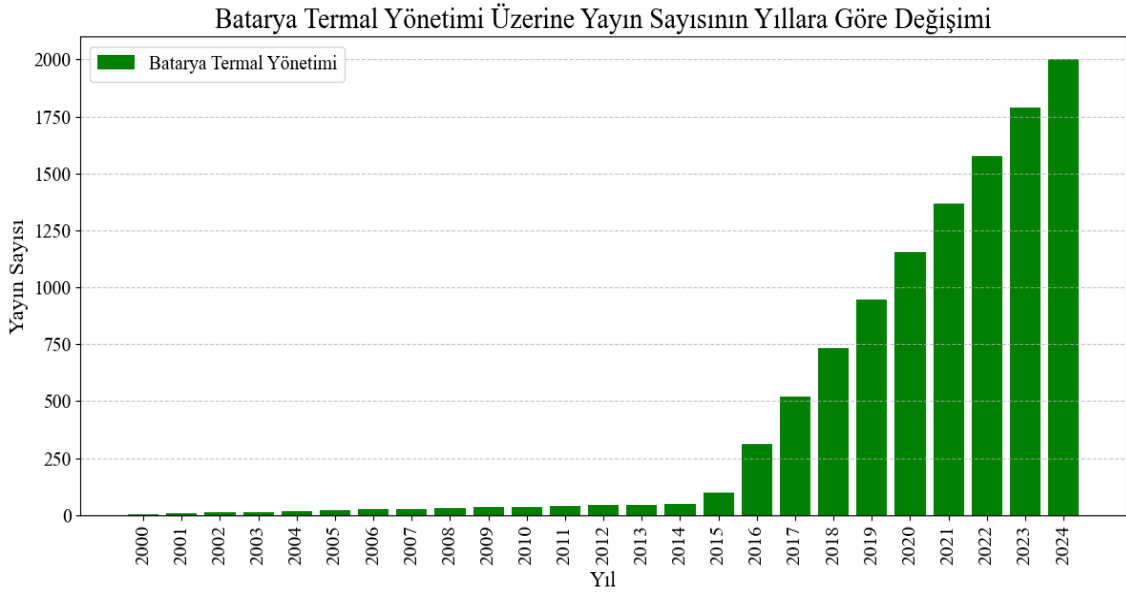


Şekil 2.1. Elektrikli araçlara yönelik yapılan yayın çalışmaları, 2000-2024 (kaynak: Scopus; anahtar kelime elektrikli araçlar; tarih: 13 Mart 2025)

Elektrikli araçlar ile ilgili 2000 yılında yalnızca 409 çalışma yapılmışken, 2024 yılına gelindiğinde bu sayı 13.645’e ulaşmıştır. Bu durum, elektrikli araçların yalnızca bir ulaşım aracı olarak değil, aynı zamanda enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından da önemli bir araştırma alanı haline geldiğini göstermektedir. Özellikle 2010 yılından sonra yayın sayılarında dikkat çekici bir ivmelenme yaşanmıştır. Bunun temel nedenleri arasında küresel ölçekte artan çevre sorunları, fosil yakıt kullanımının azaltılması gerekliliği, devlet teşvikleri, batarya teknolojilerindeki gelişmeler ve elektrikli araçların ticari pazarda yaygınlaşması yer almaktadır. Sonuç olarak, 2000 yılından 2024 yılına kadar elektrikli araçlarla ilgili yayın sayısındaki artış, elektrikli araç

teknolojilerinin gelecekte de disiplinler arası çalışmaların merkezinde yer alacağını ve bilgi birikiminin hızla büyümeye devam edeceğini göstermektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli çalışabilmesi için sıcaklıklarının belirli aralıkta tutulması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen BTMS, batarya hücrelerinin sıcaklık dağılımını kontrol ederek hem performansı artırmakta hem de termal kaçak riskini azaltmaktadır. Şekil 2.2 'de tipik bir BTMS üzerine yapılan akademik çalışmalar gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Batarya termal yönetim sistemlerine ilişkin yapılan yayın çalışmaları (2000-2024)
(kaynak: Scopus; anahtar kelime batarya termal yönetimi; tarih: 15 Mart 2025)

2000–2024 yılları arasında bilim insanları tarafından BTMS üzerine toplam 9.146 çalışma yürütülmüş olup, bu çalışmaların yaklaşık %95’i son on yılda gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Bu durum, batarya termal yönetiminin son yıllarda elektrikli araç araştırmalarında stratejik bir öncelik haline geldiğini göstermektedir. Elektrikli araçların tasarım sürecinde, güvenliği sağlamak ve bataryalarda oluşan ısının hızlı ve kontrollü bir şekilde dağıtılmasını temin etmek için üreticilerin etkin ve verimli bir BTMS tercih etmesi kritik bir gerekliliktir. Bu nedenle literatürde BTMS, kullanılan soğutma stratejilerine göre hava soğutmalı, sıvı soğutmalı, faz değişimli malzeme (PCM) tabanlı ve ısı borulu sistemler şeklinde sınıflandırılmakta ve farklı yöntemlerin avantajları ile sınırlılıkları üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

Hava soğutma yöntemi ile ilgili olarak, araştırmacılar batarya soğutma performansını artırmak ve sıcaklık dağılımını optimize etmek amacıyla çok sayıda simülasyon ve deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları (F. Zhang vd., 2021), 5x5 düzeninde 25 adet 18650 silindirik lityum iyon bataryayı kullanarak hücre sıcaklıklarını azaltmayı ve homojenliği artırmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada, farklı hava giriş hızları (1-4 m/s) ve deşarj oranlarında (1C-3C), havalandırma deliklerinin sayısı, boyutu ve konumunun soğutma performansına etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics – CFD) yöntemiyle incelenmiştir. Havalandırma deliklerinin giriş-çıkış kombinasyonları 1 giriş - 1 çıkış (1g-1ç) ile 4 giriş - 4 çıkış (4g-4ç) arasında değişen çeşitli düzenlerde test edilmiştir. Sonuçlar, havalandırma deliklerinin sayısının artırılmasının soğutma performansını iyileştirdiğini ve 1 giriş - 4 çıkış (1g-4ç) kombinasyonunun en iyi sonucu verdiğini göstermiştir ($T_{max} = 36,596\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3,381\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kenarların alt köşelerindeki çıkışların daha etkili soğutma ve homojenlik sağladığı, ancak batarya hücrelerinin düzensiz yerleştirilmesinin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, 3C deşarj oranında 2 m/s hava giriş hızında batarya sıcaklığının $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında tutulabileceği, ancak hava akış hızının artırılmasının soğutma performansında anlamlı bir fark yaratmadığı görülmüştür.

Singh ve arkadaşları (Singh vd., 2021), 18650 silindirik tip lityum iyon bataryaları kullanarak, hava giriş hızının, hücre sayısının ve hücre dizilişinin zorlanmış hava taşınımı ile soğutma üzerindeki etkilerini elektrokimyasal-termal modelleme yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmada, hücre sayısı 2'den 48'e kadar artırılmış, hücreler satır içi ve kademeli olarak düzenlenmiş, hava giriş hızları ise 0,1 m/s, 0,2 m/s ve 0,4 m/s olarak test edilmiştir. Sonuçlar, kritik hücre sayısının 8 olduğunu ve bu sayının üzerine çıkıldığında sıcaklık farkının sabitleme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Hava akış hızının artırılması, batarya yüzeyinden ısının daha etkili bir şekilde tahliye edilmesini sağlarken, hücre sayısının 8'in üzerine çıkmasının soğutma verimliliği üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışma, batarya paketinde hücre sayısı ve hava akış hızının soğutma performansı üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

Yu ve arkadaşları (Yu vd., 2022), 16 adet 18650 silindirik lityum iyon bataryayı 4x4 düzeninde dizerek bir batarya paketi oluşturmuş ve giriş-çıkış kesit alanlarının batarya paketinin sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, hava bataryaların üstünden ve arkasından girip önden ve alttan çıkacak şekilde yönlendirilmiştir ($Re = 400$). Sonuçlar, bataryaların sıcaklıklarının farklı olduğunu ve

ortadaki bataryaların daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğunu göstermiştir. Giriş kesit alanının artırılması, batarya hücreleri arasındaki hava akışını artırarak batarya hücrelerinin sıcaklığını, maksimum ve ortalama çıkış sıcaklıklarını düşürmüştür. Buna karşılık, hava çıkış kesit alanındaki artışın batarya hücrelerinin çıkış sıcaklığı üzerinde çok az bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, batarya soğutma performansında giriş kesitindeki değişimlerin, çıkış kesitindeki değişimlere kıyasla daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Hai ve arkadaşları (Hai vd., 2022), 16 adet 18650 silindirik lityum iyon bataryayı kare şeklinde bir laminer hava akış kanalına hizalanmış ve rastgele dizilimlerde yerleştirerek, farklı hava giriş hızlarının (0,3-0,6-0,9 m/s) soğutma üzerindeki etkilerini incelemiştir. 2000 saniyelik bir süre boyunca gerçekleştirilen çalışmada, ortadaki batarya hücrelerinin kenardaki hücrelere göre daha yüksek sıcaklıkta olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, hizalanmış dizilimin rastgele dizilime kıyasla daha düşük ortalama sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir. Hava akış hızının, belirli bir değere ulaşıncaya kadar batarya hücrelerindeki maksimum ve ortalama sıcaklık üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı da tespit edilmiştir. Bu çalışma, batarya diziliminin sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve hizalanmış dizilimin soğutma performansını artırdığını göstermiştir.

Isı borulu soğutma yöntemi üzerine, araştırmacılar ve firmalar batarya soğutma performansını iyileştirmek, sıcaklık kontrolünü optimize etmek ve güvenliği artırmak amacıyla birçok simülasyon ve deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Alihosseini ve Shafae (Alihosseini & Shafae, 2021), prizmatik tip 18 adet bataryadan oluşan bir termal yönetim sistemi tasarlamak amacıyla, bataryalar arasına yerleştirdikleri alüminyum levhalardan bakır ısı boruları geçirerek bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, ısı borusundan alınan ısıнын su kanalları yardımıyla taşındığı ve doğal taşınım ile zorlanmış taşınımın etkileri farklı ortam sıcaklıklarında (-10 °C ile 60 °C) incelenmiştir. Sonuçlar, ortam sıcaklığının bataryaların termal performansı ve sıcaklık homojenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Zorlanmış taşınımın, ısı borusunun düşük ısı direnci sayesinde batarya sıcaklığını optimum aralıkta tutmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Örneğin, ortam sıcaklığı 18 °C olduğunda batarya sıcaklığı 18-26 °C arasında, 28 °C olduğunda 28-33 °C arasında ve 33 °C olduğunda 33-35 °C arasında tutulabilmektedir. Çalışma, zorlanmış taşınım ile kullanılan ısı borularının batarya soğutma performansını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Ren ve arkadaşları (Ren vd., 2021), prizmatik tipte 6 seri bağlı lityum iyon bataryanın soğutulması için U şekilli mikro ısı borusu kullanarak aktif ve pasif hava soğutma yöntemlerini, ısı borusu olmaksızın pasif hava soğutma ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, hava hacmi, ortam sıcaklığı ve farklı şarj/deşarj hızlarının soğutma performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, U şekilli ısı borulu aktif soğutma sisteminin en iyi soğutma performansını sağladığını (maksimum sıcaklık 38,08 °C), ısı borusuz pasif soğutmanın ise en kötü performansa sahip olduğunu (maksimum sıcaklık 42,14 °C) göstermiştir. En iyi sıcaklık homojenliği ısı borusuz pasif soğutma ile sağlanırken, en kötü homojenlik ısı borulu aktif soğutma sisteminde gözlemlenmiştir. Hava hacminin artması, fanların güç tüketimini artırırken sıcaklık homojenliğini olumsuz etkilemiştir. Çalışma, ısı borusunun batarya sıcaklığını düşürmede etkili olduğunu ve aktif soğutmalı sistemlerin tümdeşarj hızlarında (1C-3C-5C) başarılı bir şekilde kullanılabildiğini ortaya koymuştur. Ancak, darbeli yüksekdeşarj koşullarında pasif soğutma sistemlerinin yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hava soğutma ve ısı borusu sistemlerinin hibrit olarak kullanılabileceğini ve aktif soğutmanın yüksek performans gerektiren durumlarda daha etkili olduğunu göstermiştir.

Jang ve arkadaşları (Jang vd., 2022), seri bağlı 10 prizmatik bataryadan oluşan bir batarya paketinde, mini kanallı sıvı soğutma ile iki farklı tipte tasarlanan ısı borusunu birleştirerek hibrit bir soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, A tipi ısı borusunun bataryanın yanlarında, B tipi ısı borusunun ise hem yanlarda hem de bataryanın altında yer aldığı sistemler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, B tipi ısı borusunun daha fazla temas alanı sayesinde yüksekdeşarj hızlarında ve büyük sıvı akış hızlarında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. 1Cdeşarj hızında, suyun giriş ve ortam sıcaklığı 20 °C, kütle akış hızı 500 kg/h olduğunda, doğal taşınım ile yapılan soğutmada batarya sıcaklığı 35,7 °C'ye ulaşırken, sıvı soğutma ve hibrit sistemlerde sıcaklık 23,2 °C'nin altında kalmıştır. 2Cdeşarj hızında, doğal taşınım ile yapılan soğutmada sıcaklık 52,2 °C'ye çıkarken, diğer soğutma yöntemlerinde 30 °C'nin altında tutulmuştur. Ayrıca, sıvı soğutmada bataryanın alt bölgesinde sıcaklık daha yüksekken, hibrit sistemde alt bölgenin sıcaklığı daha düşük bulunmuştur. Homojen sıcaklık dağılımı açısından B tipi ısı borulu sistemin A tipine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Çalışma, hibrit sistemlerin sıcaklık homojenliğini artırmada etkili olduğunu vedeşarj oranının sıcaklık üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Yang ve arkadaşları (W. Yang vd., 2023), petek tipi altıgen tasarıma sahip 37 adet 18650 silindirik bataryadan oluşan 24 modüllük bir batarya sisteminin soğutulması için, havayı eşit şekilde dağıtmak amacıyla örümcek ağı ve petek yapısından esinlenerek bir hava dağıtım plakası tasarlamışlardır. Ayrıca, bataryalar arasına farklı tipte biyotik ısı emiciler yerleştirilerek soğutma verimliliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada, farklı hava giriş hızları (8-14 m/s) ve çeşitli ısı emici tasarımları test edilmiştir. Sonuçlar, hava dağıtım plakasının kullanılmasıyla hava akışının eşit şekilde dağıldığını, maksimum sıcaklığın 41,9 °C'den 39,8 °C'ye düştüğünü ancak sıcaklık farkının biraz arttığını göstermiştir. Isı emiciler, maksimum sıcaklığı daha da düşürerek soğutma performansını artırmıştır. En iyi performans, farklı yüksekliklere sahip 10 adet biyotik ısı emicinin kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Hava akış hızının artması maksimum sıcaklığı azaltırken sıcaklık farkını artırmıştır. Çalışma, plaka genişliğinin ayarlanması ve biyotik ısı emicilerin kullanılmasıyla sıcaklık homojenliğinin sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Zhang ve arkadaşları (Q. Zhang vd., 2023), 15 prizmatik lityum iyon bataryayı soğutmak için buharlaşmalı soğutma ve düz ısı borularını birleştiren kanatçıklı bir hibrit soğutma sistemi tasarlamış ve bunu kanatçıksız ve kanatçıklı hava soğutma sistemleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmada, 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında farklı soğutma sistemlerinin performansı incelenmiştir. 1C deşarj hızında maksimum sıcaklıklar, kanatçıksız hava soğutmada 37,44 °C, kanatçıklı hava soğutmada 29,83 °C ve kanatçıklı sıvı soğutmada 16,93 °C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık homojenliği açısından en iyi sonucu kanatçıksız hava soğutma vermiştir. 2C deşarj hızında maksimum sıcaklıklar sırasıyla 48,98 °C, 39,45 °C ve 26,07 °C olup, sıcaklık homojenliğini en iyi sağlayan sistem kanatçıklı sıvı soğutma olmuştur. 3C deşarj hızında ise maksimum sıcaklıklar 57,21 °C, 48,91 °C ve 36,27 °C olarak ölçülmüştür. Kanatçıklı hava soğutma sistemi sıcaklık homojenliğini en iyi şekilde sağlasa da maksimum sıcaklık kontrolünde yetersiz kalmış, bu nedenle kanatçıklı sıvı soğutma sistemi daha etkili bulunmuştur.

Sıvı soğutma yöntemi üzerine, araştırmacılar ve firmalar batarya soğutma performansını artırmak, sıcaklık kontrolünü optimize etmek ve güvenliğini sağlamak amacıyla Çeşitli simülasyonlar ve deneyler gerçekleştirmişlerdir.

Tan ve arkadaşları (Tan vd., 2021), 32 paralel ve 160 seri silindirik lityum iyon bataryadan oluşan bir batarya paketini soğutmak için hidrofloroeter soğutucu akışkanını kullandıkları doğrudan temaslı bir sıvı soğutma sistemi üzerinde çalışmışlardır. Farklı akış hızları (1,25-50 mm/s), akış yolu yükseklikleri (10-65 mm), kanal katman sayıları (1-6) ve paralel-zıt akış tasarımlarının soğutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, soğutucu akışkan hızının soğutma performansı ve parazitik güç tüketimi açısından kritik olduğunu, akış yolu yüksekliğinin ise enerji yoğunluğu ve soğutma verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Çok katmanlı ve çapraz akış tasarımlarının sıcaklık homojenliğini iyileştirdiği ve maksimum sıcaklığı azalttığı, ancak çok katmanlı yapının etkisinin sınırlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sıvı soğutmanın hava soğutmaya göre %25,1 daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve daha etkili bir soğutma sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, doğrudan sıvı soğutma sistemlerinde sıvı sızıntısının önemli bir sorun olduğu vurgulanmıştır.

Tete ve arkadaşları (Tete vd., 2022), 5x5 dizilimde seri ve paralel bağlı 25 adet 18650 silindirik lityum iyon bataryadan oluşan bir sistemi, suyu soğutucu akışkan olarak kullanarak farklı deşarj hızlarında soğutmayı incelemişlerdir. Çalışmada, soğutucu akışkanın hızı, soğutucu kanalın şekli, boyutu ve kanal sayısının soğutma verimliliği üzerindeki etkileri simülasyonlarla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, maksimum sıcaklığın batarya paketinin merkezinde biriktiğini ve soğutma sıvısının uygulanmasıyla sabit sıcaklık elde edildiğini göstermiştir. Deşarj oranının artmasıyla batarya sıcaklığının arttığı, 5C deşarj hızında en yüksek batarya hücresi sıcaklığının 62,626 °C ile paket merkezinde olduğu belirlenmiştir. Soğutma sırasında maksimum sıcaklık, 0,5C deşarj hızında 25,038 °C, 5C deşarj hızında ise 27,894 °C olarak ölçülmüştür. Çalışma, soğutma sıvısının havayla yapılan soğutmadan daha etkili olduğunu ve bataryaların birleştirilmesinde kullanılan yaylı konektörlerin ve baraların tutuculara göre daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Xu ve arkadaşları (J. Xu vd., 2022), 52 mm x 147 mm x 98 mm boyutlarında prizmatik tip lityum iyon bataryalardan oluşan, seri bağlı 2 bataryanın soğutulmasında dikdörtgen, kesikli dikdörtgen, genişleyen ve Z tip kanallara sahip 4 farklı sıvı akrilik plakanın kullanıldığı bir soğutma sistemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, farklı şarj/deşarj oranları (1C-2C), soğutma suyunun akış hızları (6-30 lt/sa) ve giriş sıcaklıkları (15-25 °C) incelenmiştir. Sonuçlar, Z tipi plakanın en iyi sıcaklık homojenliğini sağladığını ancak soğutma etkisinin sınırlı olduğunu ($T_{max} = 35$ °C), girişte iki taraftan daraltılmış plakanın ise en kötü sıcaklık homojenliği ve soğutma etkisine sahip olduğunu

($T_{max} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$) göstermiştir. Petek tipli ve bir taraftan daralan plakaların en iyi soğutma etkisini sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, soğutma suyunun akış hızının artmasının sıcaklık homojenliğini ve harcanan gücü artırdığı, ancak soğutma verimliliği faktörünü azalttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, sıvı soğutma sistemlerinin yüksek deşarj oranlarında daha uygun olduğunu ve soğutma sıvısının giriş sıcaklığı ile debisinin bataryaların maksimum sıcaklığı ve homojenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, batarya hücresine temas eden plakanın yüzey alanının sıcaklık homojenliği üzerinde kritik bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Jahanbakhshi ve arkadaşları (Jahanbakhshi vd., 2022), prizmatik lityum iyon bataryaları soğutmak için bakırdan yapılmış dalgalı mikrokanal ve mikrotüplerden oluşan bir sistemde, soğutucu akışkan olarak gümüş nanoparçacıklar karıştırılmış su/etilen glikol çözeltisini kullanmışlardır. Çalışmada, farklı Reynolds sayıları (300, 500, 700, 1000, 1500), nanoparçacık oranları ($\Phi = \%0, \%0,1, \%0,5, \%1$) ve deşarj hızları (1C, 2C, 4C, 5C) incelenmiştir. Sonuçlar, nanoakışkanın yüksek ısı transfer katsayısı sayesinde bataryayı etkili bir şekilde soğuttuğunu ve sistemin bataryanın soğuma hızını artırdığını göstermiştir. Reynolds sayısının artması ve nanoparçacık oranının azalmasıyla sıcaklık homojenliğinin iyileştiği, zıt yönlü akışın ise paralel akışa göre daha dengeli bir sıcaklık dağılımı elde edildiği tespit edilmiştir. Deşarj sonrası sıcaklıklar, 1C’de $32,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2C’de $37,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4C’de $47,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 5C’de $53,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Çalışma, Reynolds sayısı, nanoparçacık oranı, akış yönü ve deşarj hızının batarya sıcaklığı ve homojenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Ren ve arkadaşları (Ren vd., 2023), prizmatik tip lityum iyon bataryaların soğutulmasında, su bazlı ve çok kanallı yassı borulara sahip bir sıvı soğutma sistemini pasif soğutma yöntemiyle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, soğutucu akışkanın hızının, giriş sıcaklığının ve şarj-deşarj oranlarının soğutma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, pasif soğutmanın düşük şarj-deşarj oranlarında yeterli olduğunu, ancak yassı kanalların kullanıldığı sıvı soğutma sisteminin batarya sıcaklığını daha etkili bir şekilde düşürdüğünü, buna karşın sıcaklık homojenliğini tam olarak sağlayamadığını göstermiştir. Soğutucu akışkanın giriş hızındaki değişikliklerin soğutma üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu, ancak giriş sıcaklığının düşürülmesinin bataryanın maksimum sıcaklığını azalttığı, buna karşın homojenliği olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Araştırmada, ortam sıcaklığı $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’den $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye yükseldiğinde maksimum sıcaklığın $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu, ancak sıvı soğutma ile ortam sıcaklığı $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğunda maksimum sıcaklığın $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 0,5C

şarj/deşarj döngüsünde sıvı soğutmaya gerek olmadığı, 1C şarj/deşarj döngüsünde ise ortam sıcaklığı 35 °C'nin üzerinde olduğunda sıvı soğutmanın gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma, sıvı soğutmanın hava soğutmaya göre daha etkili ve homojen bir soğutma sağladığını, ancak akış hızının soğutma üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymuştur.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, hava soğutma yöntemi üzerine yapılan çalışmalarda, araştırmacıların büyük çoğunluğu bu yöntemin düşük maliyetli, yapısal olarak basit ve güvenli olması nedeniyle batarya termal yönetiminde uygun bir seçenek olduğu konusunda hemfikirdir. Zhang vd. (2021), Singh vd. (2021), Yu vd. (2022) ve Hai vd. (2022) gibi araştırmacılar, hava giriş hızının ve akış yönlendirmesinin batarya sıcaklığını azaltmada önemli rol oynadığını, ancak belirli bir hızın ötesinde hava debisinin artmasının soğutma performansında anlamlı bir iyileşme sağlamadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarda ayrıca, batarya dizilim geometrisinin ve hava giriş-çıkış konfigürasyonlarının sıcaklık homojenliği üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, farklı dizilimlerin (örneğin hizalı, rastgele, kare veya çoklu giriş-çıkış yapılarının) karşılaştırıldığı çalışmaların sonuçları arasında tutarsızlıklar bulunmaktadır. Örneğin, Zhang vd. (2021) çoklu çıkışlı sistemlerin soğutma performansını artırdığını belirtirken, Singh vd. (2021) hücre sayısının artışının belirli bir noktadan sonra sıcaklık farkını değiştirmediğini ifade etmiştir. Bu durum, hava soğutmalı sistemlerde optimum hava akışı ve dizilim tasarımının hâlâ tartışmalı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, literatürde çok parametrelili analizlerin sınırlı olduğu, genellikle tek bir değişkenin (hava hızı, dizilim veya fan yönü gibi) incelendiği ve enerji tüketimi, basınç düşümü veya fan yerleşimi gibi mühendislik kriterlerinin çoğunlukla göz ardı edildiği görülmektedir.

Isı borulu soğutma yöntemi çalışmalarında ise genel bir konsensus, ısı borularının yüksek ısı iletim kabiliyeti sayesinde batarya sıcaklığını etkili şekilde düşürdüğü yönündedir. Alihosseini & Shafaei (2021) ve Ren vd. (2021), ısı borularının özellikle zorlanmış taşınım koşullarında batarya sıcaklığını daha dar bir aralıkta tutabildiğini göstermiştir. Ancak, bazı araştırmalar sıcaklık homojenliği açısından çelişkili sonuçlar ortaya koymuştur. Örneğin, Ren vd. (2021) ısı borulu aktif soğutmanın en düşük maksimum sıcaklığı sağladığını, fakat sıcaklık dağılımının daha dengesiz olduğunu raporlamıştır. Bu, ısı borularının etkinliğinin yerleşim yönü, temas alanı ve kullanılan akışkan tipine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Sıvı soğutma yöntemi ile ilgili araştırmalarda ise genel kanı, sıvı soğutmanın hava soğutmaya kıyasla daha etkili bir ısı transferi sağladığı yönündedir. Tan vd. (2021), Tete

vd. (2022), Xu vd. (2022), Jahanbakhshi vd. (2022) ve Ren vd. (2023) gibi araştırmacılar, sıvı akış hızının, kanal tasarımının ve akış yönünün batarya sıcaklığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, bazı çalışmalar sıvı hızının artmasının homojenliği olumsuz etkileyebileceğini veya enerji tüketimini artırabileceğini de belirtmiştir. Ayrıca, doğrudan sıvı temasıyla yapılan soğutma sistemlerinde sızıntı riski ve güvenlik problemleri önemli bir dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, farklı kanal geometrilerinin (Z tipi, petek tipi, dalgalı mikrokanal vb.) sıcaklık homojenliği üzerindeki etkileri incelenmiş olsa da, bu sistemlerin uzun süreli kararlılığı, pompa gücü tüketimi ve ağırlık etkisi gibi mühendislik parametrelerinin yeterince değerlendirilemediği görülmektedir.

Bu kapsamda literatürdeki temel eksiklik, hava, ısı borulu ve sıvı soğutma sistemlerinin çoğunlukla birbirinden bağımsız olarak incelenmiş olmasıdır. Çalışmaların büyük bir kısmı yalnızca tek tip soğutma yöntemine odaklanmış; farklı soğutma tekniklerinin aynı batarya diziliminde, aynı sınır koşulları altında karşılaştırmalı olarak analiz edildiği araştırmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu durum, farklı yöntemlerin etkinliğini nesnel biçimde kıyaslamayı zorlaştırmakta ve optimum termal yönetim stratejisinin belirlenmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada hava soğutmalı, ısı borulu ve sıvı soğutmalı sistemler; üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli olmak üzere dört farklı batarya diziliminde karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Her bir yöntem, aynı ısı yük ve sınır koşulları altında değerlendirilerek, sıcaklık dağılımı, maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve akış davranışı açısından performans farklılıkları ortaya konacaktır. Böylece her yöntemin avantajları ve sınırlamaları bütüncül bir yaklaşımla analiz edilecektir.

Bu araştırmanın temel hipotezleri şu şekildedir:

- Geometrik dizilim etkisi: Geometrik dizilim, akış yönünü ve ısı dağılımını doğrudan etkileyerek sıcaklık homojenliğini belirler. Hücrelerin düzenlenme biçimi, hava veya akışkanın batarya yüzeyleriyle etkileşimini ve dolayısıyla soğutma etkinliğini önemli ölçüde değiştirmektedir.
- Çıkış fanı etkisi: Çıkış fanı kullanımı, özellikle merkez bölgelerdeki sıcaklık birikimini azaltarak hava soğutmalı sistemlerin verimini artırır. Bu sayede, paket genelinde daha dengeli bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi hedeflenmektedir.
- Isı borulu ve sıvı soğutma sinerjisi: Isı borulu ve sıvı soğutmalı sistemlerin karşılaştırmalı kullanımı, maksimum sıcaklık kontrolü ve sıcaklık homojenliği

açısından önemli avantajlar sağlar. Bu yöntemler, hava soğutmaya kıyasla daha kararlı ısıl denge sunarak performansı artırabilir.

- Enerji–performans dengesi: Farklı soğutma yöntemleri, enerji tüketimi ve soğutma performansı arasında mühendislik açısından optimize edilebilir bir denge oluşturur. Bu denge, sistemin hem verimli hem de ekonomik çalışmasını sağlayan temel kriterdir.

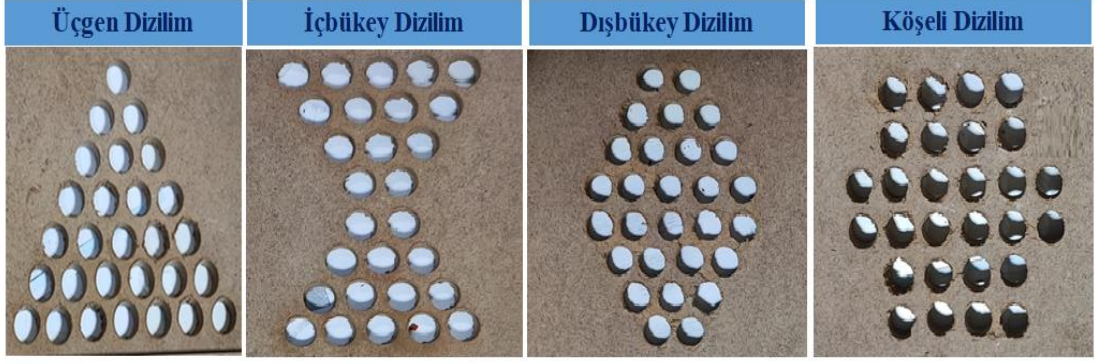
Bu hipotezler doğrultusunda yapılacak deneysel ve sayısal analizlerle, her soğutma yönteminin performansı detaylı biçimde değerlendirilecek ve elde edilen sonuçlar, batarya termal yönetim sistemlerinin gelecekteki tasarımlarına yönelik yeni mühendislik önerileri sunacaktır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, elektrikli araç batarya paketlerinde kritik öneme sahip termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu kapsamda, 4 seri 7 paralel dizilimden oluşan toplam 28 adet 18650 silindirik tip lityum iyon bataryadan meydana gelen 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip batarya modülü için dört farklı dizilim (eşkenar üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) kullanılarak hava soğutmalı, ısı borulu ve sıvı soğutmalı termal yönetim sistemlerinin performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, batarya paketinin optimum çalışma sıcaklığı aralığında çalıştırılması ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık homojenliğinin sağlanması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, farklı soğutma stratejileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve BTMS'nin tasarım ve optimizasyonunda kullanılabilecek önemli veriler elde edilmiştir.

Batarya hücreleri, sistem dizaynının yapılabilmesine olanak sağlayan minimum alan dikkate alınarak 200 x 200 mm boyutlarında iki plaka arasına yerleştirilmiştir. Her batarya diziliminde, üstte yer alan plaka üzerinde ilgili hücre dizilimine (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) uygun olarak delikler açılmış ve hücrelerin montajı bu delikler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir dizilime ait delik yerleşimleri ve hücre montaj düzenleri Şekil 3.1.'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Üçgen dizilimde, delikler simetrik ve sık aralıklarla yerleştirilmiştir. İçbükey dizilimde, delikler merkeze yakın ve kademeli bir düzende açılmıştır. Dışbükey dizilimde delikler daha çok plakanın kenarlarına yakın konumlandırılmış; köşeli dizilimde ise hücrelerin yerleşim açılarına göre delikler köşe bölgelerine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu yapı sayesinde batarya paketlerinin güvenli bir şekilde monte edilmesi sağlanmış ve termal yönetim performansının analiz edilebilmesi için uygun bir test ortamı oluşturulmuştur. Hücre paketlerine yapısal destek sağlamak amacıyla, bu plakalar 400 mm uzunluğa ve 200 mm genişliğe sahip alt destek plakaları üzerine monte edilmiştir. Plaka ile alt destek plakası arasına, 2,5 x 3,5 x 3 mm boyutlarında U şeklinde metal profiller yerleştirilerek yapı güçlendirilmiştir. Bu profiller, hem mekanik dayanıklılığı artırmakta hem de batarya hücrelerinin sabit ve güvenli bir şekilde konumlandırılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.1. Batarya hücreleri dizilim plakaları

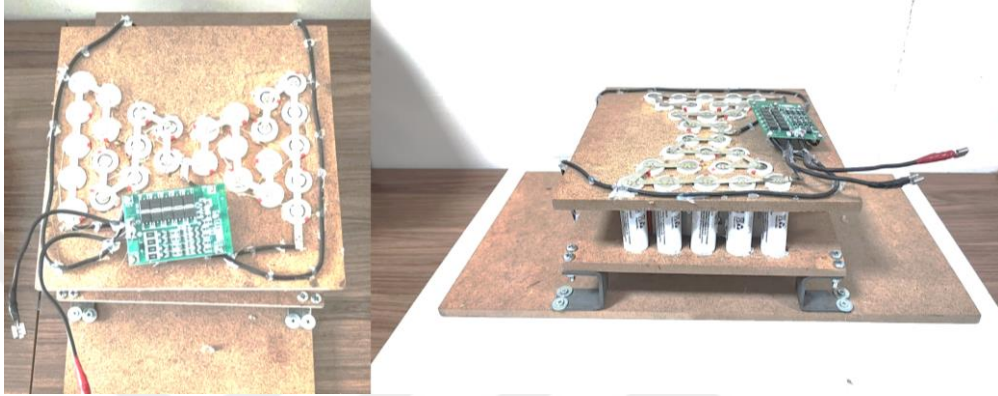
Üçgen dizilimde (Şekil 3.2.), bataryalar plaka üzerinde kompakt bir şekilde yerleştirilmiş olup, merkezler arasındaki mesafeler optimize edilmiştir. Uç noktadaki bataryaların merkezleri arasındaki mesafe 150 mm, iki bataryanın merkezi arasındaki mesafe ise 25 mm olarak belirlenmiştir. Bataryalar, plakanın geometrik merkezine göre simetrik bir şekilde yerleştirilmiş ve üçgen formu oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenleme, bataryaların daha sıkı bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanıyarak alan tasarrufu sağlamış ve elektriksel bağlantıların daha kısa mesafelerde yapılmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, kompakt tasarım, mekanik dayanıklılığı artırırken güvenli çalışma koşullarını desteklemiştir. Üçgen dizilim, hem alan verimliliği hem de termal yönetim açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.



Şekil 3.2. Üçgen dizilime sahip alt plakalı batarya paketi

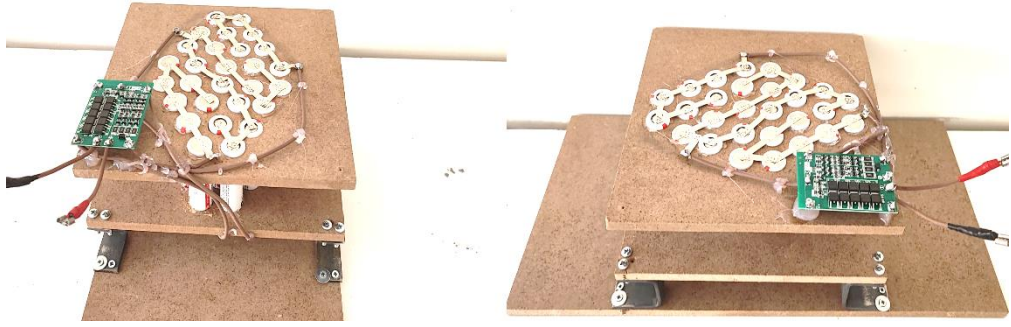
İçbükey dizilimde (Şekil 3.3.), bataryalar plakanın geometrik merkezine doğru eğimli bir şekilde yerleştirilmiştir. Alt kısımda yer alan bataryalar düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, ilk sıradaki bataryaların merkezleri plakanın alt kenarından 22,5 mm, yan kenarlardan ise 50 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır. İki batarya arası mesafe yatayda 25 mm ve ortaya doğru eşkenar üçgen oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. Üst

kısımda yer alan bataryalar ise alt kısımdaki düzenle simetrik olacak şekilde yerleştirilmiş, ancak üst kısma doğru ilerledikçe bataryaların merkezleri plakanın geometrik merkezine doğru konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, bataryaların kompakt bir şekilde yerleştirilmesini sağlarken, elektriksel bağlantıların daha kısa tutulmasına olanak tanıyarak direnç kayıplarını azaltır. Ayrıca, bu yapı termal yönetimi iyileştirerek alan tasarrufu sağlamakta ve mekanik dayanıklılığı artırmaktadır.



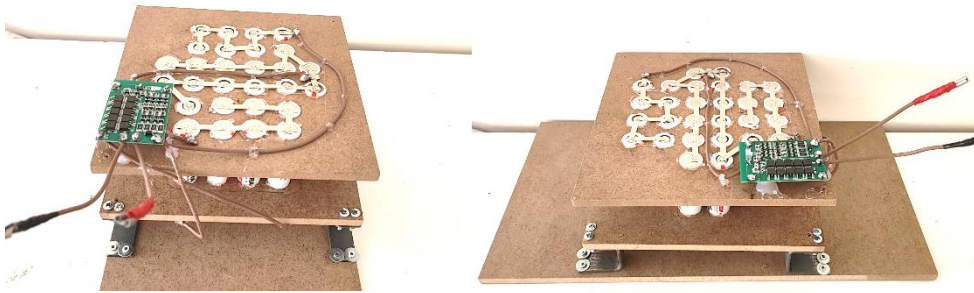
Şekil 3.3. İbükey dizilime sahip alt plakalı batarya paketi

Dışbükey dizilimde (Şekil 3.4.), bataryaların merkezleri plakanın dış kenarlarına doğru eğimli bir şekilde yerleştirilmiştir. Alt kısımda yer alan bataryalar düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, ilk sıradaki bataryaların merkezleri plakanın alt kenarından 22,5 mm, yan kenarlardan ise 87,5 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır. İki batarya arası mesafe yatayda 25 mm ve dışa doğru eşkenar üçgen oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. Üst kısımda yer alan bataryalar, alt kısımdaki düzenle simetrik olacak şekilde yerleştirilmiş, ancak üst kısma doğru ilerledikçe bataryaların merkezleri plakanın dış kenarlarına doğru konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, bataryalar arasında daha geniş bir mesafe sağlayarak ısı dağılımını optimize etmekte ve termal yönetimi iyileştirmektedir. Ayrıca, bataryaların dış kenarlara doğru yayılması, ısı birikimini önleyerek daha güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Bu dizilim, özellikle yüksek sıcaklık altında çalışan batarya paketlerinde termal güvenlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Dışbükey dizilime sahip alt plakalı batarya paketi

Köşeli dizilimde (Şekil 3.5.), bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, merkezler arasındaki mesafeler yatay ve dikey olarak 25 mm olarak optimize edilmiştir. Bataryalar, plakanın dört kenarına paralel bir şekilde yerleştirilmiş ve plakanın geometrik merkezine göre simetrik bir düzen sağlanmıştır. İlk sıradaki bataryaların merkezleri, plakanın alt kenarından 37,5 mm, yan kenarlardan ise 37,5 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Üst sıralara doğru ilerledikçe, bataryalar düzenli bir şekilde yerleştirilmiş ve plakanın üst kenarına kadar simetrik bir şekilde devam etmiştir. Bu düzenleme, bataryaların mekanik olarak dengeli bir şekilde yerleştirilmesini sağlarken, elektriksel bağlantıların düzenli ve kısa mesafeli bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, bataryalar arasında eşit mesafe sağlanarak ısı dağılımı optimize edilmiş ve termal yönetim performansı iyileştirilmiştir. Bu tasarım, mekanik dayanıklılığı artırırken termal güvenliği destekleyen önemli bir avantaj sunmaktadır.



Şekil 3.5. Köşeli dizilime sahip alt plakalı batarya paketi

Deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla, dış ortam koşullarından tamamen yalıtılmış bir şartlandırma ortamı tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Deneylerde, düzeneklerin sıcaklık dağılımlarını hassas bir şekilde ölçmek amacıyla toplamda 12 adet termokupl kullanılmıştır. Termokuplların 9 tanesi, batarya paketleri üzerinde farklı stratejik noktalara yerleştirilmiştir. Bu yerleşim, batarya paketlerinin yüzey

sıcaklıklarının homojenliğini ve termal davranışlarını analiz etmek için optimize edilmiştir. Geriye kalan 3 termokupl ise düzeneğin dışında konumlandırılmıştır ve çevresel sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Dış ortam ölçümleri için kullanılan termokupllardan biri, şartlandırma ortamının genel hava sıcaklığını ölçmek amacıyla üst kapağa monte edilmiştir. Diğer iki termokupl ise soğutma sistemine entegre edilmiştir. Bu termokupllardan biri, soğutucu akışkanın giriş sıcaklığını ölçmek amacıyla soğutma hattının giriş noktasına yerleştirilmiştir. Diğerisi ise soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla çıkış hattına bağlanmıştır. Bu yerleşim, soğutma sisteminin performansını ve ısı transfer etkinliğini değerlendirmek için kritik veriler sağlamaktadır. Şartlandırma ortamının tasarımı, dış ortam etkilerinin tamamen izole edilmesini ve düzeneğin termal davranışlarının yalnızca deneysel parametreler doğrultusunda incelenmesini mümkün kılacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede, deneylerden elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği artırılmıştır.

BTMS sayısal analizi için üç boyutlu bir model oluşturulmuş ve CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, deneysel bulguların doğrulanması ve sistemin farklı çalışma koşullarındaki termal performansının detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Batarya paketinin üç boyutlu geometrik modeli, SolidWorks bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak geliştirilmiş ve analizler, CFD uygulaması olan Ansys-Fluent ile gerçekleştirilmiştir.

Batarya termal yönetiminde soğutma verimliliği ve sıcaklık dağılımının homojenliğini değerlendirmek amacıyla CFD yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, akış alanı ve sıcaklık alanının detaylı bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Çalışmada, CFD analizleri ile deneysel sonuçların doğruluğu test edilmekte ve sistemin ileriye dönük optimizasyonu için çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, CFD analizleri, BTMS performansını artırmaya yönelik önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemlerde akış türünün belirlenmesi için Reynolds sayısının hesaplanması gerekmektedir. Reynolds Sayısı (Akinlabi & Solyali, 2020):

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (3.1)$$

Bu denklemde ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), v akışkanın hızını (m/s), d boru çapını (m), μ dinamik viskoziteyi (Pa.s) ve ν kinematik viskoziteyi (m^2/s) temsil etmektedir.

CFD modelinde kullanılan yönetici denklemler, süreklilik denklemi, momentum denklemi ve enerji denklemi olmak üzere üç temel fiziksel prensibe dayanmaktadır. Bu denklemler, akışkanın hareketini, enerji transferini ve kütle korunumu prensiplerini matematiksel olarak ifade etmektedir. Süreklilik denklemi, kütlenin korunumu ilkesine dayanmakta olup bir akışkanın herhangi bir kontrol hacmi içerisindeki kütlesinin zamanla değişmediğini ifade etmektedir. Bu denklem, sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz akışlar için akışkanın yoğunluğuna ve hızına bağlı olarak formüle edilmektedir. Sıkıştırılamaz akışlar için süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilir (Yalçınkaya vd., 2022):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Bu denklemde u, v ve w, sırasıyla x, y ve z koordinatlarındaki hız bileşenlerinin sıkıştırılamaz bir akışta kütlenin korunumu ilkesini ifade etmektedir. Yani, bir akışkanın herhangi bir noktada yoğunluğu sabit kaldığını ve akışkanın bir bölgeye giren ve çıkan miktarının dengede olduğunu ve bu durumda akışkanın hacimsel olarak sıkışmadığını ve yoğunluğunun zamanla değişmediğini göstermektedir.

Momentum denklemi, Newton'un ikinci yasasına dayanmakta olup bir akışkanın hareketini etkileyen kuvvetleri tanımlamaktadır. Bu denklem, akışkanın hız değişimlerini, viskoz etkileri ve dış kuvvetleri (örneğin, basınç gradyanı ve yerçekimini) dikkate almaktadır. Momentum denklemi genel olarak şu şekilde ifade edilir (Yalçınkaya vd., 2022):

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

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

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

Bu denklemde, ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), u, v ve w, sırasıyla x, y ve z koordinatlarındaki hız bileşenlerini (m/s), p basıncı (Pa) ve μ dinamik viskoziteyi (Pa.s) temsil etmektedir. CFD analizlerinde bu denklem, akışkanın hız alanını belirlenmesinde çözülür ve akışkanın hareketine etki eden kuvvetlerin nasıl dengelendiğini göstermektedir.

Enerji denklemi, termodinamiğin birinci yasasına dayanmakta olup bir akışkanın enerji transferini tanımlamaktadır. Bu denklem, akışkanın iç enerjisi, kinetik enerjisi ve ısı transferi gibi faktörleri içermekte olup şu şekilde ifade edilir (Yalçinkaya vd., 2022):

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

Bu denklemde, ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), c_p akışkanın sabit basınçtaki özgül ısısını (J/(kg.K)), u , v ve w , sırasıyla x , y ve z koordinatlarındaki hız bileşenlerini (m/s), T sıcaklık (K) ve k akışkanın termal iletkenliğini (W/(m.K)) temsil etmektedir.

Bu çalışmada, k - ε türbülans modeli, endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmasının yanında, hesaplama maliyeti ve doğruluk arasında optimum dengeyi sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Modelin seçilmesindeki en önemli faktörlerden biri, farklı dizilimlerdeki batarya paketleri gibi karmaşık geometrilere sahip sistemlerde, akış ayrılmaları ve yeniden birleşmeleri başarılı bir şekilde modelleyebilmesidir. Özellikle, bu tür sistemlerde akış dinamiklerinin doğru bir şekilde simüle edilmesi, performans analizleri için kritik bir öneme sahiptir. k - ε türbülans modeli, sınırlı hesaplama kaynaklarıyla çalışırken, yeterli doğruluk sağlamak adına, sınır tabaka akışları ve ısı transferi gibi problemlerde kanıtlanmış bir performansa sahiptir. Bu model, akışkanlar mekaniği ve termodinamik analizlerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasıyla bilinmektedir. Dolayısıyla, batarya soğutma sistemleri gibi karmaşık mühendislik problemlerinde de güvenilir sonuçlar verebileceği öngörülmüştür. Ayrıca, k - ε modelinin, benzer batarya soğutma çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılması ve deneysel verilerle yüksek korelasyon göstermesi, bu modelin seçilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. Deneysel verilerle elde edilen doğruluğun yüksekliği, modelin pratikteki güvenilirliğini artırarak karşılaştırmalı analizler için sağlam bir referans oluşturmuştur. Böylece, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar, mevcut literatürdeki deneysel bulgularla kıyaslanabilir ve modelin geçerliliği daha güçlü bir şekilde savunulabilir. Sonuç olarak, k - ε türbülans modeli, hesaplama maliyetinin makul düzeyde tutulmasını sağlarken, akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi karmaşık süreçleri doğru bir şekilde modelleyebilmesi ile bu çalışmaya uygun bir seçim olmuştur. Bu özellikler, modelin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmesinin ve güvenilir sonuçlar elde edilmesinin başlıca nedenleridir. Türbülanslı kinetik enerji (k) denklemi (F. Wang vd., 2024):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.7)$$

Türbülans yayılım oranı (ε) denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}(G_k + C_{3\varepsilon} + G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.8)$$

Bu çalışmada 4 farklı dizilime sahip ve her bir dizilimin 28 adet lityum-iyon bataryadan oluşan batarya paketlerinin CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmesi için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- **Isı Üretimi:** Lityum-iyon batarya paketi, sabit ve homojen ısı üretimi olan bir kaynak olarak modellenmiştir. Tek bir batarya hücresinin ısı üretiminin, sıcaklık değişimi üzerinde etkisinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Batarya paketinde her bir hücrenin ısı üretiminin, sistemin genel sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı düşünülmüştür. Bataryalar arasındaki ısı farklar genellikle homojen bir ısı üretimi ile modelleme yapılmasını gerektirir. Ayrıca, bireysel hücrelerin küçük ısıl etkilerinin ihmal edilebilir olması, hesaplama süresini önemli ölçüde kısaltır.
- **Akışkan Özellikleri:** Soğutucu akışkan olarak kullanılan hava, su ve antifriz, sıkıştırılamaz akışkanlar olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım, hava için düşük akış hızlarında Mach sayısının 0.3'ün altında kaldığı durumlarda geçerlidir. Su ve antifriz ise sıvı özellikleri gereği zaten sıkıştırılamaz kabul edilmektedir. Bu nedenle, tüm soğutucu akışkanlar için sıkıştırılabilirlik etkileri göz ardı edilmiştir. Bu yaklaşım, analizlerin doğruluğunu etkilemeden çözüm süresini ve hesaplama maliyetini düşürmektedir.
- **Geometrik Basitleştirmeler:** Batarya paketi ile sistemin bağlantı elemanları ve tutucuları, analizde ihmal edilmiştir. Bu elemanların termal ve akışkan davranışına etkisinin sınırlı olduğu varsayılmıştır. Bağlantı elemanları ve tutucuların, batarya paketinin genel termal ve akışkan davranışına olan etkisi sınırlı ve ikinci dereceden olduğundan, bu elemanlar analize dahil edilmemiştir. Bu basitleştirme, modelin daha hızlı çözülmesini sağlar ve gereksiz karmaşıklıktan kaçınılmış olur.

- Sınır Koşulları: Deney düzeneğinin kurulduğu şartlandırma ortamı adyabatik olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, dış çevrenin üniform bir sıcaklıkta olduğu varsayılmış ve yalnızca şartlandırma ortamı içindeki akışkan ile çalışılmıştır. Çalışma sırasında dış ortamın etkileri minimal kabul edilmiştir. Adyabatik sınır koşulları, çevresel ısı etkilerinin batarya paketi üzerindeki etkisini ihmal edilebilir düzeyde tutar ve modelin odaklanmasını yalnızca iç ortam koşullarına yönlendirir.
- Sabit Giriş Koşulları: Dış ortam basıncı ve giriş sıcaklığı sabit tutulmuştur. Bu, deneysel koşulların kararlı bir şekilde sürdürüldüğü varsayımına dayanmaktadır. Deney düzeneği kurulduğunda, dış ortam koşullarının zamanla değişmediği ve çevresel etkilerin minimal olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayım, simülasyonun kararlı bir ortamda gerçekleştirildiğini ve dış etkenlerin analiz sonuçları üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını gösterir.
- Akışkanların Fiziksel Özellikleri: Hava, su ve antifriz gibi soğutucu akışkanların yoğunluk, viskozite ve diğer fiziksel parametreleri sabit kabul edilmiştir. Bu varsayım, analizde kullanılan sıcaklık aralıklarında bu akışkanların özelliklerindeki değişimin ihmal edilebilir olduğu kabulüne dayanmaktadır. Bu şekilde yapılan sabitleme, hesaplama süresini azaltır ve modelin doğruluğunu olumsuz etkilemeden çözüm sürecini kolaylaştırır.

Bu varsayımlar, yapılan CFD analizlerinin doğruluğunu sağlamak için kabul edilebilir sınırlar içinde tutulmuş, aynı zamanda çözüm sürecini verimli ve pratik kılmak amacıyla basitleştirmeler yapılmıştır.

Bu çalışma, yüksek doğruluk gerektiren ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi gereken bir uygulama olduğu için Coupled çözücü, Second-Order Upwind diskretizasyon şeması ve transient simülasyon gibi ileri düzey hesaplama yöntemleri bir arada kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kombinasyonu, batarya paketlerinin soğutma performansını doğru bir şekilde modellemeyi ve detaylı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu kombinasyon, modelin doğruluğunu artırarak, sistemin dinamik davranışlarının ve zamanla değişen etkilerinin daha doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Böylece, batarya soğutma sistemlerinin tasarımına yönelik daha güvenilir veriler elde edilir ve tasarım süreçlerinde iyileştirmeler yapılabilir.

CFD modelinin çözümünde, k- ϵ türbülans modeli ile birlikte, basınç ve hız denklemlerinin aynı anda çözülmesi amacıyla Coupled çözücü tercih edilmiştir. Coupled çözücü, basınç ve hız denklemlerinin eş zamanlı olarak çözüldüğü bir yöntemdir. Bu yaklaşım, özellikle sıkıştırılabilir akışlar ve yüksek doğruluk gerektiren durumlarda hızlı

bir yakınsama ve doğru sonuçlar sağlar. Çalışmada, akışkanın sıkıştırılamaz olduğu varsayılmış olsa da, Coupled çözücü, hız ve basınç arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde hesaplayarak, çözüm sürecinin daha hızlı bir şekilde tamamlanmasına olanak tanır. Bu yöntem, akışın dinamik ve kararlı bir şekilde simüle edilmesi gereken sistemlerde daha güvenilir ve doğru sonuçlar sağlar. Batarya paketlerinin soğutma sistemlerinde, akışın karmaşıklığı ve hız/basınç ilişkisi göz önüne alındığında, Coupled çözücü doğru seçimdir.

Second-Order Upwind diskretizasyon şeması, çözümde daha hassas ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu diskretizasyon şeması, akışkanın fiziksel parametrelerinin hücreler arasında daha hassas bir şekilde hesaplanmasını sağlar. Ayrıca, Second-Order Upwind yöntemi düşük sayısal difüzyon ile çalışır. Sayısal difüzyon, çözümün çözüm sürecinde yanlış bir şekilde yayılmasına yol açarak doğruluğu düşürebilir. Bu şema, difüzyon etkilerini minimize eder ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Batarya paketlerinde, özellikle sıcaklık dağılımının doğru bir şekilde modellenmesi ve soğutma etkilerinin doğru bir biçimde hesaplanması önemlidir. Second-Order Upwind yöntemi, akışın ve ısı dağılımının doğruluğunu artırarak, bu önemli parametrelerin doğru şekilde hesaplanmasını sağlar.

Analizlerin zamana bağlı (transient) olarak yapılmasının bir diğer nedeni, batarya paketinin dinamik davranışlarını ve zamanla değişen etkileri detaylı bir şekilde incelemektir. Batarya paketlerinde ısı etkileri, akışkanın hareketi ve sıcaklık dağılımı zamanla değişir. Transient simülasyon, bu tür zamanla değişen etkilerin doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlar. Akışın başlangıç koşullarından itibaren gelişimini ve ısı süreçlerinin zamanla nasıl evrildiğini incelemek için transient simülasyon kullanılmıştır. Bu, özellikle batarya paketlerinin soğutma performansının zamanla nasıl değiştiğini anlamak açısından önemlidir. Zamana bağlı simülasyon, yalnızca tek bir anlık durumu değil, sistemin dinamik davranışlarını zamanla takip etmeyi mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, kullanılan bu yöntemlerin birleşimi, çalışmanın doğruluğunu artırmayı, sistemin dinamik davranışlarını doğru bir şekilde incelemeyi ve soğutma sistemlerinin etkinliğini doğru bir biçimde analiz etmeyi sağlamıştır.

3.1. Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Bu çalışmada, hava soğutmalı BTMS performansını değerlendirmek amacıyla hem deneysel hem de sayısal analiz yöntemleri bir arada kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, fan hızlarının belirli sınırlar dâhilinde kontrol edildiği bir test düzeneği

üzerinde gerçekleştirilmiştir. Giriş fanının ulaştığı maksimum hız 9,6 m/s, çıkış fanının ulaştığı maksimum hız ise 7 m/s olarak belirlenmiştir. Bu sınırlar dâhilinde, batarya paketlerinin farklı akım yüklerinde (2,5 A – 15 A) termal performansı analiz edilmiştir. Batarya kapasitesinin 24,5 Ah olduğu varsayıldığında, bu akım değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 0,1C – 0,6C oranları aralığına karşılık gelmektedir. Böylece farklı C oranlarında batarya hücrelerinin ısı davranışı değerlendirilmiştir. Çalışmalar, batarya paketlerinin farklı dizilimleri (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) temel alınarak gerçekleştirilmiş ve sıcaklık dağılımı, maksimum sıcaklık ve sıcaklık gradyanları gibi parametreler detaylı şekilde incelenmiştir. Deneysel kurulum, batarya paketinin termal davranışını gerçekçi koşullar altında değerlendirmek üzere optimize edilmiştir.

Kapalı sistem ve doğal taşınım koşulları altındaki sıcaklık dağılımı sadece üçgen dizilimde incelenmiştir. Bu düzeneğe, batarya paketinin termal performansı, herhangi bir zorlanmış hava akışı olmaksızın değerlendirilmiş ve doğal taşınımın etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Kapalı sistemde ise havalandırma delikleri kapatılarak, batarya paketinin tamamen yalıtılmış bir ortamda nasıl bir termal davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

Diğer dizilimler olan içbükey, dışbükey ve köşeli düzeneklerde ise zorlanmış taşınım koşulları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bütün düzeneklerde, havalandırma deliklerine uygun olarak farklı tipte fanlar (küçük fan, büyük fan ve salyangoz tipi fanlar) kullanılmış ve fan hızları optimize edilerek batarya paketinin termal performansı değerlendirilmiştir. Zorlanmış taşınım deneylerinde, hava akış hızının ve giriş-çıkış konfigürasyonlarının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu düzenekler, BTMS performansını artırmak için farklı tasarım parametrelerinin etkisini anlamaya yönelik olarak tasarlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda, başlangıçta üçgen dizilime sahip bir düzenek kullanılmış ve şartlandırma ortamında hava girişi ve çıkışı için belirli konumlara havalandırma delikleri açılmıştır. Hava girişi için 54 mm çapında 6 adet delik, hava çıkışı için ise alt kısma 3 adet 78 mm çapında ve üst kısma 3 adet 54 mm çapında delikler tasarlanmıştır. Bu delikler, farklı çalışma koşullarında (kapalı, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım) kullanılmak üzere optimize edilmiştir. Kapalı ve doğal taşınım deneylerinde kullanılmayan delikler kapatılarak yalıtılmış, böylece istenmeyen hava akışlarının önüne geçilmiştir. Zorlanmış taşınım şartlarında ise havalandırma deliklerine ve hava akış hızına uygun olarak farklı tipte fanlar kullanılmıştır. Bu fanlar arasında küçük fanlar, büyük

fanlar ve salyangoz tipi fanlar yer almıştır. Fanların seçimi, sistemin ihtiyaç duyduğu hava akış hızına ve basınç farkına göre yapılmıştır.

İlk düzenek olan üçgen dizilimde, deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş ve bu sonuçlar sayısal analizlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde, farklı fan hızları (4 m/s - 12 m/s) ve giriş-çıkış konfigürasyonları değerlendirilmiştir. Sayısal ve deneysel analizlerde, zorlanmış taşınım koşullarının akış rejimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Reynolds sayısı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Reynolds sayısının belirlenmesinde, hava akışkanı için kullanılan giriş-çıkış hız değerleri dikkate alınmıştır. Bu hesaplamalarda, deneylerin 25–30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulmuş, havanın termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir. Buna göre, 25 °C ortam sıcaklığına göre yoğunluk $1,184 \text{ kg/m}^3$, dinamik viskozite $1,85 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ve kinematik viskozite $1,56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınmıştır (Çengel vd., 2019). Reynolds sayısı, silindirik giriş kesitinden geçen hava için Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, hava soğutmalı BTMS’ de fan destekli zorlanmış konveksiyonun akış rejimine etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 54 mm çapındaki giriş kesitinden akan hava için hesaplanan Reynolds sayıları 13.846 ile 41.538 arasında değişmekte olup tablo 3.1’ de tüm akış hızları için hesaplama sonuçları sunulmuştur. Reynolds sayısı 4.000’ün üzerinde olduğu için tüm hızlar için akış rejimi türbülanslıdır. Sayısal model, deneysel verilerle doğrulanmış ve bu doğrulama sonucunda modelin güvenilirliği artırılmıştır. Sayısal analizler sonucunda, en iyi termal performansı sağlayan fan hızları ve giriş-çıkış konumları belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimler için deneysel düzenekler yeniden tasarlanmış ve en iyi sonuçların alındığı sayısal çözümlemeye göre deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Hava için farklı hız değerlerinde Reynolds Sayısı hesaplamaları

Hız (v) (m/s)	Boru Çapı (d) (m)	Kinematik Viskozite (v) (m ² /s)	Reynolds Sayısı (Re)
4	0,054	$1,56 \times 10^{-5}$	13.846
6	0,054	$1,56 \times 10^{-5}$	20.769
8	0,054	$1,56 \times 10^{-5}$	27.692
9,6	0,054	$1,56 \times 10^{-5}$	33.231
12	0,054	$1,56 \times 10^{-5}$	41.538

Batarya paketinin farklı çalışma koşullarındaki davranışı ve termal yönetim sisteminin etkinliği geniş bir C oranı aralığında değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında, batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve sıcaklık homojenliği ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Özellikle yüksek akım yüklerinde (örneğin 0,5C ve 0,6C), batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık farklarının termal yönetim sistemi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu analizler, soğutma sisteminin farklı akım seviyelerinde ne derece etkili olduğunu ortaya koymak açısından kritik öneme sahiptir.

Sayısal simülasyon çalışmaları, deneysel kurulumun bir dijital modeli oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Bu model, hava akış paternlerini ve sıcaklık dağılımını analiz etmek için kullanılmıştır. Simülasyonlarda, farklı fan hızları ve giriş-çıkış konfigürasyonları değerlendirilmiştir. Sayısal analizler, deneysel çalışmalarda elde edilemeyen bazı detayların incelenmesine olanak tanımıştır. Örneğin, hava akış paternleri ve türbülans etkileri, sayısal model kullanılarak daha detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler, batarya paketinin termal yönetim sisteminin tasarımı ve optimizasyonu için önemli veriler sunmuştur. Ayrıca, farklı fan hızlarının ve giriş-çıkış konumlarının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamlı analizler, BTMS performansını artırmak için tasarım parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanımıştır.

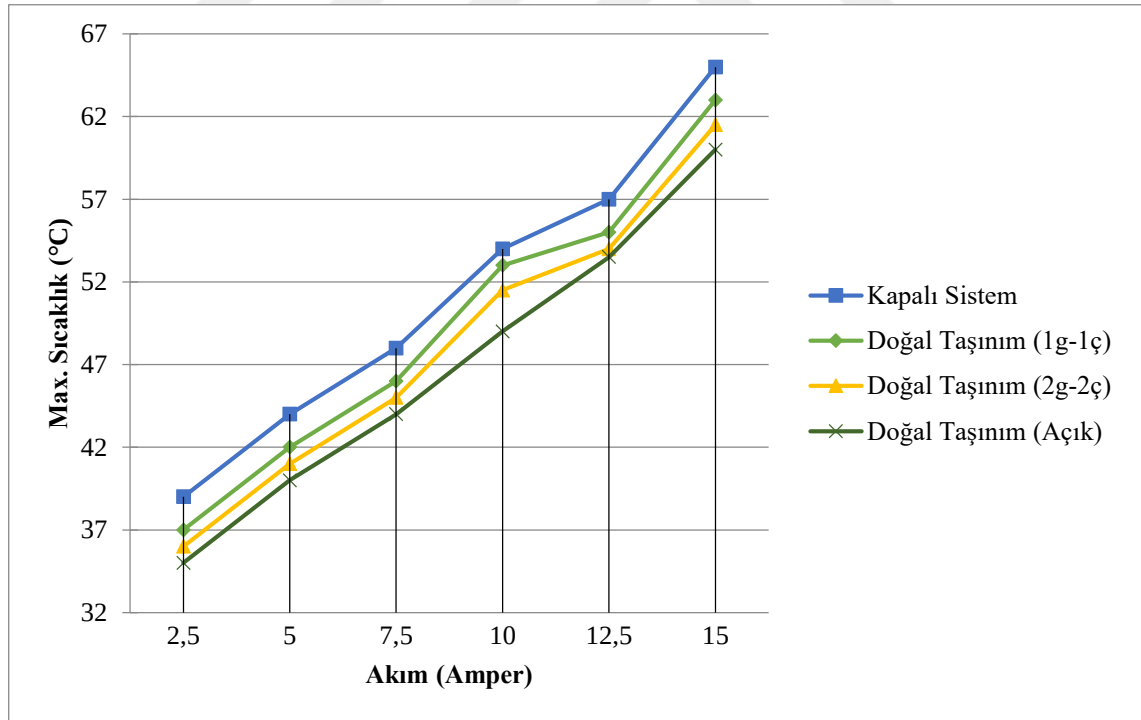
Bu çalışmada, batarya paketi kapalı, doğal ve zorlanmış taşınım durumlarında 2,5 A – 15 A akım değerleri ile yüklenerek deşarj edilmiştir. Deney sırasında bataryaların hem tekil hem de paket halindeki sıcaklıkları detaylı bir şekilde ölçülmüştür. Bu ölçümler, 9'u batarya paketi grubuna, 2'si hava giriş-çıkış deliklerine ve 1'i üst kapakta olmak üzere toplam 12 farklı noktaya yerleştirilen K tipi termokupllar ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde ortam havasının sıcaklık ölçümü için ise akım yükleme cihazının sıcaklık ölçüm kablosu ve cihaz kullanılmıştır. Bu sayede, batarya paketi çevresindeki ortam koşulları da dikkate alınarak daha doğru bir analiz yapılması sağlanmıştır. Ölçülen tüm veriler, datalogger cihazları aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve analiz edilmiştir. Bu yöntem, sıcaklık dağılımının ve batarya termal performansının detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır.

Deneysel çalışmalar, gerçek çalışma koşullarında batarya paketinin termal performansını değerlendirmek için önemli veriler sağlamıştır. Sayısal simülasyonlar ise deneysel sınırların ötesinde bir analiz yapılmasına olanak tanımış ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi için detaylı bilgiler sunmuştur. Deneysel ve sayısal

sonuçların karşılaştırılması, model doğrulamasını sağlamış ve bu doğrulama sonucunda elde edilen verilerin güvenilirliği artırılmıştır.

Çalışmanın sonuçları, BTMS tasarımı ve optimizasyonu için önemli katkılar sunmaktadır. Farklı fan hızları, giriş-çıkış konumları ve fan tiplerinin termal performansa etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu parametrelerin optimize edilmesi için öneriler sunulmuştur. Ayrıca, kapalı sistem, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım koşullarında batarya paketinin termal performansı değerlendirilmiş ve bu koşulların sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu kapsamlı yaklaşım, tasarım ve optimizasyon için güvenilir ve kapsamlı veriler sunmaktadır.

Deneylerde, üçgen dizilimde batarya paketinin termal performansı, doğal taşınım koşulları altında farklı havalandırma konfigürasyonları ile incelenmiştir. Bu kapsamda, havalandırma delikleri sırasıyla tek giriş-tek çıkış, çift giriş-çift çıkış ve tüm deliklerin açık olduğu şekilde düzenlenmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Deneylerde, batarya paketinin farklı akım değerleri altında maksimum sıcaklıkları ve sıcaklık dağılımı analiz edilmiştir.



Şekil 3.6. Kapalı ve Doğal Taşınım durumlarında akım sıcaklık dağılımı

1 giriş - 1 çıkış konfigürasyonunda, 2,5 Amper ile 10 Amper aralığında akım arttıkça batarya paketinin sıcaklığının yükseldiği, ancak sıcaklık dağılımının homojen

olduğu gözlemlenmiştir. Bu konfigürasyonda, doğal taşınım etkisiyle hava akışının yeterli olduğu ve batarya yüzeyindeki sıcaklık farklarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak, 10 Amperin üzerindeki akım değerlerinde sıcaklık artışı hızlanmış ve sistemin termal performansında düşüş gözlemlenmiştir. 2 giriş - 2 çıkış konfigürasyonunda, 10 Amperde batarya paketinin maksimum sıcaklığının 1 giriş - 1 çıkış konfigürasyonuna göre düştüğü ancak sistemin optimum çalışma aralığında olmadığı ve sıcaklık dağılımının homojenliğinin kısmen bozulduğu tespit edilmiştir. Bu durum, doğal taşınım etkisinin artan hava giriş-çıkış sayısı ile birlikte zayıfladığını ve hava akışının düzensizleştiğini göstermektedir. Tüm deliklerin açık olduğu durumda ise 10 Amperden 15 Amper akım değerine kadar sıcaklığın artmaya devam ettiği ve sıcaklık homojenliğinin belirgin şekilde bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu konfigürasyonda, doğal taşınımın etkisinin azaldığı ve batarya yüzeyindeki sıcaklık farklarının arttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, üçgen dizilimde doğal taşınım koşulları altında 1 giriş - 1 çıkış konfigürasyonunun, düşük ve orta akım değerlerinde (2,5 A - 10 A) batarya paketinin termal performansı açısından en uygun konfigürasyon olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yüksek akım değerlerinde (10 A ve üzeri) sıcaklık artışının hızlandığı ve sistemin termal performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm deliklerin açık olduğu durumda ise sıcaklık homojenliğinin bozulduğu ve doğal taşınımın yetersiz kaldığı belirlenmiştir.

Bu verilere bağlı olarak, özellikle yüksek akım değerlerinde (10 A ve üzeri) batarya paketinin termal performansını korumak ve sıcaklık artışını kontrol altına almak için zorlanmış taşınımın gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Zorlanmış taşınım, hava akışını artırarak sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirebilir ve batarya yüzeyindeki sıcaklık farklarını azaltarak sistemin termal yönetim performansını iyileştirebilir. Bu nedenle, yüksek akım yüklerinde batarya paketinin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için zorlanmış taşınımın uygulanması önerilmektedir.

Zorlanmış taşınım durumunda, üçgen dizilimde batarya paketinin termal performansını değerlendirmek ve sayısal modelde doğrulamayı yapabilmek amacıyla hava girişinde farklı akışkan dinamiği konfigürasyonları sistematik bir şekilde incelenmiştir (Tablo 3.2.). Bu konfigürasyonlar, akışkanın giriş ve çıkış konumları, akış hızları, giriş ve çıkış sayıları, çıkış türleri ve çıkış fanı kullanımı gibi çeşitli parametrelerle tanımlanmıştır. Deneylerde başlangıç sıcaklığı, ortam sıcaklığı ile aynı tutulmuş ve 25 °C – 30 °C aralığında sabitlenmiştir. Bu düzenlemeler, batarya paketinin farklı akım yüklerinde (2,5 A – 15 A) termal performansını analiz etmek ve optimum soğutma koşullarını belirlemek için tasarlanmıştır.

Tablo 3.2. Üçgen dizilim deneylerinde zorlanmış taşınım hava akış konfigürasyonları

Giriş	Giriş Konumu	Giriş Fan Hızı (m/s)	Çıkış Sayısı	Çıkış Konumu	Çıkış Türü	Çıkış Fanı	Çıkış Fan Hızı (m/s)
1 Giriş	Üstten	4	1 Çıkış	Üstten	Normal Çıkış	Hayır	
	Alttan	4	1 Çıkış	Üstten	Normal Çıkış	Hayır	
					Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7
	Ortadan	4	1 Çıkış	Üstten	Normal Çıkış	Hayır	
		6	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış	Hayır	
			2 Çıkış	Alt Köşelerden	Normal Çıkış	Hayır	
				Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7	
		8	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış	Hayır	
			2 Çıkış	Alt Köşelerden	Normal Çıkış	Hayır	
				Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7	
		9,6	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış	Hayır	
			2 Çıkış	Alt Köşelerden	Normal Çıkış	Hayır	
				Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7	
2 Giriş	Alt-Üst	4	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış		
					Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7
	Ortadan	4	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış		
					Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7
			2 Çıkış	Alt Köşelerden	Normal Çıkış	Hayır	
					Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7
			3 Çıkış	Üstten	Normal Çıkış		
Fanlı Çıkış	Evet	4					
3 Giriş	Üst-Orta	4	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış		
					Fanlı Çıkış	Evet	4 ve 7
		6	1 Çıkış	Ortadan	Normal Çıkış		
			2 Çıkış	Alt Köşelerden	Normal Çıkış	Hayır	

Hava giriş ve çıkış konumları, üstten giriş ve üstten normal çıkış, alttan köşelerden giriş ve üstten normal ve fanlı çıkış, ortadan giriş ve üstten, alttan ve ortadan hem normal hem de fanlı çıkış gibi farklı senaryoları içermektedir. Bu senaryolar, akışkanın yönü ve dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, üstten giriş ve normal çıkışlı bir düzenleme ile 4 m/s hızında yapılan bir deney, alttan köşelerden giriş ve 7 m/s çıkış fan hızında yapılan bir düzenleme ile karşılaştırılmıştır. Bu farklı düzenlemeler, batarya paketinin yüzey sıcaklıklarının homojenliği, maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklık farklarının analizi açısından değerlendirilmiştir.

Girişte hava akış hızları, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s ve 9,6 m/s olmak üzere farklı değerlerde test edilmiştir. Bu hızlar, zorlanmış taşınımın etkisini anlamak ve optimum hava akış hızını belirlemek için seçilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, tüm hızlar için akışın türbülanslı rejimde gerçekleştiği belirlenmiştir. Düşük hızlarda (örneğin, 4 m/s) hava akışının etkisi sınırlı kalırken, yüksek hızlarda (örneğin, 9,6 m/s) türbülanslı akışın etkisiyle daha etkin bir ısı transferi sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu hızlar, sistemin farklı akım yüklerinde termal performansını değerlendirmek için sistematik olarak uygulanmıştır.

Giriş ve çıkış sayıları, 1 giriş - 1 çıkış, 2 giriş - 2 çıkış ve 3 giriş - 3 çıkış olmak üzere farklı kombinasyonlarla test edilmiştir. Bu düzenlemeler, hava akışının yönlendirilmesi ve dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Her bir konfigürasyon, batarya paketinin farklı akım yüklerinde sıcaklık dağılımını ve maksimum sıcaklık değerlerini analiz etmek için tasarlanmıştır.

Çıkış fanı kullanımı, zorlanmış taşınımın etkinliğini artırmak için önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Çıkış fanı, hava akışını hızlandırarak sıcak havanın sistemden daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Örneğin, alttan köşelerden giriş ve çıkış fanlı bir düzenlemede, farklı akış hızlarında yapılan deneyler, hava akışının yönlendirilmesi ve sıcaklık dağılımı açısından önemli veriler sunmuştur. Çıkış fanının kullanılmadığı durumlarda ise hava akışının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu düzenlemeler, özellikle havalandırma sistemleri, ısı transferi uygulamaları ve akışkan dinamiği analizleri gibi mühendislik alanlarında farklı senaryoların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi için önemli bir temel oluşturmuştur. Her bir konfigürasyon, batarya paketinin termal performansını etkileyen kritik tasarım parametrelerini temsil etmekte ve bu parametrelerin kombinasyonları, akışkanın yönü, hızı ve dağılımı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Üçgen dizilimde yapılan bu deneysel çalışmalar, sayısal modelin oluşturulması için gerekli olan başlangıç verilerini

sağlamış ve modelin doğrulanması için temel bir referans oluşturmuştur. Sayısal model, deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde geliştirilmiş ve farklı akışkan dinamiği senaryolarının detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır.

Sayısal modelin oluşturulmasının ardından, diğer dizilimler (örneğin, içbükey, dışbükey ve köşeli) için de benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Bu dizilimlerde, zorlanmış taşınım koşulları altında farklı giriş-çıkış konfigürasyonları, akış hızları ve fan kullanımı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Üçgen dizilimde elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar, diğer dizilimlerdeki analizler için bir referans noktası olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, farklı dizilimlerin termal performansını karşılaştırmak ve optimum tasarım parametrelerini belirlemek için kapsamlı bir çerçeve sunmuştur.

Farklı geometrilere sahip batarya paketlerinin termal yönetim performansını optimize etmek, enerji depolama sistemlerinin verimliliği ve güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlere sahip batarya paketleri için üçgen dizilimde doğruluğu test edilen sayısal analizler gerçekleştirilmiş; bu analizler, deneysel çalışmalara geçişi desteklemek amacıyla kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilimler için dört farklı konfigürasyon incelenmiştir. İçbükey dizilim için yapılan simülasyonlar; üstten 2 giriş, ortadan 1 çıkış (Tasarım 1), geniş taraflardan giriş, yanlardan 2 çıkış (Tasarım 2) ve karşılıklı 2 giriş, karşılıklı 2 çıkış (Tasarım 3) olmak üzere üç farklı düzenleme altında gerçekleştirilmiştir. Her konfigürasyonda, farklı giriş ve çıkış senaryoları uygulanmış; giriş fan konumu, çıkış fan konumu, çıkış fanı kullanımı gibi parametreler detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Dışbükey dizilim için yapılan simülasyonlar, yine üç farklı konfigürasyon altında yürütülmüştür: Üstten 2 giriş, ortadan 1 çıkış (Tasarım 1), geniş taraflardan giriş, yanlardan 2 çıkış (Tasarım 2) ve karşılıklı 2 giriş, karşılıklı 2 çıkış (Tasarım 3). Her konfigürasyonda, belirlenen senaryolara uygun şekilde fan yerleşimi ve hız değerleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Köşeli dizilim için gerçekleştirilen simülasyonlar da üç ana konfigürasyonu içermektedir: Üstten 2 giriş, ortadan 1 çıkış (Tasarım 1), geniş taraflardan giriş, yanlardan 2 çıkış (Tasarım 2) ve karşılıklı 2 giriş, karşılıklı 2 çıkış (Tasarım 3). Her bir konfigürasyonda fan konumları ve hızları dizilim geometrisine göre belirlenerek analiz edilmiştir.

Tüm dizilim türlerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda, batarya termal yönetim performansını etkileyen giriş fan hızı ve konumu, çıkış fan hızı ve konumu ile çıkış fanı kullanımı gibi kritik parametreler kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Simülasyonlar; 4 m/s, 8 m/s ve 12 m/s olmak üzere farklı giriş hızlarının uygulandığı senaryolar üzerinden

yürütülmüş, giriş hızları konfigürasyona göre değişkenlik göstermiştir. Çıkış hızları ise çıkış fanının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlara göre 2 m/s ve 4 m/s olarak değerlendirilmiştir. Çıkış fanlarının, özellikle yüksek giriş hızlarında çıkış akışının homojenliğini artırma konusunda önemli katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Fan konumlandırmaları her konfigürasyonun geometrisine uygun şekilde optimize edilerek, hem akış dinamikleri hem de sıcaklık dağılımları açısından performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

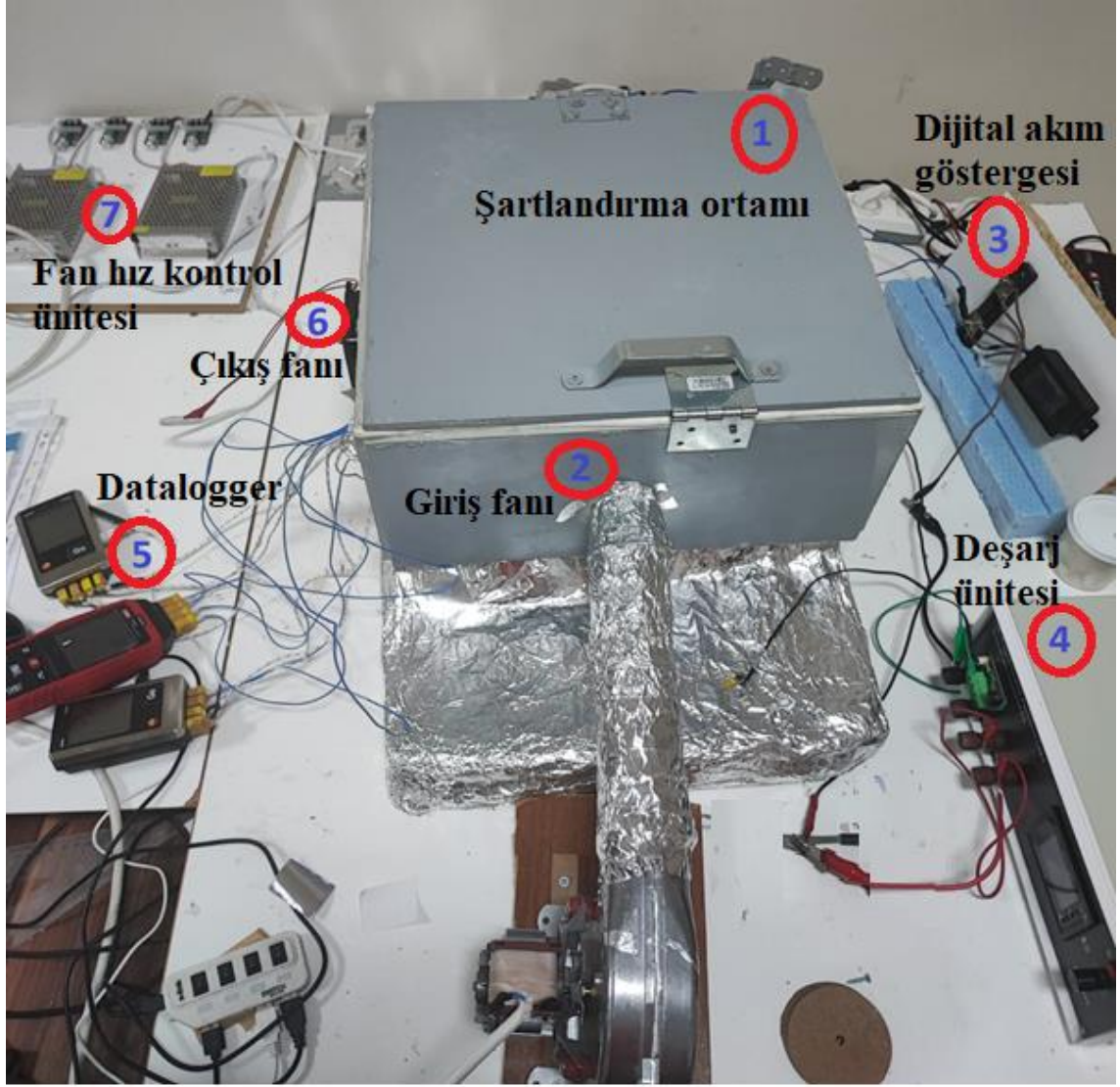
Bu çalışma, farklı geometrik dizilimlere sahip batarya paketlerinin termal yönetim performansını optimize etmeye yönelik detaylı bir sayısal analiz sunmaktadır. Giriş ve çıkış fan hızları, fan konumları ve çıkış fanı kullanımı gibi kritik parametrelerin akış dinamiklerine etkisi net bir şekilde ortaya konmuştur. Özellikle içbükey dizilimde yüksek giriş hızlarında çıkış fanlarının homojenliği sağlama açısından optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Dışbükey ve köşeli dizilimlerde ise fan konumlarının geometrik düzene uygun şekilde belirlenmesi, sistemin genel soğutma verimliliğini artırmıştır. Bu analizler, deneysel çalışmalara geçişte sağlam bir temel oluşturarak batarya paketlerinin termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı deneysel validasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama sürecinde, üçgen dizilime sahip batarya paketi referans alınmış ve sayısal modelin doğruluğu bu dizilim üzerinden test edilmiştir. Validasyon kapsamında, yüksek akım değerlerinde eşik olarak belirlenen 10 Amper akım ve 20 dakikalık deney süresi temel parametreler olarak kullanılmıştır. Üçgen dizilimde elde edilen deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak modelin geçerliliği test edilmiştir. Bu süreçte kullanılan varsayımlar ve sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulan model, batarya paketlerinin yer aldığı şartlandırma ortamını ve hava akışını başarılı bir şekilde simüle etmiş ve deneysel sonuçlarla yüksek uyum göstermiştir. Böylece, modelin farklı geometrik dizilimlere (içbükey, dışbükey ve köşeli dizilim gibi) uygulanabilirliği güvence altına alınmış; sayısal analizlerin güvenilirliği artırılmıştır. Bu validasyon süreci, tasarım parametrelerinin termal performansa etkisini daha doğru değerlendirebilmek açısından kritik bir adım olmuştur.

Deneysel düzenekler, batarya paketlerinin farklı geometrik dizilimlerdeki termal, mekanik ve elektriksel performanslarını karşılaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu düzenekler, bataryaların yerleşim düzenine bağlı olarak sıcaklık dağılımı, soğutma performansı ve mekanik dayanıklılık gibi kritik parametrelerin ölçülmesi ve analiz

edilmesi için optimize edilmiştir. İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlerin her biri, bataryaların yerleşim düzenine bağlı olarak farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmakta olup, bu düzenekler arasındaki performans farklarının belirlenmesi, batarya paketlerinin tasarımında en uygun yerleşim düzeninin seçilmesine katkı sağlamaktadır. Deneyler, her bir dizilimin termal yönetim, elektriksel bağlantı verimliliği ve mekanik dayanıklılık açısından sunduğu performansı karşılaştırmak üzere gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık ölçümleri için stratejik noktalara yerleştirilen K-tipi termokupullar kullanılmıştır: batarya paketi üzerinde 9 adet, hava giriş-çıkış noktalarında 2 adet ve üst kapakta 1 adet olmak üzere toplam 12 ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu termokupl yerleşimi, daha önce üçgen dizilim üzerinde gerçekleştirilen validasyon çalışmalarındaki konumlandırma ile benzer olacak şekilde korunmuştur. Böylece hem karşılaştırılabilir sonuçların elde edilmesi hem de modelin güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. Sistem performansının sürekli izlenmesi için ortam sıcaklığı, akım yükleme cihazının entegre sıcaklık sensörü ile takip edilmiş ve tüm veriler yüksek hassasiyetli veri toplama sistemi aracılığıyla dijital ortamda kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği, entegre bir termal yönetim ve veri toplama platformu olarak tasarlanmıştır. Sistem temel olarak şu bileşenlerden oluşmaktadır (Şekil 3.7): (1) 400×400×200 mm boyutlarında, yüksek termal izolasyon özelliklerine sahip şartlandırma ortamı, (2) hassas hız kontrolü sağlayan giriş fanı (0 – 9,6 m/s hava akış hızı aralığı), (3) $\pm 0,1$ A hassasiyetli dijital akım göstergesi, (4) 0 – 40 A programlanabilir deşarj ünitesi, (5) yüksek hassasiyetli ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) çok kanallı veri toplama sistemi (datalogger), (6) kontrollü hava tahliyesi için sekonder çıkış fanı, (7) 0 – 12V aralığında hassas voltaj regülasyonu sağlayan fan kontrol ünitesi ve tüm deneysel verilerin gerçek zamanlı olarak kaydedildiği, işlendiği ve analiz edildiği veri işleme bilgisayarı.



Şekil 3.7. Hava soğutma deney düzeneği

Test edilen batarya paketi, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip olup, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilim konfigürasyonlarında incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak üçgen dizilim üzerinde kapalı sistem ve doğal taşınım koşullarında deneysel testler gerçekleştirilmiş, bu testler sonucunda yalnızca doğal taşınımın yeterli bir soğutma sağlamadığı gözlemlenerek sistemde zorlanmış taşınımına geçilmesi gerekliliği ortaya konmuştur. Zorlanmış taşınım koşulları altında üçgen dizilim için 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 ve 15 amper olmak üzere farklı akım seviyelerinde deneyler gerçekleştirilmiş, yapılan analizler sonucunda 10 A akım değeri, sistemin kritik akım eşiği olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi 10 A akımdan sonra doğal taşınımın yetersiz kalması ve soğutma sisteminin gerekli olmasıdır. Bu eşik değeri esas alınarak, diğer dizilim konfigürasyonları olan içbükey, dışbükey ve köşeli paket yapıları için sayısal

analizler ve ardından deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Geliştirilen test düzeneği, farklı dizilim geometrilerine sahip batarya paketlerinin termal performanslarını kıyaslamaya imkân tanıyacak şekilde tasarlanmış olup, sistemin tamamı kontrollü bir test ortamında çalışacak şekilde entegre edilmiştir. Hem doğal hem de zorlanmış taşınım koşullarını sağlayabilecek esnekliğe sahip bu düzenek, yüksek doğrulukla sıcaklık ölçümleri yapabilen sensörlerle donatılmış ve tüm veri toplama işlemleri hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Böylece hem sayısal hem deneysel analizlerde güvenilir, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu kapsamlı altyapı sayesinde, batarya dizilim geometrilerinin termal performans üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

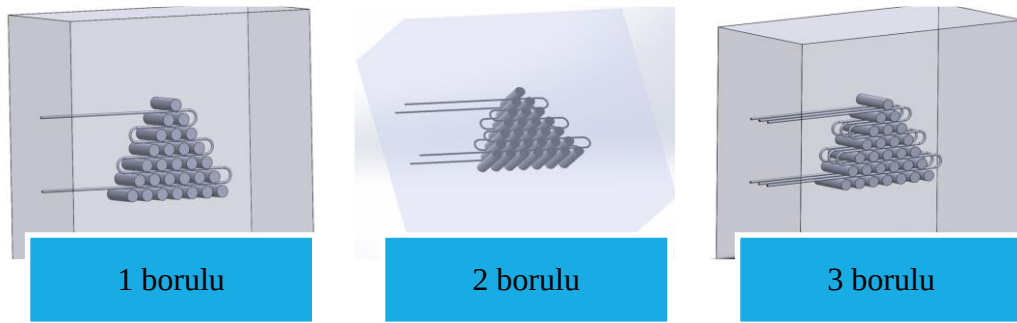
3.2. Isı Borulu Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Hava soğutmalı BTMS, düşük maliyetleri, yapısal sadelikleri ve uygulama kolaylıkları sayesinde özellikle düşük ve orta güçlü batarya uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak yapılan deneysel ve simülasyon çalışmaları, bu yöntemlerin özellikle yüksek akım değerlerinde ve yoğun hücre yerleşimine sahip dizilimlerde sınırlı soğutma kapasitesi sunduğunu ve sıcaklık homojenliği açısından yetersiz kalmaktadır. Fan konumları, hava giriş/çıkış hızları ve çıkış fanı kullanımı gibi çeşitli parametrelerin etkisi araştırılmış olsa da, hava soğutmalı sistemlerin bazı bölgelerde aşırı ısınmayı tam olarak önleyemediği gözlemlenmiştir. Bu durum, batarya güvenliği ve ömrü açısından daha etkili ısı yönetimi stratejilerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, soğutma yöntemlerinden biri olan ısı borulu sistemler, yüksek ısıl iletkenlikleri ve ısıyı kaynaktan etkin şekilde uzaklaştırma kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında, üçgen, iç bükey, dış bükey ve köşeli dizilim geometrilerine sahip batarya paketleri üzerinde gerçekleştirilen hava soğutmalı deneylerin ardından, aynı geometrilere sahip paketlerde ısı borulu soğutma sistemlerinin performansı deneysel ve simülasyon olarak incelenmiştir. Böylece, farklı dizilimlerin ısı borulu termal performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sistemlerin etkinlikleri bütüncül bir bakış açısıyla analiz edilmiştir.

Isı boruları, batarya hücreleri arasında meydana gelen sıcaklık farklarını azaltarak daha dengeli bir termal profil oluşturabilirler. Hava soğutmalı sistemlerle karşılaştırıldığında, sıcaklık homojenliğinin sağlanması ve soğutma gibi avantajlara da sahiptirler. Bu bağlamda, aynı batarya dizilim geometrileri kullanılarak (üçgen, içbükey,

dışbükey ve köşeli), ısı borulu soğutma sistemlerinin performansı da deneysel olarak test edilmiş ve hava soğutmalı sistemlerle karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Üçgen dizilimde bataryalar, plaka üzerinde kompakt ve optimize edilmiş bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşimde uç noktadaki batarya merkezleri arasındaki mesafe 150 mm, iki komşu batarya merkezi arasındaki mesafe ise 25 mm olarak belirlenmiştir. Batarya hücreleri, plakanın geometrik merkezine göre simetrik biçimde konumlandırılarak eşkenar üçgen formu oluşturacak şekilde dizilmiştir. Şekil 3.8 'de gösterilen modellerde, üçgen dizilime sahip batarya paketinde farklı sayıda soğutma borusu kullanılarak 1 borulu, 2 borulu ve 3 borulu konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Kullanılan tüm soğutma boruları bakır malzemeden seçilmiş olup iç çapları 2 mm dış çapları 3 mm olarak belirlenmiştir. Borular, batarya hücreleri arasına yerleştirilmiş ve içerisinden hava akışı olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekilde soldan sağa sırasıyla yer alan modellerde, birinci konfigürasyonda her bir batarya katmanı arasına yalnızca bir adet bakır boru yerleştirilmiştir. İkinci modelde, aynı yerleşim geometrisi korunarak her batarya sırası arasına iki adet paralel boru yerleştirilmiştir. Bu yapı, ısı transfer yüzey alanını artırarak daha etkili bir soğutma sağlamayı hedeflemektedir. Üçüncü ve son modelde ise her batarya katmanına üç adet boru entegre edilmiştir. Böylece hava ile temasta bulunan yüzey maksimum seviyeye çıkarılmış ve sistemin termal performansının daha da iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu üç farklı konfigürasyon, zorlanmış hava akışı altında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve boru sayısının artırılmasının batarya soğutma verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 3.8. Üçgen dizilim için ısı borulu soğutma modelleri

Bu çalışma kapsamında deneysel bir düzenek hazırlanmış olup, ilk etapta yalnızca 1 borulu model fiziksel olarak imal edilerek test edilmiştir. Şekil 3.9 'da gösterilen bu deneysel düzenek, üçgen dizilime sahip batarya paketine uygun şekilde tasarlanmış ve sıcaklık dağılımları gözlemlenmiştir. Deneysel veriler, sayısal modellemelerin

kalibrasyonu ve doğrulaması amacıyla kullanılmıştır. Bir borulu deneysel ve sayısal simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra, 2 ve 3 borulu modellerin yalnızca sayısal simülasyonları yapılacak ve bu konfigürasyonların termal performansları kıyaslanarak analiz edilecektir.



Şekil 3.9. Bir borulu üçgen dizilime sahip batarya paketi

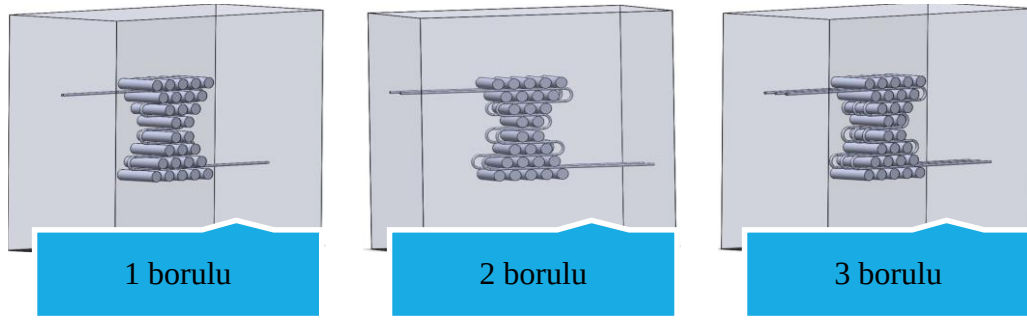
Deneysel çalışmalarda batarya hücreleri üzerine uygulanan soğutma performansını değerlendirebilmek amacıyla farklı hava akış hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzende kullanılan fan sistemi ile kanal içerisinde çeşitli hızlarda hava akışı sağlanmış ve sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Bu kapsamda, 10 amperlik deşarj akımı altında yapılan testlerde sırasıyla 5, 10 ve 15 m/s hava hızları uygulanmıştır. Bu hız aralığında soğutma performansının düşük ve yüksek hava hızlarında nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Diğer yandan, 15 amperlik deşarj akımı altında yapılan testlerde ise batarya sıcaklıkları üzerindeki etkiler daha belirgin olacağından, sistemin tepkisini gözlemleyebilmek amacıyla 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akış hızı kullanılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalar, özellikle 10 amperlik akım değeri için batarya paketinin davranışını analiz etmeye odaklanmış olup, sayısal modellemelerde kullanılacak sınır koşullarının belirlenmesine katkı sağlamıştır.

Sayısal simülasyon çalışmaları, deneysel olarak test edilen 1 borulu modelin yanı sıra 2 ve 3 borulu konfigürasyonlar için de gerçekleştirilmiştir. Tüm sayısal analizler, deneysel çalışmalarda olduğu gibi yüksek akım değerleri için kritik eşik olan 10 amperlik deşarj akımı koşulunda yürütülmüştür. Bu kapsamda, hava akış hızının termal performans üzerindeki etkilerini detaylı şekilde inceleyebilmek amacıyla her model için farklı hız aralıklarında analizler yapılmıştır.

1 borulu model için, hava akış hızları 5, 10, 15, 20, 25 ve 40 m/s olarak belirlenmiş ve geniş bir hız aralığında batarya yüzey sıcaklıklarının değişimi analiz edilmiştir. Bu sayede hava akış hızının artışı sıcaklık düşüşüne ve homojenliğe olan katkısı detaylı olarak incelenmiştir. 2 borulu model için ise her bir boru için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup, boru sayısının artırılmasının aynı hava debisi altında sağladığı soğutma avantajı değerlendirilmiştir. 3 borulu modelde ise daha kompakt ve yoğun bir boru yerleşimi olduğundan, sistemin tepkisini gözlemlemek amacıyla her bir boru için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava hızlarında analizler yapılmıştır. Bu modelde düşük ve orta seviyeli hava hızlarında dahi etkin bir soğutma performansı sağlanıp sağlanamayacağı araştırılmıştır.

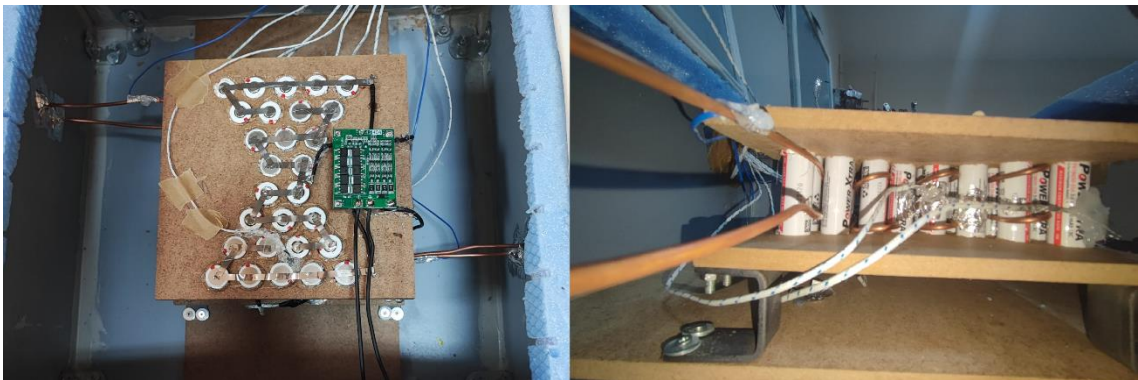
Yapılan bu kapsamlı sayısal analizler, her bir boru konfigürasyonu için hava akış hızının batarya yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisini ortaya koyarak, optimum soğutma koşullarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

İçbükey dizilimde bataryalar, plaka üzerinde kompakt ve optimize edilmiş bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşimde uç noktalarındaki batarya merkezleri arasındaki mesafe 100 mm, iki komşu batarya merkezi arasındaki mesafe ise 25 mm olarak belirlenmiş olup en alttaki bataryaların plakanın alt kenarına 22,5 mm yanıl kenarına 50 mm mesafede konumlandırılmıştır. Batarya hücreleri, plakanın geometrik merkezine göre simetrik biçimde konumlandırılarak merkeze doğru eşkenar üçgene benzer bir form oluşturacak şekilde dizilmiştir. Şekil 3.10 'da gösterilen modellerde, içbükey dizilime sahip batarya paketinde farklı sayıda soğutma borusu kullanılarak 1 borulu, 2 borulu ve 3 borulu konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Kullanılan tüm soğutma boruları bakır malzemeden seçilmiş olup iç çapları 2 mm dış çapları 3 mm olarak belirlenmiştir. Borular, batarya hücreleri arasına yerleştirilmiş ve içerisinden hava akışı olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekilde soldan sağa sırasıyla yer alan modellerde, birinci konfigürasyonda her bir batarya katmanı arasına yalnızca bir adet bakır boru yerleştirilmiştir. İkinci modelde, aynı yerleşim geometrisi korunarak her batarya sırası arasına iki adet paralel boru yerleştirilmiştir. Bu yapı, ısı transfer yüzey alanını artırarak daha etkili bir soğutma sağlamayı hedeflemektedir. Üçüncü ve son modelde ise her batarya katmanına üç adet boru entegre edilmiştir. Böylece hava ile temasta bulunan yüzey maksimum seviyeye çıkarılmış ve sistemin termal performansının daha da iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu üç farklı konfigürasyon, zorlanmış hava akışı altında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve boru sayısının artırılmasının batarya soğutma verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10. İçbükey dizilim için ısı borulu soğutma modelleri

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak üçgen dizilime sahip batarya paketleri için farklı soğutma borusu konfigürasyonlarında (1, 2 ve 3 borulu) sayısal simülasyon ve 1 borulu deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sistemin termal performansı değerlendirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, üçgen dizilimde kullanılan farklı boru sayılarının batarya soğutma verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuş ve modelin genel doğruluğu hakkında ön değerlendirme yapılmasını sağlamıştır. Bu ön değerlendirmelerin ardından, içbükey dizilime sahip batarya paketine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, içbükey dizilime uygun şekilde özel olarak tasarlanmış bir deneysel düzenek hazırlanmış ve yalnızca 2 borulu model fiziksel olarak imal edilmiştir. Şekil 3.11’de gösterilen bu düzenek üzerinden gerçekleştirilen deneylerde sıcaklık dağılımları gözlemlenmiş ve elde edilen veriler, sayısal modellemelerin kalibrasyonu ve doğrulaması amacıyla kullanılmıştır. 2 borulu konfigürasyon için hem deneysel hem de sayısal simülasyonlar tamamlandıktan sonra, 1 ve 3 borulu modellerin yalnızca sayısal analizleri yapılmış ve bu üç farklı konfigürasyonun termal performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

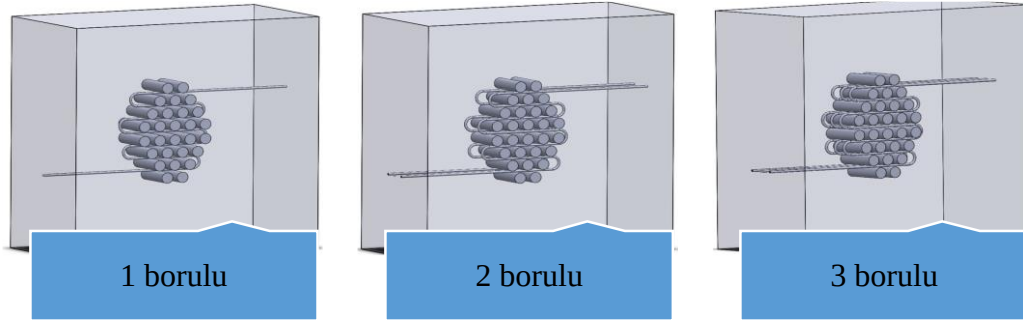


Şekil 3.11. İki borulu içbükey dizilime sahip batarya paketi

Deneyisel çalışmalarda, batarya hücreleri üzerine uygulanan soğutma performansını değerlendirebilmek amacıyla farklı hava akış hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan borular içerisinde çeşitli hızlarda hava akışı sağlanmış ve sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleri ile ölçülmüştür. Bu kapsamda, 10 amperlik deşarj akımı altında yapılan deneyisel testlerde sırasıyla her bir boru için 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızları uygulanmıştır. Bu hız aralığında, düşükten yükseğe doğru artan hava hızlarının soğutma performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. 15 amperlik daha yüksek deşarj akımı altında ise batarya sıcaklıkları üzerindeki etkiler daha belirgin olacağından, sistemin termal tepkisini değerlendirmek amacıyla 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akış hızı kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalar esas olarak 2 borulu konfigürasyon üzerinde gerçekleştirilmiş ve özellikle yüksek akım değerleri için kritik eşik olan 10 amperlik akım altında batarya paketinin davranışı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu testler, aynı zamanda sayısal modellemelerde kullanılacak sınır koşullarının belirlenmesine önemli katkı sağlamıştır.

Sayısal simülasyon çalışmalarında ise daha geniş bir parametre aralığı ele alınmıştır. 10 amperlik deşarj akımı altında, tüm konfigürasyonlar için hava hızları 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s hava hızlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu geniş kapsamlı sayısal analizler ile hem boru sayısının hem de hava akış hızının batarya paketi üzerindeki termal etkileri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiş ve deneyisel verilerle karşılaştırmalı olarak model doğrulaması yapılmıştır.

Dışbükey dizilime sahip batarya paketleri için gerçekleştirilen çalışmalarda, ilk olarak sayısal simülasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında dışbükey dizilime sahip batarya paketine ait 1, 2 ve 3 borulu soğutma sistemleri ayrı ayrı modellenmiş ve zorlanmış hava akışı altında termal performansları değerlendirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, bakır borular batarya hücreleri arasına simetrik biçimde yerleştirilmiş olup, ısı transfer yüzey alanının artırılmasıyla sistemin soğutma verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Şekil 3.12 'de, dışbükey dizilime sahip batarya paketi için oluşturulan sayısal simülasyon modeline ait geometrik yerleşim ve boru konfigürasyonları görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 3.12. Dışbükey dizilim için ısı borulu soğutma modelleri

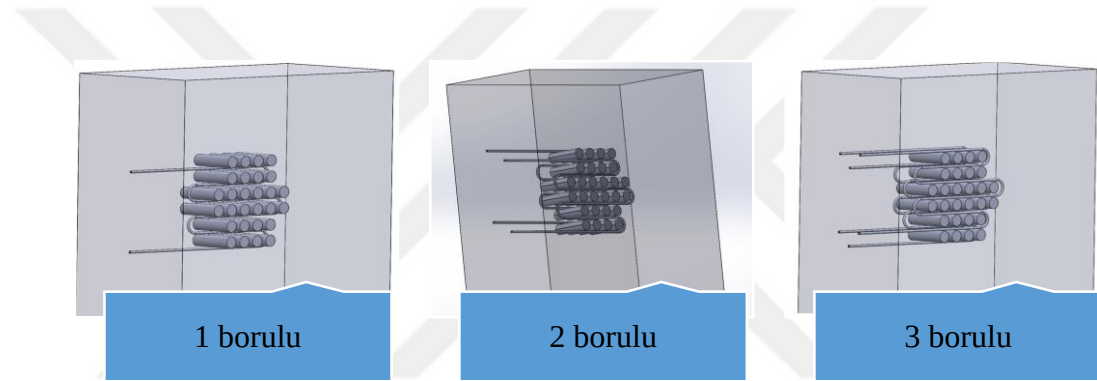
Simülasyon çalışmalarının ardından, dışbükey dizilime sahip batarya paketi için deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yalnızca 3 borulu soğutma sistemi fiziksel olarak imal edilerek test edilmiştir. Deneysel düzeneğin tasarımı, dışbükey yerleşim geometrisine uygun şekilde hazırlanmış ve batarya hücreleri arasına yerleştirilen üç adet bakır boru üzerinden hava akışı sağlanarak sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Deneysel veriler, sayısal modelin kalibrasyonu ve doğruluğunun değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır. Şekil 3.13’de, deneysel düzeneğe ait genel görünüm yer almakta olup, test sisteminin yapısı ve bileşenleri görsel olarak sunulmaktadır. Bu karşılaştırmalı çalışmalar sonucunda, boru sayısının artırılmasının dışbükey dizilimli batarya paketlerinde ısı dağılımı ve maksimum sıcaklık değerleri üzerindeki olumlu etkileri ortaya konmuş ve simülasyon ile deneysel veriler arasındaki uyum analiz edilmiştir.



Şekil 3.13. Üç borulu dışbükey dizilime sahip batarya paketi

Köşeli dizilimde, bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, merkezler arasındaki mesafeler hem yatay hem de dikey doğrultuda 25 mm olarak belirlenmiştir. Bataryalar, plakanın dört kenarına paralel şekilde konumlandırılmış ve geometrik merkezine göre simetrik bir dizilim sağlanmıştır. Köşeli dizilim için yapılan

çalışmalarda (şekil 3.14.), sayısal simülasyon analizleri 1, 2 ve 3 borulu soğutma sistemleri için ayrı ayrı gerçekteştirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, bakır borular batarya hücrelerinin yalnızca belirli bir kısmına temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu dizilimde, boruların yerleştirildiği alanlar ile batarya hücreleri arasındaki mesafeler diğer dizilimlere (üçgen, içbükey ve dışbükey) kıyasla daha geniş olduğundan, özellikle 1 borulu konfigürasyonda boru yalnızca tek bir katmana temas edebilmekte, dikey mesafeden dolayı diğer katmanlarla temas sağlanamamaktadır. Buna karşılık, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlarda borular alt ve üst katmanlara yerleştirilerek çift taraflı temas sağlanmış, böylece daha fazla batarya hücresine doğrudan temas ile ısı transfer yüzeyi artırılmıştır. Bu yerleşim, özellikle ısı dağılımının daha dengeli olması ve daha etkin bir soğutma performansı elde edilmesi açısından avantaj sağlaması düşünölmektedir.



şekil 3.14. Köşeli dizilim için ısı borulu soğutma modelleri

Deneysel çalışmalar, yalnızca 2 borulu soğutma konfigürasyonu için uygulanmış ve bu amaçla dizilime uygun özel bir test düzeneği hazırlanmışdır. şekil 3.15' de gösterilen bu deneysel düzende, batarya hücrelerinin yalnızca bir tarafına temas eden iki adet bakır boru yerleştirilmiştir. Yerleşim geometrisi gereği, bir boru batarya dizisinin alt kısmından, diğer boru ise üst kısmından karşılıklı olarak yerleştirilmiş, böylece hücrelerin yalnızca birer yüzeyine temas sağlanabilmışdır. Bu temas düzeni, boruların yalnızca tek taraflı soğutmaya imkan tanıdığı sınırlı bir yüzey alanı oluşturmuş; ancak boruların karşılıklı olarak yerleştirilmesiyle sıcaklık dağılımları gözlemlenebilecektir. Elde edilen deneysel veriler, köşeli dizilime ait sayısal simülasyonların kalibrasyonu ve doğrulanması amacıyla temel alınmış, simülasyon sonuçları ile birlikte değerlendirilerek boru sayısının sistemin termal performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.15. İki borulu köşeli dizilime sahip batarya paketi

Köşeli dizilime sahip batarya paketleri için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, batarya hücreleri üzerine uygulanan soğutma performansını değerlendirebilmek amacıyla farklı hava akış hızlarında testler yapılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan 2 borulu soğutma sisteminde, bakır borular içerisine belirli hızlarda hava akışı sağlanmış ve sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleri ile kaydedilmiştir. Bu kapsamda, 10 amperlik deşarj akımı altında sırasıyla 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızları uygulanarak soğutma performansı gözlemlenmiştir. 15 amperlik daha yüksek deşarj akımı altında ise batarya hücrelerinde daha belirgin sıcaklık artışları beklendiğinden, sistemin termal tepkisini analiz edebilmek amacıyla 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akış hızı kullanılmıştır.

Sayısal simülasyon çalışmaları, deneysel verilerle desteklenerek daha geniş bir parametre aralığında gerçekleştirilmiştir. 10 amperlik sabit deşarj akımı altında, 1, 2 ve 3 borulu soğutma konfigürasyonları için hava hızları 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s olacak şekilde analizler yürütülmüştür. Bu kapsamlı sayısal analizlerle, hem boru sayısının hem de hava akış hızının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiş; elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, bütün tasarım geometrileri için (üçgen, içbükey, dış bükey ve köşeli dizilim) ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu sayısal analizlerde, boru içi hava akışı için Reynolds sayısı hesaplanmış (denklem 3.1) ve akış rejimi değerlendirilmiştir. Bu hesaplamalarda, deneylerin 25–30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiği göz önünde bulundurularak, havanın termofiziksel özellikleri sabit

kabul edilmiştir. Buna göre, 25 °C sıcaklıkta yoğunluk $1,184 \text{ kg/m}^3$, dinamik viskozite $1,85 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ve kinematik viskozite $1,56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınmıştır. Boru çapı 2 mm olan sistemde, 5–20 m/s aralığındaki hız değerleri için elde edilen Reynolds sayıları 659 ile 2636 arasında değişmektedir. Bu değerler, literatürde iç akışlar için kabul edilen sınır değerlere göre laminar rejimde yer almakta olup, 2300 değerine yaklaşıldığında akış geçiş rejimine girmektedir. Teorik olarak laminar akış rejimi söz konusu olup, sistemde giriş etkileri, kesit değişimleri ve fan kaynaklı akış bozulmaları gibi fiziksel nedenlerle yerel düzensizlikler oluşabilse de, bu çalışmada sayısal çözümler laminar akış kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmış ve akışkan, sıkıştırılmaz, sabit yoğunluklu ve Newton tipi akış olarak kabul edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan düzenek, batarya paketinin termal performansını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla tasarlanmış olup, farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil 3.16 'da gösterilen düzenek şu bileşenlerden oluşmaktadır: Batarya paketinin yer aldığı şartlandırma ünitesi (1), deneylerin kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Akım ve voltaj değerlerinin izlenmesi için kullanılan akım gösterge paneli (2), batarya paketine uygulanan akım yüklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Ayarlanabilir akım deşarj cihazı (3), batarya paketine farklı akım yükleri (10 – 15 A) uygulanmasını sağlayarak termal performansın farklı çalışma koşullarında değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Batarya paketindeki sıcaklık dağılımını ölçmek için kullanılan termokupllar, data-logger (4) cihazına bağlanmış ve sıcaklık verilerinin doğru bir şekilde kaydedilmesi sağlanmıştır. Deneylerde boru içindeki hava akışını sağlamak amacıyla kullanılan 200 litrelik pistonlu kompresör (5), sisteme sabit bir hava akışı sağlamış; çıkış ucuna yerleştirilen ayarlanabilir vana ile hava akış hızının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tüm deneysel veriler, verilerin kaydedilmesinde kullanılan bilgisayar (6) aracılığıyla toplanmış ve analiz edilmiştir. Bu düzenek, batarya paketinin termal yönetim sisteminin performansını değerlendirmek ve sayısal simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmak için kapsamlı bir altyapı sunmaktadır.



Şekil 3.16. Isı borulu deney düzeneği ve kullanılan ekipmanlar

Test edilen batarya paketi, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip olup, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilim konfigürasyonlarında incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak üçgen dizilim üzerinde kapalı sistem ve doğal taşınım koşullarında deneysel testler gerçekleştirilmiş, bu testler sonucunda yalnızca doğal taşınımın yeterli bir soğutma sağlamadığı gözlemlenerek sistemde zorlanmış taşınım geçilmesi gerekliliği ortaya konmuştur. Zorlanmış taşınım koşulları altında üçgen dizilim için 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 ve 15 amper olmak üzere farklı akım seviyelerinde deneyler gerçekleştirilmiş, yapılan analizler sonucunda 10 A akım değeri, sistemin kritik akım eşiği olarak belirlenmiştir. Bu eşik değer esas alınarak, diğer dizilim (içbükey, dışbükey ve köşeli) konfigürasyonları olan içbükey, dışbükey ve köşeli paket yapıları için sayısal analizler ve ardından deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Geliştirilen test düzeneği, farklı dizilim geometrileri ve ısı borulu soğutma sistemlerine sahip batarya paketlerinin termal performanslarını kıyaslamaya imkân tanıyacak şekilde tasarlanmış olup, sistemin tamamı kontrollü bir test ortamında çalışacak biçimde entegre edilmiştir. Çalışmada, her bir dizilim geometrisi için farklı sayıda ısı borusu kullanılarak deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Üçgen dizilimde 1 adet ısı borusu, içbükey dizilimde 2 adet, dışbükey dizilimde 3 adet ve köşeli dizilimde ise 2 adet ısı borusu entegre edilerek sistemin soğutma performansı değerlendirilmiştir. Hem doğal taşınım hem de ısı borulu soğutma koşullarını sağlayabilecek esnekliğe sahip bu düzenek, yüksek doğrulukla sıcaklık ölçümleri yapabilen sensörlerle donatılmış ve tüm veri toplama işlemleri hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Böylece hem sayısal hem de deneysel analizlerde güvenilir,

tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu kapsamlı altyapı sayesinde, batarya dizilim geometrileri ile ısı borulu soğutma sistemlerinin termal performans üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve bir sonraki bölümde sunulacak olan sonuçlar kısmına geçiş yapılmıştır.

3.3. Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Üçüncü aşamada, aktif bir soğutma yöntemi olan sıvı soğutmalı sistem geliştirilmiş ve batarya paketinin termal yönetiminde kullanılmıştır. Bu sistemin tasarımında, daha önce kullanılan ısı borulu sistemdeki bakır borular korunmuş, yalnızca bu boruların içerisinden geçen akışkan değiştirilmiştir. Sıvı soğutmalı sistemin performans değerlendirmesi kapsamında iki farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır: saf su ve etilen glikol bazlı antifriz. Her iki akışkan sistemde ayrı ayrı kullanılmış olup, herhangi bir karıştırma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Tüm deneysel çalışmalarda akışkanın giriş sıcaklığı 25–30 °C aralığında sabit tutulmuştur. Soğutma boruları, batarya hücreleriyle doğrudan temas sağlayacak şekilde hücre dizilimleri arasındaki boşluklara yerleştirilmiştir. Böylece ısı, batarya hücrelerinden bakır borulara iletilmiş ve ardından bu borular aracılığıyla dolaşan sıvı akışkana aktarılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca soğutma yöntemi ve iç akışkanın değiştirilmesinden kaynaklanan performans farklılıkları güvenilir bir şekilde ölçülebilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen sıvı soğutmalı sistemlerin tasarımında, batarya hücrelerinin yerleşim geometrileri; hava soğutmalı ve ısı borulu sistemlerde kullanılan dizilimlerle birebir uyumlu olacak şekilde yapılandırılmıştır. Isı borulu düzeneklerdeki yerleşim esas alınarak oluşturulan bu sistemlerde, hücrelerin kompakt yerleşimi korunmuş ve her dizilim için uygun sayıda soğutma kanalı entegre edilmiştir. İlk olarak, üçgen dizilimde batarya hücreleri eşkenar üçgen formunda, plaka üzerine simetrik ve kompakt bir biçimde yerleştirilmiştir. Bu yerleşim, hem mekanik stabiliteyi sağlamakta hem de hücreler arasında verimli bir ısı transfer yüzeyi oluşturmaktadır. Üçgen yapıya sahip sistemde, bir adet bakır soğutma kanalı hücre katmanları arasına entegre edilmiştir. İçbükey dizilimde ise batarya hücreleri içe doğru kavisli bir düzende yerleştirilmiş, bu konfigürasyona uyumlu olarak iki adet bakır soğutma kanalı sisteme entegre edilmiştir. Yerleşim, hücreler arası kompakt yapıyı koruyacak şekilde tasarlanmış; böylece sıvı akışkanın tüm hücre yüzeyleriyle etkili biçimde temas etmesi sağlanmıştır. Dışbükey dizilimde batarya hücreleri dışa doğru kavisli bir geometriyle yerleştirilmiş ve bu yapıya

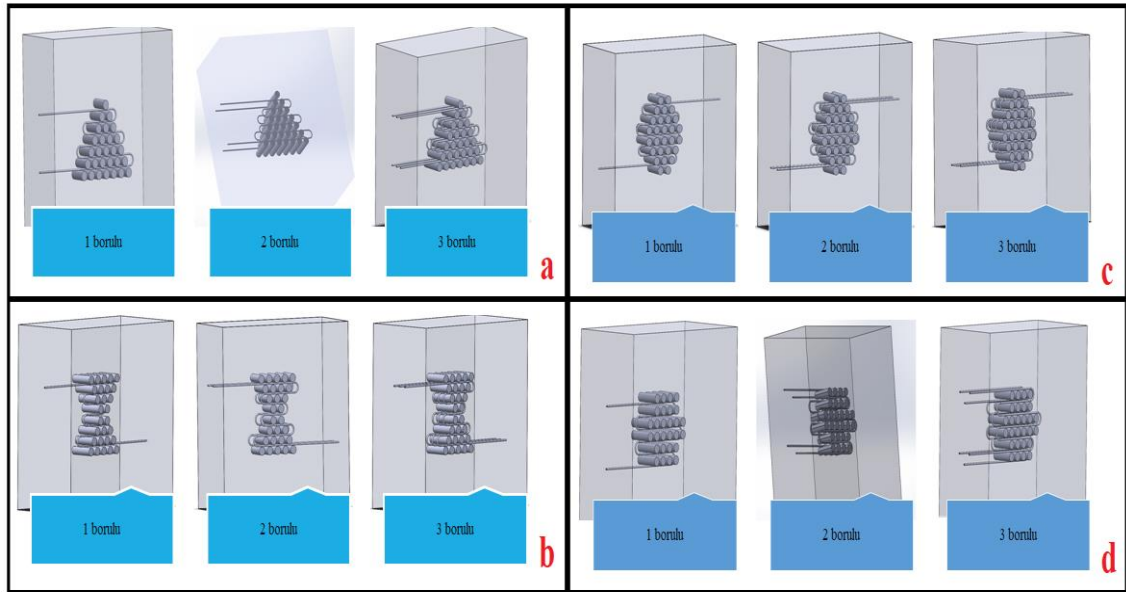
üç adet bakır soğutma kanalı entegre edilmiştir. Hücrelerin bu şekilde konumlandırılması, akışkanın daha geniş bir yüzeyle temas etmesine olanak tanımış; dolayısıyla ısı transfer yüzeyinin artırılması yoluyla termal performansın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Son olarak, köşeli dizilimde batarya hücreleri belirli açılarla yönlendirilerek keskin kenarlı bir yerleşim oluşturacak şekilde plaka üzerine konumlandırılmıştır. Bu düzenlemede iki adet bakır soğutma kanalı, hücre katmanları arasına entegre edilmiştir. Bütün dizilimlerde (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) tutarlılık sağlanması amacıyla kanal çapları sabit tutulmuş ve sıvı akışına uygun yapı korunmuştur. Tüm bu dört farklı geometriye sahip dizilimlerde (Şekil 3.17), iç çapı 2 mm ve dış çapı 3 mm olan bakır malzemeden üretilmiş soğutma kanalları kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Dizilimlere ait sıvı soğutma deney düzenekleri

Sayısal simülasyon çalışmalarında, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlere sahip sıvı soğutmalı sistemler için 1, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlar modellenmiş ve soğutma kanalı sayısının termal performans üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir (Şekil 3.18). Tüm dizilim türlerinde, bakırdan imal edilen soğutma kanalları batarya hücreleri arasına yerleştirilmiş olup, bu kanallar içinden su ve antifriz gibi soğutucu akışkanların dolaşabileceği şekilde sistemler tasarlanmıştır. Üçgen dizilimde, batarya hücreleri eşkenar üçgen formunda yerleştirilmiş olup, bu yapı için bir borulu

sistem fiziksel olarak imal edilerek deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından aynı dizilim için iki ve üç borulu konfigürasyonlar yalnızca sayısal ortamda modellenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İçbükey dizilimde, hücreler içe kavisli bir yapıda konumlandırılmış, bu dizilimde iki borulu sistem deneysel olarak test edilmiştir. Sayısal simülasyonlarda ise aynı dizilim için bir, iki ve üç borulu konfigürasyonlar modellenerek kanal sayısının sıcaklık dağılımı ve soğutma performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Dışbükey dizilimde, batarya hücreleri dışa doğru kavisli bir formda yerleştirilmiş olup, bu yapı üzerinde üç borulu sistem deneysel olarak uygulanmıştır. Aynı yapı için bir, iki ve üç borulu sistemler ise sayısal olarak modellenmiştir. Bu analizlerde, özellikle kanal sayısının artmasının yüzeysel soğutma etkinliği üzerindeki katkısı detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Köşeli dizilimde ise batarya hücreleri belirli açılarla yönlendirilerek keskin kenarlı bir yapı oluşturacak biçimde konumlandırılmış ve bu yapı için iki borulu sistem deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyonlar kapsamında ise bir, iki ve üç borulu konfigürasyonlar modellenmiş ve her bir yapıdaki termal dağılımlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.18. a. Üçgen b. İçbükey c. dışbükey d. köşeli dizilim sıvı soğutma tasarımları

Sonuç olarak, tüm dizilim türlerinde hem deneysel hem de sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamlı deneysel ve sayısal analizler sonucunda, kanal sayısındaki artışın batarya yüzey sıcaklıklarını düşürme, sıcaklık dağılımını

homojenleştirme ve maksimum sıcaklığı kontrol etme açısından önemli avantajlar sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlere sahip batarya paketleri için gerçekleştirilen sıvı soğutmalı deneysel çalışmalar kapsamında, batarya hücrelerinin termal performansı farklı debi koşulları altında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Deney düzeneğinde kurulan pompa sistemi aracılığıyla soğutma kanalları içerisinde kontrollü sıvı akışı sağlanmış ve batarya yüzey sıcaklıkları hassas ölçüm sistemleriyle sürekli olarak izlenmiştir. Soğutucu akışkan olarak saf su ve antifriz kullanılmış; 10 A ve 15 A sabit deşarj akımı altında çeşitli debi değerleri uygulanarak düşük ve orta seviyeli akış koşullarının soğutma performansına etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalar kapsamında, su için 0,188–1,128 lt/dk, antifriz için ise 0,188–0,75 lt/dk aralığında debi değerleri test edilmiştir. Sayısal simülasyon çalışmaları, deneysel koşullarla uyumlu olacak şekilde 10 A deşarj akımı altında yürütülmüştür. Simülasyonlarda kanal sayısının termal performans üzerindeki etkisi incelenmiş olup, tek, çift ve üç borulu konfigürasyonlar modellenmiştir. Her bir modelde soğutucu akışkan debisi farklı aralıklarda değerlendirilmiştir. Tek ve çift borulu sistemlerde, her bir boru için 0,188–1,88 lt/dk aralığında analizler gerçekleştirilmiş; üç borulu konfigürasyonda ise her kanal için 0,19–0,94 lt/dk aralığında debi değerleri kullanılmıştır.

Reynolds sayısının hesaplanmasında, sıvı soğutmalı BTMS’ de kullanılan saf su ve antifriz için belirlenen akış hızları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar, 25–30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiş olup, bu sıcaklık aralığında akışkanların termofiziksel özelliklerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 25 °C sıcaklıkta saf su için yoğunluk 997 kg/m³, dinamik viskozite $8,9 \times 10^{-4}$ Pa·s ve kinematik viskozite $8,93 \times 10^{-7}$ m²/s; antifriz için ise yoğunluk 1.065 kg/m³, dinamik viskozite $2,78 \times 10^{-3}$ Pa·s ve kinematik viskozite $2,61 \times 10^{-6}$ m²/s olarak alınmıştır (Çengel vd., 2019). Reynolds sayısı, akışkanların silindirik boru kesiti içerisinde geçerken karşılaştığı akış rejiminin belirlenmesi amacıyla, karakteristik uzunluk olarak boru çapı ve ilgili ortalama hız değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan hesaplama Denklem 3.1’de verilmiş olup, boru çapı 2 mm olan düzende uygulanan farklı debi koşullarına göre Reynolds sayıları elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, saf su için Reynolds sayıları 2.240 ile 22.400 arasında değişmekte olup, 0,188 lt/dk debide akış geçiş rejiminin sınırında yer almakta, 0,376 lt/dk ve üzeri debilerde ise akış türbülanslı rejime geçmektedir. Buna karşılık, antifriz için daha yüksek viskoziteye bağlı

olarak elde edilen Reynolds sayıları 765 ile 7.650 aralığında gerçekleşmiştir. Bu durumda, 0,564 lt/dk debi değerine kadar akış laminar ya da geçiş rejiminde kalmakta, 0,752 lt/dk ve üzeri debilerde ise türbülanslı akış gözlemlenmektedir. Sayısal simülasyon çalışmaları kapsamında, saf su için tüm debi aralıklarında sınır bölgesi de dâhil olmak üzere türbülanslı akış modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle geçiş rejiminde ortaya çıkabilecek mikroskobik girdapların ve ısı transferindeki değişkenliklerin modellenmesini sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Antifriz akışkanı için ise 0,188 ve 0,376 lt/dk debilerinde laminar akış modeli, daha yüksek debilerde ise türbülanslı akış modeli kullanılmıştır. Böylece her akış koşulu için uygun fiziksel modelleme yaklaşımı benimsenmiş ve sonuçların doğruluğu artırılması amaçlanmıştır. Bu analizler göstermektedir ki, düşük debi değerlerinde hem su hem de antifriz için laminar veya geçiş rejimi etkili olmakta; ancak etkin ısı transferi ve termal performansın artırılması amacıyla türbülanslı akış rejimine ulaşılması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Özellikle saf su kullanılan durumlarda daha düşük debilerde dahi türbülans rejimine geçilebilmesi, viskozitenin akış rejimine etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen sayısal modelleme çalışmaları, deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmış ve modelin doğruluk seviyesi yüksek bulunmuştur. Sayısal analizler sonucunda, batarya paketlerinin etkin bir şekilde soğutulabilmesi için en uygun debi aralıkları ve kanal konfigürasyonları tanımlanmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, içbükey, dışbükey ve köşeli hücre dizilimlerine sahip deney düzeneği optimize edilmiş ve sayısal analizlerde elde edilen sonuçların geçerliliğini desteklemek amacıyla deneysel uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan sıvı soğutmalı deney düzeneği, batarya paketinin termal performansını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla tasarlanmış olup, çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil 3.19’da gösterilen düzenek aşağıdaki temel bileşenleri içermektedir: (1) Batarya paketinin yer aldığı şartlandırma ünitesi, deneylerin sabit ve kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. (2) Akım ve voltaj değerlerinin izlenmesini sağlayan gösterge paneli, batarya paketine uygulanan akım yüklerinin hassas bir şekilde kontrolüne olanak tanımaktadır. (3) Ayarlanabilir akım deşarj cihazı, batarya paketine farklı akım yükleri (10–15 A) uygulanmasını mümkün kılarak, termal performansın farklı çalışma koşullarında değerlendirilmesine imkân sunmaktadır. (4) Sıcaklık dağılımını ölçmek amacıyla batarya yüzeyine ve sıvı giriş-çıkış noktalarına yerleştirilen termokupllar, datalogger cihazına bağlanarak sıcaklık verilerinin doğru ve kesintisiz biçimde kaydedilmesi sağlanmıştır. (5) Sıvı akışını sağlayan pompa

sistemi, soğutma kanallarından geçen sıvının dolaşımını gerçekleştirmekte olup, pompalara entegre edilen dimmer devresi sayesinde akış hızı ayarlanabilmektedir. (6) Soğutucu sıvının depolandığı sıvı haznesi, sistemin kararlı çalışmasını sağlamaktadır. Depo çıkışına yerleştirilen ayarlanabilir vana ile sıvı debisi kontrol edilmektedir. (7) Tüm deneysel veriler, veri toplama ünitesi ve bilgisayar aracılığıyla kayıt altına alınmış, analiz edilmek üzere uygun formatta saklanmıştır. Bu deney düzeneği, sıvı soğutmalı BTMS performansını değerlendirmek ve elde edilen verileri sayısal simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmak için kapsamlı bir altyapı sunmaktadır.



Şekil 3.19. Sıvı soğutma deney düzeneği ve kullanılan ekipmanlar

Bu çalışmada, 4 farklı hücre dizilimine sahip ve her biri 28 adet lityum-iyon batarya hücresinden oluşan batarya paketlerinin, sıvı soğutmalı (su ve antifriz) koşullar altında üç boyutlu CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin doğruluğunu artırmak ve hesaplama verimliliğini sağlamak amacıyla çeşitli mühendislik varsayımlarına başvurulmuştur. Batarya hücreleri, sabit ve homojen ısı üreten hacim kaynakları olarak modellenmiş; hücreler arası lokal ısı üretim farklarının sistemin genel sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Soğutucu akışkan

olarak kullanılan su ve etilen glikol bazlı antifriz, sıkıştırılmaz, Newton tipi akışkanlar olarak modellenmiş ve her biri için yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi termofiziksel özellikler sabit varsayılmıştır. Bu yaklaşım, analiz kapsamında değerlendirilen sıcaklık aralığında bu akışkanların özelliklerindeki değişimin ihmal edilebilir olduğu kabulüne dayanmaktadır. Geometrik modellemede, batarya modülüne ait bağlantı elemanları, taşıyıcı yapılar ve diğer yardımcı bileşenler sistemin genel termal ve akışkan davranışı üzerindeki etkilerinin ikinci dereceden olduğu varsayılarak modele dâhil edilmemiştir. Ayrıca, deney düzeneğinde sağlanan şartlandırma ortamı referans alınarak dış ortamla ısı alışverişi olmayacak şekilde tüm sınır yüzeyleri adyabatik kabul edilmiş ve yalnızca iç hacim içerisindeki akışkan alan çözüme dâhil edilmiştir. Giriş sıcaklığı ve dış ortam basıncı sabit tutulmuş, böylece kararlı sınır koşulları altında elde edilen deneysel verilerle uyumlu bir çözüm ortamı sağlanması hedeflenmiştir. Bu varsayımlar doğrultusunda elde edilen CFD sonuçlarının, sistemin gerçek termal davranışını yüksek doğrulukla yansıtmaları beklenmektedir.

Elde edilen deneysel ve sayısal veriler doğrultusunda, farklı dizilimlerde sıvı soğutmalı sistemlerin sıcaklık kontrol performansları değerlendirilmiştir. Maksimum sıcaklık, sıcaklık dağılımı ve sıcaklık farkı gibi kriterler temel alınarak, hem su hem de antifriz içeren sıvı ile elde edilen soğutma etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Aynı yapısal sistemin yalnızca iç akışkan türü ve debi değerleri değiştirilerek yapılan analizler, sıvı soğutmalı sistemin özellikle yüksek ısı üretim senaryolarında sağladığı avantajları açıkça ortaya koymuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilim geometrilerine sahip batarya paketleri için yürütülen sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Elde edilen veriler, her bir dizilim konfigürasyonunun termal performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sağlamıştır. Termal analizler; sıcaklık dağılımları, maksimum hücre sıcaklıkları ve sıcaklık gradyanları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, üçgen dizilim hem doğal hem de zorlanmış taşınım koşullarında test edilmiş, bu doğrultuda geliştirilen ve doğrulanan sayısal model, diğer dizilim geometrilerine uygulanmıştır. İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlerde ise sayısal analiz sonuçlarına göre en iyi performans gösteren soğutma konfigürasyonları seçilmiş ve bu konfigürasyonlar deneysel olarak test edilerek analizlerin doğruluğu teyit edilmiştir. Elde edilen bulgular, batarya paketinde tercih edilecek dizilim geometrisinin, termal yönetim stratejileri açısından belirleyici bir unsur olduğunu göstermekte olup, bu farklılıklar ilerleyen alt başlıklarda sayısal verilerle desteklenerek ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

4.1. Hava Soğutma Bulguları

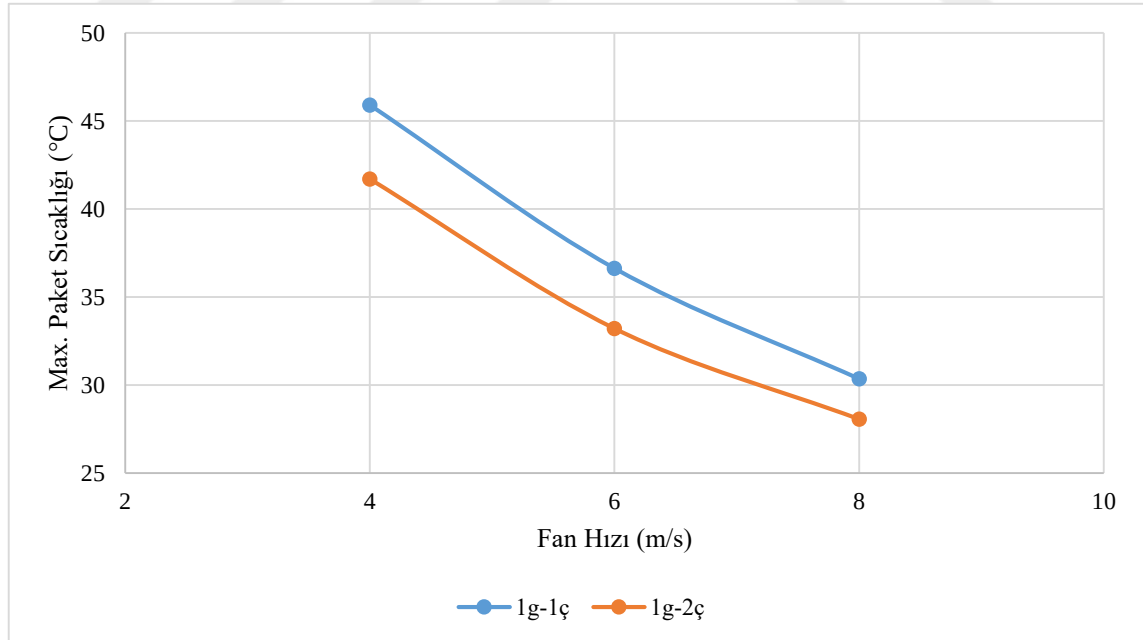
Hava soğutmalı termal yönetim sistemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizler sonucunda zorlanmış taşınıma dayalı bu sistemde, farklı dizilim geometrilerine sahip batarya paketlerinin hava akışı altındaki termal tepkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Fan konumu, giriş/çıkış yönleri ve çıkış fanı kullanımı gibi parametrelerin etkisi değerlendirilerek, her bir konfigürasyonun sıcaklık kontrolüne olan katkısı analiz edilmiştir. Özellikle zorlanmış konveksiyonun sağlandığı koşullarda, maksimum hücre sıcaklıkları ve hücreler arası sıcaklık farkları minimize edilerek sistemin termal homojenliği iyileştirilmeye çalışılmıştır. Hava akış hızının artırılmasıyla birlikte bazı dizilimlerde belirgin performans artışları gözlemlenirken, diğerlerinde akış yönüne bağlı türbülans etkisiyle soğutma verimliliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, hava soğutmalı sistemlerde hem dizilim geometrisinin

hem de hava yönlendirme stratejisinin, termal denge ve güvenli çalışma koşulları açısından etkili olduğunu göstermektedir.

4.1.1. Üçgen dizilim hava soğutma bulguları

4.1.1.1. Üçgen dizilim deneysel bulgular

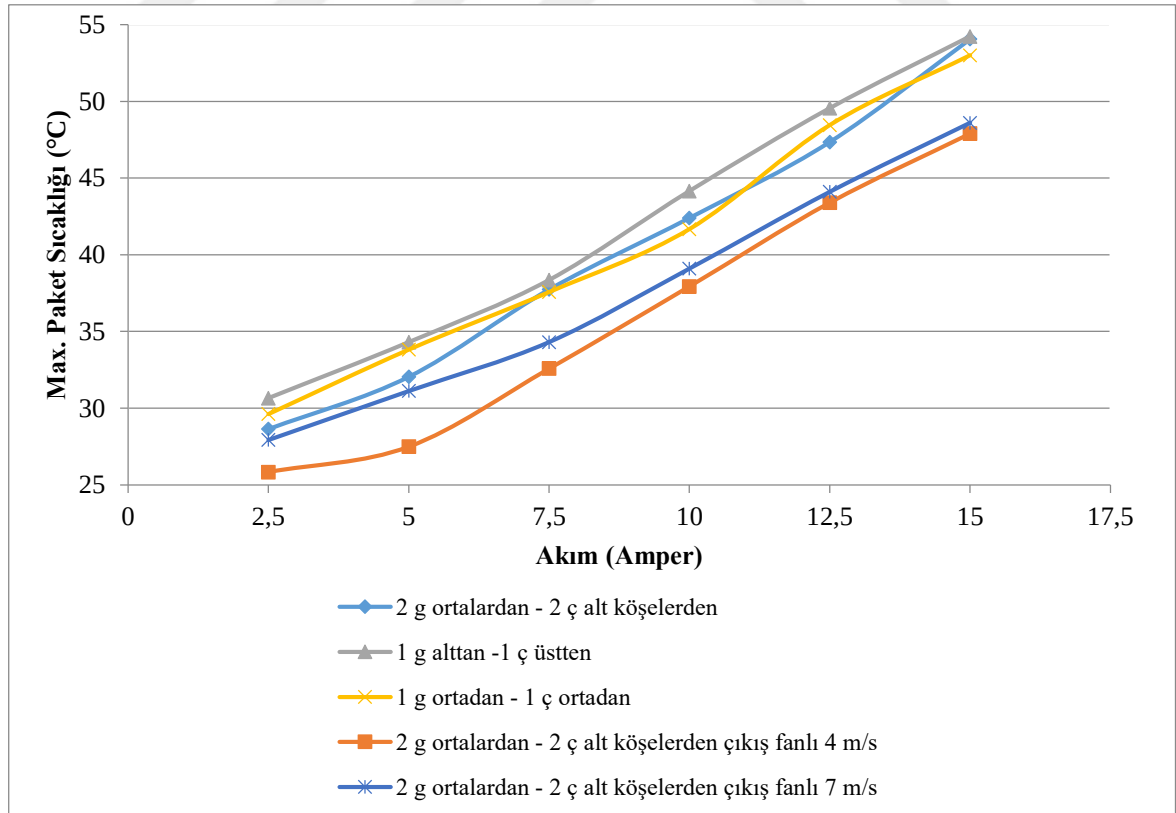
Üçgen dizilime sahip batarya paketinin optimum sıcaklık aralığında tutulması ve hücreler arası homojen sıcaklık dağılımının sağlanmasında, düşük akım değerlerinde (< 5 A) doğal taşınımın yeterli olduğu görülmüştür. Yapılan ön testlerde yüksek akım değerlerine ulaşıldığında (> 10 A), doğal taşınımın yetersiz kaldığı tespit edilmiş ve bu nedenle zorlanmış taşınımına geçilmiştir. Bu kapsamda, 10 A akım altında gerçekleştirilen ilk deneysel çalışmalarda (Şekil 4.1.), fan destekli hava soğutma sisteminin farklı çıkış konfigürasyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. "1 giriş – 1 çıkış" (1g – 1ç, ortadan giriş–ortadan çıkış) ve "1 giriş – 2 çıkış" (1g – 2ç, ortadan giriş–alt köşelerden çıkış) düzenlemeleri için fan hızı değişiminin maksimum hücre sıcaklığı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1. 10 A akımda fan hızı ve konum değişiminin maksimum batarya paket sıcaklığına etkisi

Her iki konfigürasyonda da fan hızının artmasıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinde anlamlı bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak, 1g – 2ç konfigürasyonu tüm fan hızlarında 1g – 1ç konfigürasyonuna kıyasla daha düşük sıcaklık değerleri sunarak daha etkili bir soğutma performansı sergilemiştir. Özellikle düşük fan hızlarında (0 – 4 m/s), 1g – 2ç konfigürasyonu 3–5 °C daha düşük sıcaklıklar elde edilmesini sağlamış, yüksek fan hızlarında ise bu fark azalmış olmakla birlikte 1g – 2ç konfigürasyonunun üstünlüğü korunmuştur. Bu bulgular, 1g – 2ç düzenlemesinin daha verimli bir hava akışı ve ısı dağılımı sağladığını göstermekte olup, özellikle yüksek akım altında çalışan sistemlerde bu konfigürasyonun tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çıkış sayısının artırılması ve hava sirkülasyonu açısından uygun konuma yerleştirilmesi batarya paketinde daha verimli bir hava akışı ve düşük sıcaklık değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

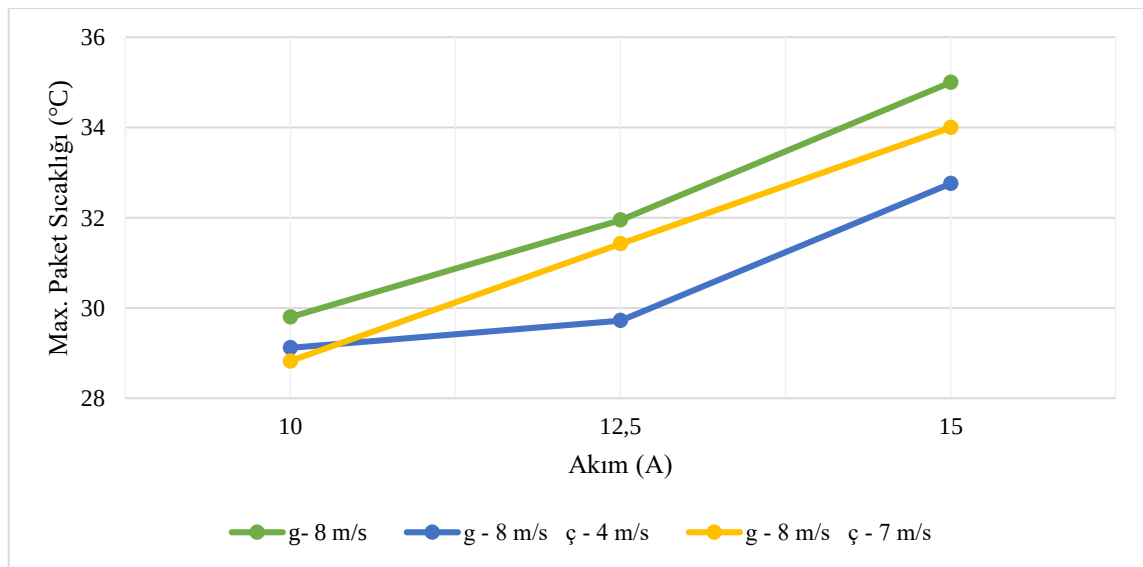
Şekil 4.2. 'de, 4 m/s sabit fan hızında maksimum sıcaklık değerlerinin hava akış hızına göre değişimi gösterilmektedir. Bu grafik, farklı fan konfigürasyonlarının maksimum sıcaklık üzerindeki etkilerini, akım (amper) artışıyla birlikte detaylı bir şekilde incelemektedir.



Şekil 4.2. Hava akış hızının 4 m/s olması durumunda farklı konfigürasyonlarda maksimum sıcaklık - akım değişimi

Akım arttıkça tüm konfigürasyonlarda maksimum sıcaklık artışı gözlemlenmekte, ancak çıkış fanı kullanımı ve fan hızının artırılması bu sıcaklık artışını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Çıkış fanı olmayan durumlarda, özellikle "1 giriş ortadan – 1 çıkış ortadan" ve "1 giriş alttan – 1 çıkış üstten" konfigürasyonlarında, sıcaklık değerleri daha yüksek seyrederken, çıkış fanlı durumlarda ("2 giriş ortaldan – 2 çıkış alt köşelerden çıkış fanlı 4 m/s" ve "7 m/s") sıcaklıklar belirgin şekilde daha düşüktür. Çıkış fanının kullanılması soğutma performansını ciddi oranda iyileştirmiştir. "Ancak 7 m/s çıkış fan hızında, yüksek hava akış hızının oluşturduğu süpürme etkisi nedeniyle (hava akışının sistemi çok hızlı terk etmesi sonucu havanın yeterince süre sistemde kalamaması ve bu nedenle ısı transferinin tam olarak gerçekleşmemesi), sıcaklık değerleri 4 m/s çıkış fan hızına kıyasla bir miktar daha yüksek kalmaktadır. Ayrıca, "2 giriş ortaldan – 2 çıkış alt köşelerden" konfigürasyonu, çıkış fanı olmaksızın dahi diğer konfigürasyonlara göre daha düşük sıcaklık değerleri sağlamaktadır, bu da fan yerleşiminin soğutma performansı üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, artan akımın neden olduğu ısınmayı kontrol altına almak için fan konfigürasyonu, çıkış fanı kullanımı ve fan hızının optimize edilmesinin termal yönetim açısından hayati önem taşıdığını göstermektedir.

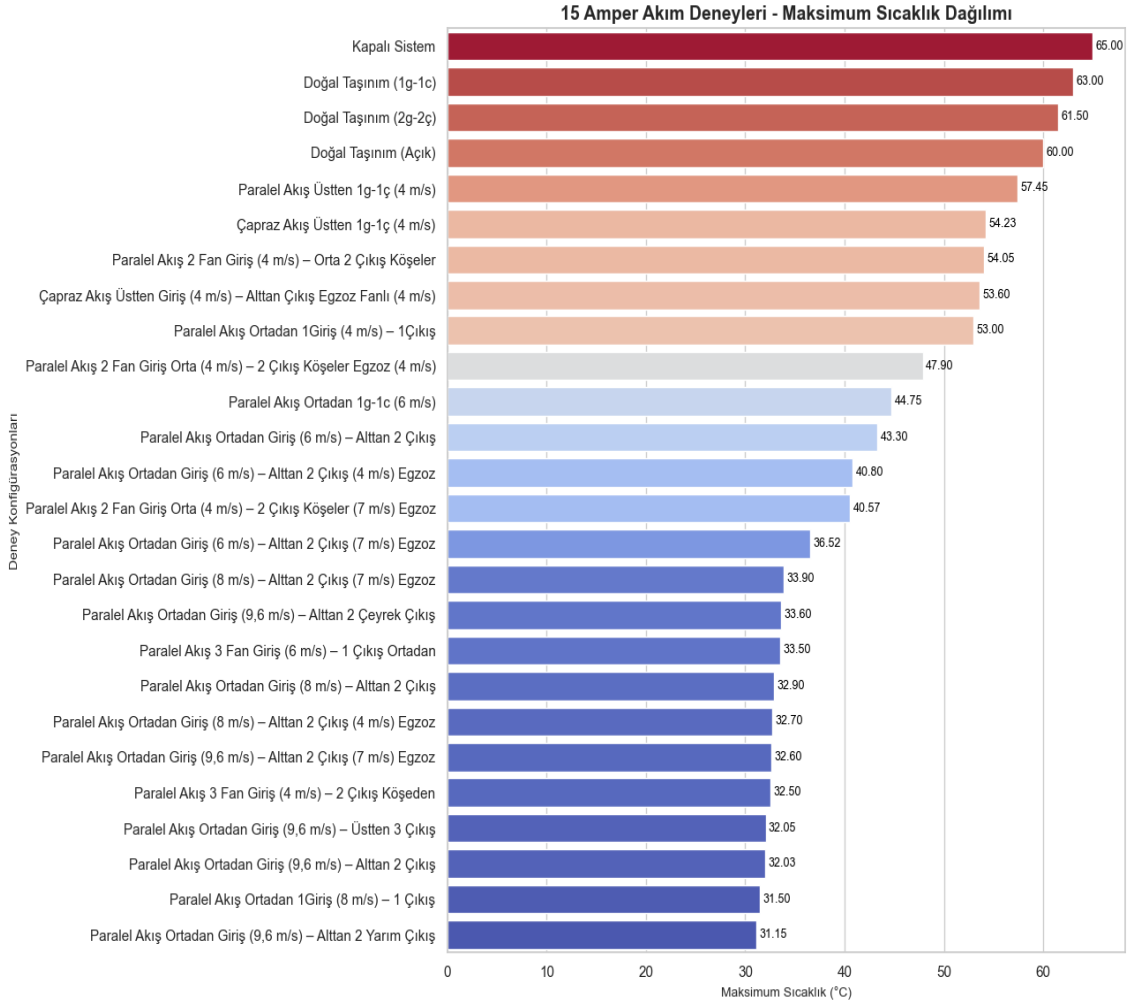
Şekil 4.3. 'de, 8 m/s hava giriş hızına sahip sistemde maksimum sıcaklık ile akım arasındaki ilişki ve farklı çıkış fan hızlarının (çıkış fanı olmaması, 4 m/s ve 7 m/s) soğutma performansı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Bu analizde, "1 giriş – 2 çıkış" (1g – 2ç, ortadan giriş – alt köşelerden çıkış) düzenlemesine sahip bir yapı incelenmiş ve çıkış fanı kullanımının sıcaklık dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 4.3. 8 m/s hava akış hızında maksimum sıcaklık - akım değişimi

Çıkış fanı olmayan durumda, maksimum sıcaklık değerleri en yüksek seviyede olup, 10 A'da yaklaşık 30 °C, 15 A'da ise yaklaşık 35 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum, hava giriş hızının tek başına yeterli bir soğutma etkisi sağlamadığını ortaya koymaktadır. 4 m/s çıkış fan hızında ise, hava tahliyesinin daha dengeli gerçekleşmesi nedeniyle maksimum sıcaklık değerleri en düşük seviyede gözlemlenmiştir. Bu durumda, 10 A'da sıcaklık yaklaşık 29 °C, 15 A'da ise yaklaşık 33 °C seviyesindedir. 7 m/s çıkış fan hızında ise içeride oluşan süpürme etkisi nedeniyle sıcaklık, 4 m/s çıkış fan hızına göre daha yüksek (10 A'da yaklaşık 29 °C, 15 A'da yaklaşık 34 °C), ancak çıkış fanı olmayan duruma göre daha düşüktür. Bu, 7 m/s çıkış fan hızının içerideki hava akışını artırarak soğutmayı iyileştirdiğini, ancak bu süpürme etkisinin hava giriş hızının sağladığı doğal soğutma performansını bir miktar sınırlandırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, çıkış fan hızının doğru şekilde optimize edilmesi, hem sıcaklık kontrolü hem de genel soğutma performansı açısından kritik bir öneme sahiptir.

15 Amper akım değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada (Şekil 4.4.), öncelikle BTMS kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Referans noktası olarak kabul edilen kapalı sistem konfigürasyonunda maksimum sıcaklık değeri 65 °C olarak gözlemlenmiştir. Doğal taşınım yöntemlerinin uygulanmasıyla sıcaklık değerlerinde belirgin düşüşler elde edilmiştir: tek giriş-çıkışlı (1g-1ç) düzende 63 °C, çift giriş-çıkışlı (2g-2ç) düzende 61,5 °C ve açık sistem konfigürasyonunda 60 °C seviyelerine ulaşılmıştır.

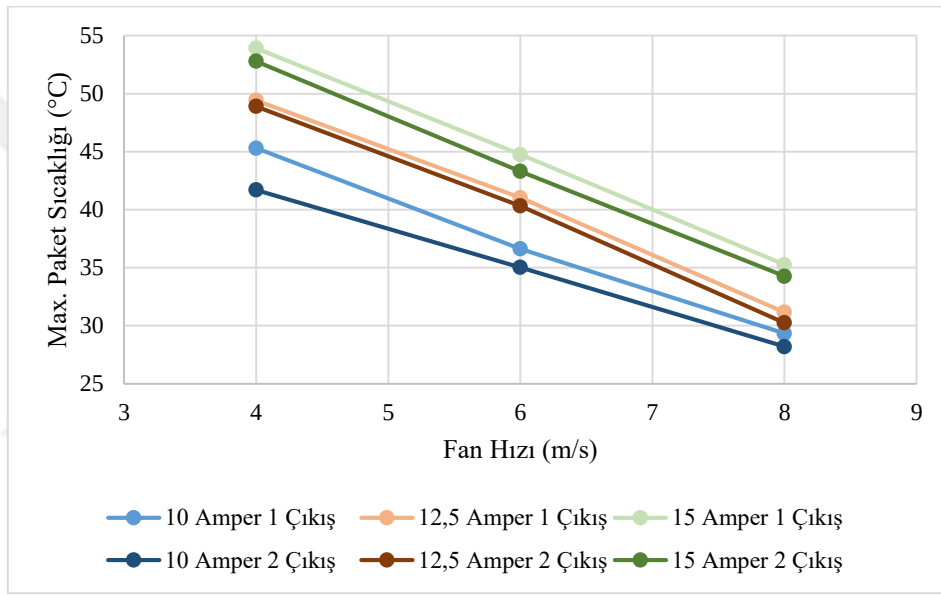


Şekil 4.4. 15 Amper akım deneysel çalışmaları

Zorlanmış taşınım uygulamalarında ise 4 m/s giriş hızında farklı akış düzenlerinin etkisi değerlendirilmiştir. Paralel akış ve üstten konumlandırma ile 57,45 °C, çapraz akış ve üstten konumlandırma ile 54,23 °C ve paralel akış ile ortadan konumlandırmada 53 °C maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Sistem optimizasyonu kapsamında giriş hava akış hızı kademeli olarak artırılmış; 6 m/s, 8 m/s ve 9,6 m/s hızlarında sırasıyla 44,75 °C, 33,9 °C ve 32,05 °C sıcaklık seviyelerine ulaşılmıştır. Ayrıca, iki ve üç fanlı sistemler test edilmiş; farklı giriş-çıkış konumlandırmaları ile birlikte çıkış fanı kullanımı ve fan hızlarının (4 m/s ve 7 m/s) soğutma performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın en dikkat çekici sonucu ise 9,6 m/s giriş hızına sahip sistemde, yarım çıkışlı konfigürasyon ile elde edilen 31,15 °C'lik minimum sıcaklık değeri olmuştur. Bu yapı sayesinde havanın sistem içinde daha uzun süre dolaşması sağlanmış ve başlangıçta referans alınan sıcaklık değerine göre yaklaşık % 52 oranında iyileşme elde edilmiştir. Bu kapsamlı deneysel analiz, elektronik sistemlerin termal yönetiminde zorlanmış

taşıyım parametrelerinin optimizasyonunun, çoklu fan konfigürasyonlarının stratejik yerleşiminin ve giriş-çıkış hava hızlarının hassas ayarlanmasının kritik önem taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.5'te batarya paketinin bulunduğu ortamda soğutmanın gerçekleştirilmesi amacıyla 1 girişli sistemde fan hızı, akım ve çıkış delik sayısının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Girişin ortada olduğu bu sistemde, "1 giriş – 1 çıkış" (1g – 1ç, ortadan giriş – ortadan çıkış) düzenlemesinde hava akışı ortadan gerçekleşirken, "1 giriş – 2 çıkış" (1g – 2ç, ortadan giriş – alt köşelerden çıkış) düzenlemesinde hava alt köşelere yönlendirilmiştir.

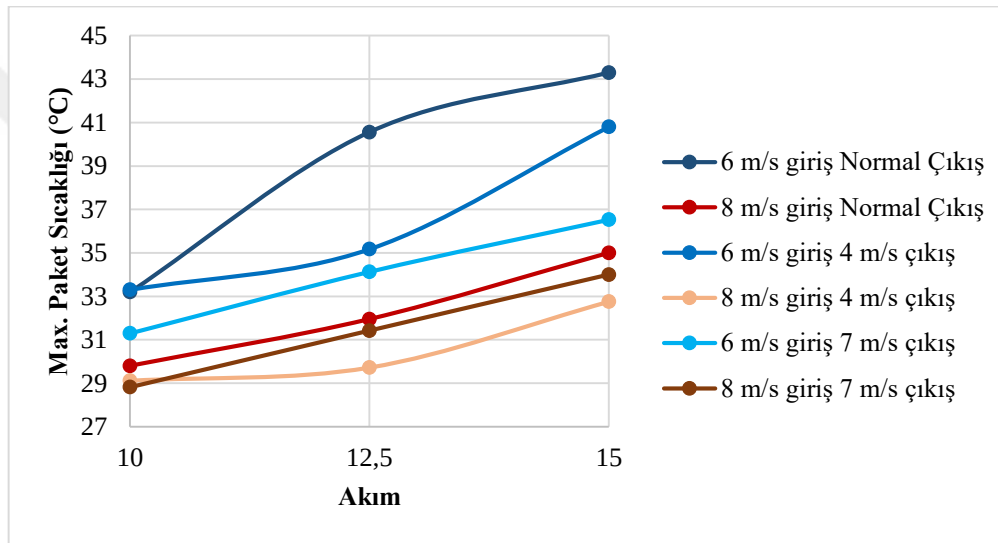


Şekil 4.5. Fan hızı, akım ve çıkış konfigürasyonlarının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi

Tek çıkışlı sistemde, fan hızı ve akım arttıkça sıcaklık düşüşü sağlanmış; ancak, hava akışının sınırlı bir alandan gerçekleşmesi nedeniyle optimum sıcaklık aralığına ulaşmak daha zor olmuştur. 10 Amperlik akımda ve tek çıkışlı sistemde sıcaklık 8 m/s fan hızında 31,5 °C'ye kadar düşebilmektedir. Buna karşılık, iki çıkışlı sistemde hava akışının alt köşelere yönlendirilmesiyle sıcaklık dağılımı iyileşmiş ve optimum sıcaklık aralığına (29,8 °C) daha kolay ulaşılmıştır. 15 Amperlik akımda ve iki çıkışlı sistemde sıcaklık 52,8 °C'den başlayarak, 35 °C'ye kadar düşmüştür. Bu bulgular, iki çıkışlı sistemin, özellikle yüksek akım ve fan hızlarında, optimum sıcaklık aralığını sağlamak için daha etkili bir tasarım olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak, fan hızının artışı ve akım değerinin yükselmesi her iki sistemde de sıcaklık düşüşünü hızlandırırken, iki çıkışlı sistem tasarımı, optimum sıcaklık aralığında daha geniş bir çalışma aralığı sunarak

üstün performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, çıkış konumu ve sayısının, soğutma sistemlerinde optimum sıcaklık aralığını sağlamak için kritik bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.6’da yüksek akımlarda (≥ 10 A) ortadan 1 giriş, alt köşelerden 2 çıkış olması durumunda çıkış fanı kullanımının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi, farklı giriş (6 m/s ve 8 m/s) ve çıkış hızları (çıkış fansız, 4 m/s, 7 m/s) için karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, akım arttıkça maksimum paket sıcaklığı da artmaktadır. Bu durum, yük arttıkça batarya hücrelerinde daha fazla ısı üretildiğini ve bu ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmadığı takdirde birikme eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. Yüksek akımlarda çıkış fanı kullanımının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi

Yapılan analizler, batarya paketinde giriş ve çıkış hava hızlarının değişiminin maksimum sıcaklık üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Özellikle çıkış fanı kullanılmayan (normal çıkış) durumlarda, maksimum sıcaklık değerleri tüm senaryolar içerisinde en yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Bu durum, sistemde zorlanmış konveksiyonun etkin şekilde sağlanamaması nedeniyle, ısı transferinin yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, 4 m/s çıkış fan hızı kullanılan senaryolarda çoğu durumda en düşük maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir. 4 m/s’lik çıkış hızında, hava akışının daha yavaş gerçekleşmesi sayesinde sıcak hava sistemde daha uzun süre kalmakta ve bu sürede batarya yüzeyleriyle daha etkin temas sağlanarak ısı transferi daha verimli şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Öte yandan, 7 m/s çıkış hızında ise “süpürme etkisi” olarak adlandırılan bir durum gözlemlenmiştir. Bu etki, yüksek hızdaki hava akışının sıcak bölgeyi hızlıca terk etmesi nedeniyle, hava ile batarya

yüzeyi arasında yeterli ısı alışverişinin gerçekleşmemesine neden olmaktadır. Bu durum, yüksek çıkış hızının her zaman daha etkili bir soğutma performansı sağlayamayacağını göstermektedir. Ayrıca, giriş hava akış hızının 6 m/s'den 8 m/s'ye çıkarılması, sistemdeki hava miktarını artırmasına rağmen, özellikle çıkış fanı bulunmayan durumlarda daha fazla ısıнын birikmesine neden olmuş ve dolayısıyla maksimum sıcaklık artmıştır.

Bu bulgular doğrultusunda, giriş ve çıkış hava hızları arasındaki dengenin batarya soğutma performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu söylenebilir. Giriş hava akış hızının görece düşük (≤ 6 m/s) ve çıkış hava akış hızının yüksek (≥ 7 m/s) olduğu senaryolarda, çıkış fanının giriş fanına göre daha yüksek hızda çalışması, sistemde bir emiş etkisi oluşturarak giriş havasının batarya paketine daha etkin şekilde yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu durum, zorlanmış konveksiyonun baskın olduğu koşullarda hava akışının batarya hücreleriyle daha uzun süre ve daha etkili şekilde temas etmesine olanak tanımakta, dolayısıyla ısı transfer verimliliğini artırmaktadır. Buna karşılık, giriş hava akış hızının yüksek (≥ 8 m/s) ve çıkış hava akış hızının görece düşük (≤ 4 m/s) olduğu durumlarda, sisteme giren hava batarya yüzeyleriyle yeterli düzeyde temas ederek ısıyı etkili bir şekilde taşıyabilmektedir. Ancak bu senaryolarda çıkış fan hızının artırılması, sistemdeki havanın daha kısa sürede dışarı atılmasına neden olmakta ve hava ile batarya yüzeyleri arasındaki etkileşim süresi azalmaktadır. Sonuç olarak, etkili bir batarya termal yönetimi için yalnızca yüksek hava hızlarına odaklanmak yeterli değildir; giriş ve çıkış hava hızlarının birbirine göre optimize edilmesi, hava akışının yönü ve batarya yüzeyleriyle temas süresi dikkate alınarak sistemin bütüncül şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada, düşük akım rejiminde (≤ 5 A), doğal taşınım yeterli soğutmayı sağlamış olup, kapalı sistemde maksimum sıcaklık 35 °C seviyelerinde kalmış ve hücreler arası sıcaklık farkı 5 °C'nin altında tutulabilmektedir. Orta akım rejiminde (5A – 10 A), fan hızının artışıyla birlikte maksimum sıcaklıkta belirgin bir düşüş gözlenmiştir. 1 giriş – 2 çıkış konfigürasyonu, 1 giriş – 1 çıkış konfigürasyonuna göre 3 – 5 °C daha düşük sıcaklık sağlamış ve 8 m/s fan hızında optimum çalışma sıcaklığı (27 – 31 °C) elde edilmiştir. Yüksek akım rejiminde (15 A), kapalı sistemde maksimum sıcaklık 65 °C'ye ulaşmış, doğal taşınım yetersiz kalmış ve zorlanmış taşınımın gerekli olduğu anlaşılmıştır. Fan hızının kademeli artışıyla birlikte sıcaklık, 4 m/s'de 53 – 57 °C, 6 m/s'de 44,75 °C, 8 m/s'de 33,9 °C ve 9,6 m/s'de 31,15 °C'ye düşürülmüştür. Optimum konfigürasyon olarak, 9,6 m/s giriş hızı, ortadan giriş ve alttan yarım çıkış kullanılarak maksimum sıcaklık 31,15 °C'ye (%52 iyileşme) düşürülmüş ve hücreler arası sıcaklık farkı 5 °C'nin

altında tutulmuştur. Çıkış fanı etkisi incelendiğinde, 4 m/s çıkış fan hızının hava tahliyesinde 7 m/s ve daha yüksek fan hızlarındaki süpürme etkisinden dolayı daha iyi performans sağladığı gözlemlenmiştir. Maksimum sıcaklık açısından en iyi performans, çıkış fanı olmayan sistemde elde edilmesine rağmen, sıcaklık homojenliği bakımından çıkış fanı kullanımı en iyi sonucu vermiştir. Bu sonuçlar, BTMS' nin tasarımında fan hızının, giriş-çıkış konumlarının, çıkış kesit alanının ve çıkış fan kullanımının kritik tasarım parametreleri olduğunu ortaya koymakta, özellikle yüksek akım değerlerinde (> 10 A) zorlanmış taşınımın gerekliliği ve optimum konfigürasyonun önemi vurgulanmaktadır.

4.1.1.2. Üçgen dizilim simülasyon bulguları

Deneysel analizlerin ardından, aynı batarya paketine yönelik kapsamlı sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler doğrultusunda geliştirilen model, SolidWorks yazılımında üç boyutlu olarak oluşturulmuş, ardından ANSYS Fluent ortamına aktarılmış ve burada sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları, farklı fan hızları, giriş-çıkış konumları ve çıkış fanı kullanım senaryoları altında batarya paketinin termal davranışını detaylı bir şekilde incelemeye olanak sağlamıştır.

Modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı deneysel validasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Validasyon sürecinde, yüksek akım değerlerinde eşik olarak belirlenen 10 Amper akım ve 20 dakikalık deney süresi referans parametreler olarak kullanılmıştır. Bu validasyon, sayısal modelin deneysel sonuçlarla uyumunu test ederek analizlerin güvenilirliğini artırmayı hedeflemiştir. Model, batarya paketinin yer aldığı şartlandırma ortamını ve hava akışını simüle ederek, deneysel verilerle karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu süreç, sayısal analizlerin doğruluğunu artırmak ve tasarım parametrelerinin termal performansa etkisini daha güvenilir bir şekilde değerlendirmek için kritik bir adım olmuştur.

Sayısal analizlerde, deneysel çalışmalarda elde edilen optimum konfigürasyonlar temel alınarak sıcaklık dağılımı, akış alanı ve hücreler arası sıcaklık farkları değerlendirilmiştir. Bu sayede, sistemin termal performansı farklı geometrik ve sınır koşulları altında test edilerek, tasarımın daha geniş bir parametre aralığında optimize edilmesi mümkün hale getirilmiştir. Simülasyonlar, ayrıca deneysel olarak test edilmesi

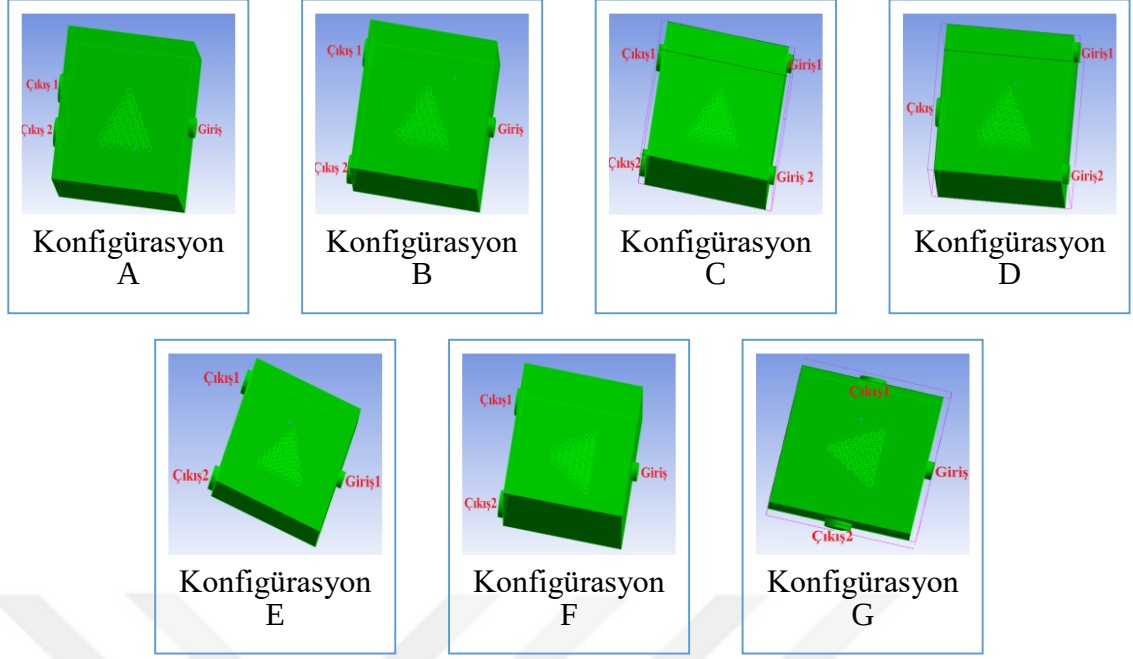
zor olan senaryolar için önceden öngörü sağlama avantajı sunmuş ve sistem tasarımı için kritik kararların alınmasında rehberlik etmiştir.

Üçgen dizilime sahip batarya paketi için, sistemin termal performansını optimize etmeye yönelik olarak yedi farklı hava giriş-çıkış konfigürasyonu sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu konfigürasyonlar, hava akışının giriş ve çıkış konumları, giriş-çıkış sayıları ve fan hızları gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmiş ve her bir düzenlemenin batarya paketinin soğutma verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analiz edilen konfigürasyonlar tablo 4.1.'de sıralanmaktadır:

Tablo 4.1. Üçgen dizilime sahip batarya paketi için incelenen hava giriş-çıkış konfigürasyonları

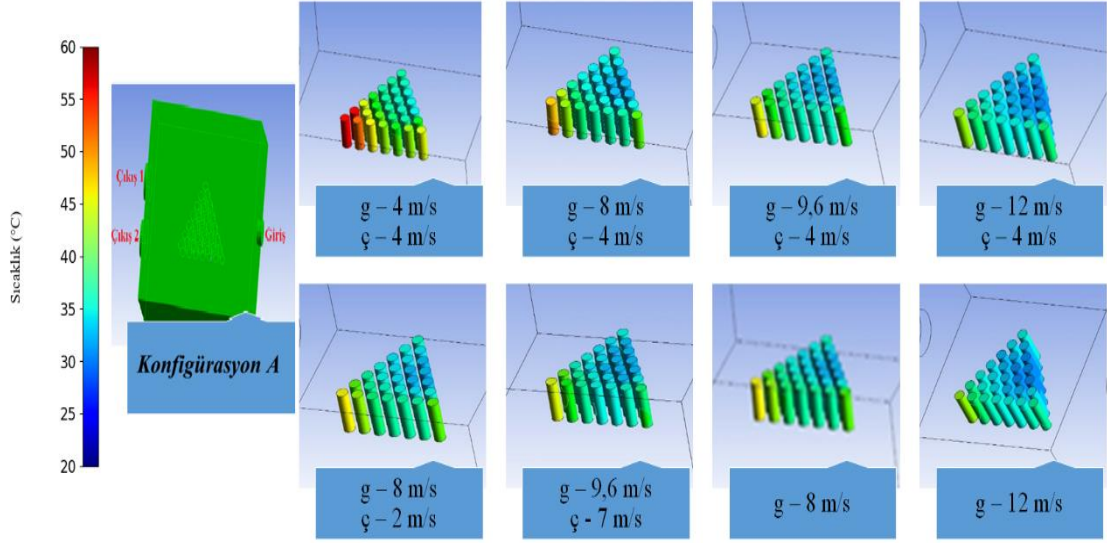
Konfigürasyon	Giriş Fan Konumu ve Sayısı	Çıkış Fan Konumu ve Sayısı
Konfigürasyon A	Ortadan tek hava girişi	Ortadan çift hava çıkışı
Konfigürasyon B	Ortadan tek hava girişi	Alt köşelerden çift hava çıkışı
Konfigürasyon C	Üstten çift hava girişi	Alt köşelerden çift hava çıkışı
Konfigürasyon D	Üstten çift hava girişi	Ortadan tek hava çıkışı
Konfigürasyon E	Ortadan tek hava girişi	Alt köşelerden çift hava çıkışı
Konfigürasyon F	Dizilimin taban kenarından hava girişi	Sivri uçtan hava çıkışı
Konfigürasyon G	Dizilimin taban kenarından hava girişi	Yanlardan çift hava çıkışı

Bu konfigürasyonlar, batarya paketinin soğutma performansını ve sıcaklık homojenliğini artırmak amacıyla, farklı tasarım senaryolarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için seçilmiştir. Şekil 4.7.'de, analiz edilen konfigürasyonların görselleri sunulmuştur. Her bir konfigürasyon için CFD analizleri gerçekleştirilmiş ve batarya paketindeki sıcaklık dağılımları, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sayısal model tarafından öngörülen sıcaklık profilleri ile deneysel ölçümler arasındaki uyum, farklı giriş-çıkış konfigürasyonlarının soğutma performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmede ve en uygun tasarımı belirlemede temel alınmıştır. Bu analizler, batarya paketinin termal yönetim performansını optimize etmeye yönelik önemli bir temel sağlamıştır. Sayısal analizlerde kullanılan model, belirli varsayımlar doğrultusunda basitleştirilmiştir. Bu kapsamda; batarya hücreleri sabit ve homojen ısı üreten kaynaklar olarak kabul edilmiş, hava sıkıştırılmaz ve sabit fiziksel özelliklere sahip bir akışkan olarak modellenmiştir. Geometrik modellemede bağlantı elemanları ve tutucular ihmal edilmiştir. Ayrıca, dış çevre adyabatik kabul edilmiş ve sabit giriş koşulları uygulanmıştır. Bu varsayımlar, hesaplama yükünü azaltarak çözüm süresini optimize etmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 4.7. Sayısal analizlerde kullanılan üçgen dizilim batarya paket konfigürasyonlarının genel görünümü

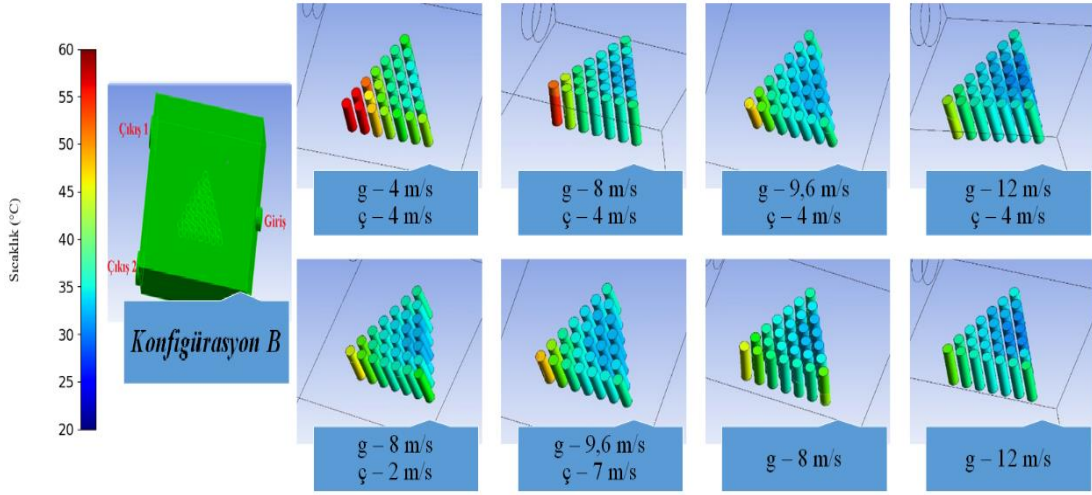
Konfigürasyon A’da hava akışı, modülün ortasındaki tek bir giriş noktasından sağlanmış ve çıkış noktaları bu girişin tam karşısında konumlandırılmıştır. Bu düz konumlandırma nedeniyle hava, modül içerisinde yeterince dolaşım yapamadan doğrudan çıkışa yönlendirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında giriş hızları 4 m/s ile 12 m/s arasında değiştirilmiş, çıkış hızları ise çıkış fanı kullanılan sistemlerde 2 m/s ile 7 m/s arasında ölçülmüştür. Özellikle 9,6 m/s giriş hızında, çıkış fanının oluşturduğu 7 m/s gibi yüksek çıkış hızı, havanın modül içerisinde süpürme etkisiyle hızlı bir şekilde tahliye olmasına ve yeterince dolaşamamasına neden olmuştur.



Şekil 4.8. Konfigürasyon A 'da batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.8.'de görüldüğü üzere, giriş ve çıkışın karşılıklı konumlandırılması nedeniyle hava akışı modülün tüm bölgelerine homojen şekilde yayılmamış, bu da sıcaklık dağılımında belirgin gradyanlara yol açmıştır. Çıkış fanı kullanılmayan senaryolarda (8 m/s ve 12 m/s giriş hızlarında), doğal hava akışı sağlanmış olsa da aynı şekilde homojen soğutma performansı elde edilememiştir. Bu konfigürasyona ait analiz sonuçları, özellikle yüksek çıkış hızlarında görülen süpürme etkisi ve karşılıklı yerleşimin neden olduğu direkt akış yapısı nedeniyle, sistem tasarımında giriş-çıkış konumlarının ve hızlarının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

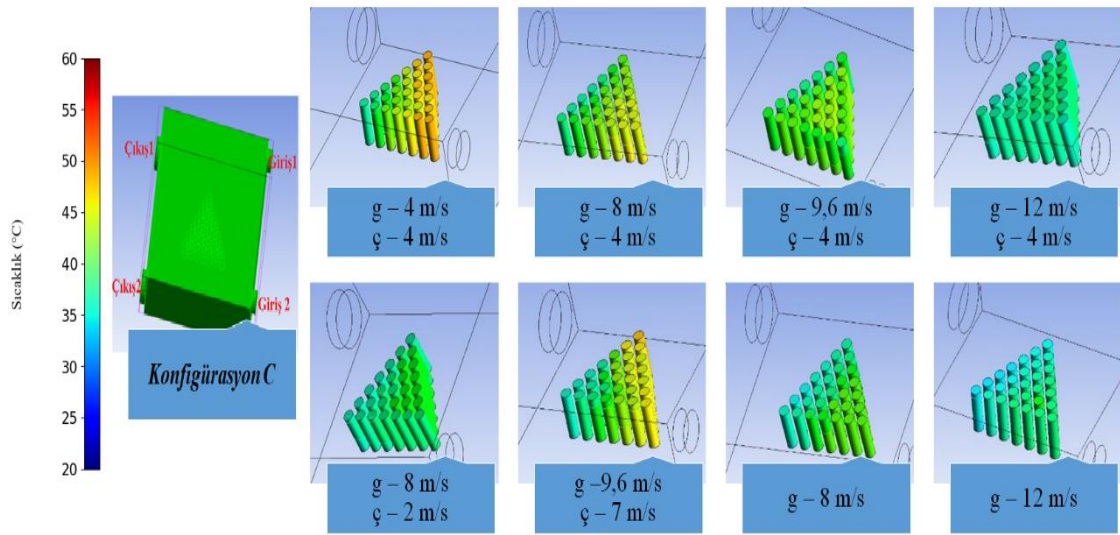
Konfigürasyon B'de, hava akışı modülün ortasındaki tek bir giriş noktasından sağlanmış ve çıkış noktaları modülün alt köşelerinde konumlandırılmıştır. Bu tasarım, önceki konfigürasyondaki direkt karşılıklı çıkış düzenlemesine kıyasla daha avantajlı sonuçlar vermiştir. Simülasyon çalışmalarında giriş hızları 4 m/s ile 12 m/s arasında değişirken, çıkış hızları çıkış fanı kullanılan sistemlerde 2 m/s ile 7 m/s arasında ölçülmüştür. Özellikle 9.6 m/s giriş hızında çıkış fanının oluşturduğu 7 m/s çıkış hızı, önceki konfigürasyondan farklı olarak, havanın modül içerisinde daha fazla dolaşmasını sağlamıştır. Alt köşelerdeki çıkışlar, havanın doğrudan tahliye edilmesini engelleyerek iç hacimde daha uzun süre kalmasına olanak tanımıştır.



Şekil 4.9. Konfigürasyon B 'de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.9.'daki görsellerde de görüldüğü üzere, sıcaklık dağılımında mavi-yeşil tonlarının daha homojen bir şekilde dağılması, bu konfigürasyonun daha dengeli ve etkili bir soğutma sağladığını göstermektedir. Çıkış fanı kullanılmayan durumlarda bile (8 m/s ve 12 m/s giriş hızlarında), çıkışların alt köşelere yerleştirilmiş olması sayesinde hava akışı modül içerisinde daha uzun süre kalabilmiş ve bu da önceki konfigürasyona kıyasla daha iyi bir soğutma performansı sunmuştur. Konfigürasyon A'da karşılıklı çıkış nedeniyle oluşan süpürme etkisi ve yetersiz hava dolaşımı problemi, bu tasarımda büyük ölçüde giderilmiş ve böylece daha etkin bir termal yönetim sağlanmıştır.

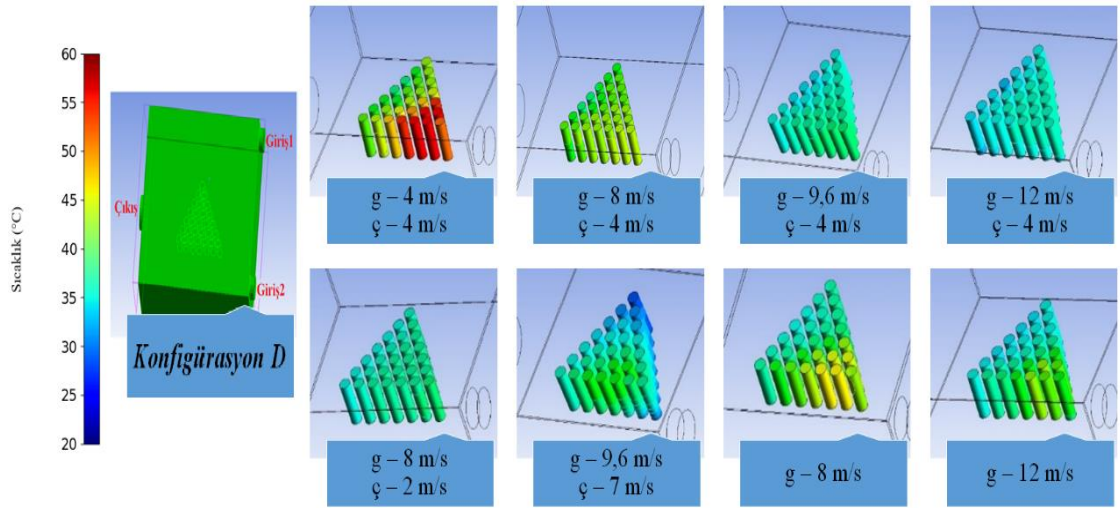
Konfigürasyon C'de, hava akışı modülün üst kısmındaki iki giriş noktasından sağlanmış ve iki çıkış noktası modülün alt köşelerinde konumlandırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında giriş hızları 4 m/s ile 12 m/s arasında değişirken, çıkış hızları çıkış fanı kullanılan sistemlerde 2 m/s ile 7 m/s arasında belirlenmiştir. Çift giriş kullanımı sayesinde, hava modül içerisinde daha dengeli dağılmış ve bu da soğutma performansını olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 4.10. Konfigürasyon C’de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.10’da da görüldüğü gibi, özellikle çıkış fanı kullanılan sistemlerde (örneğin 9.6 m/s giriş ve 4 m/s çıkış hızında), sıcaklık dağılımı sarı-yeşil tonlardan mavi tonlara doğru homojen bir geçiş göstermiştir. Bu, sistem içerisindeki hava dolaşımının daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir. 4 m/s gibi düşük giriş hızlarında bile, çift girişin sağladığı dağılım avantajı sayesinde sıcaklık profili daha dengeli kalmıştır. Çıkış fanı kullanılmayan senaryolarda dahi (8 m/s ve 12 m/s giriş hızlarında), çift giriş sayesinde önceki tek girişli tasarımlara kıyasla daha yüksek soğutma verimi elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, üstten çift giriş ve alt köşe çıkışlı bu düzenlemenin sıcaklık gradyanlarını azalttığını ve sistemin genel termal performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek giriş hızlarında bile dengeli soğutma sağlaması, bu konfigürasyonun tasarım açısından avantajlarını açıkça göstermektedir.

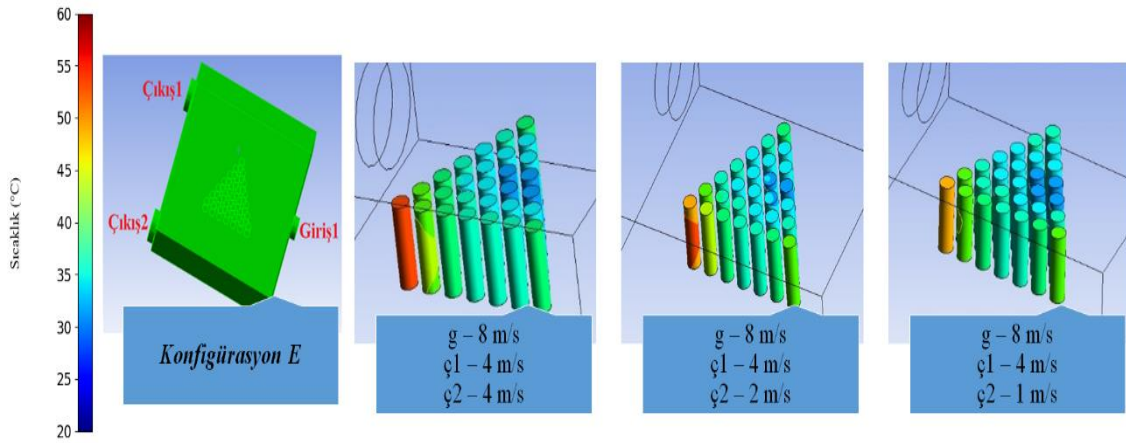
Konfigürasyon D’de hava akışı, modülün üst kısmındaki iki giriş noktasından sağlanmış ve tek bir çıkış noktası modülün ortasında konumlandırılmıştır. Deneysel analizlerde giriş hızları 4 m/s ile 12 m/s arasında değiştirilmiş, çıkış fanı kullanılan sistemlerde çıkış hızları 2 m/s ile 7 m/s arasında ölçülmüştür. Çıkış fanı kullanılmayan durumlarda (örneğin 8 m/s ve 12 m/s giriş hızlarında), çıkış doğal hava akışı ile sağlanmıştır. Çıkış fanı kullanılan sistemlerde (örneğin 9.6 m/s giriş ve 4 m/s çıkış hızında), hava akışının modül içerisinde ortadaki çıkışa doğru daha etkin bir şekilde yönlendirildiği ve sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Konfigürasyon D’de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.11’de yer alan görsellerde, giriş hızının artışıyla birlikte modül içerisindeki soğutma performansının iyileştiği, çıkış fanı kullanımının ise sıcaklık gradyanlarını belirgin şekilde azalttığı görülmektedir. Özellikle giriş bölgelerinde sıcaklık artışının yoğunlaştığı; çıkış fanı hızının artmasıyla bu yoğunluğun daha dengeli dağıldığı tespit edilmiştir. Çıkış fanı kullanılmayan sistemlerde ise doğal hava çıkışının, sıcaklık dağılımında daha belirgin bir gradyana neden olduğu ve bu durumun soğutma performansını sınırladığı anlaşılmıştır. Üstten çift giriş ve ortadan tek çıkış yapısına sahip bu düzenleme, farklı giriş – çıkış hızlarının ve çıkış fanı kullanımının etkilerini analiz etmek için kritik bir senaryo sunmuş ve sistem tasarımında bu parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir.

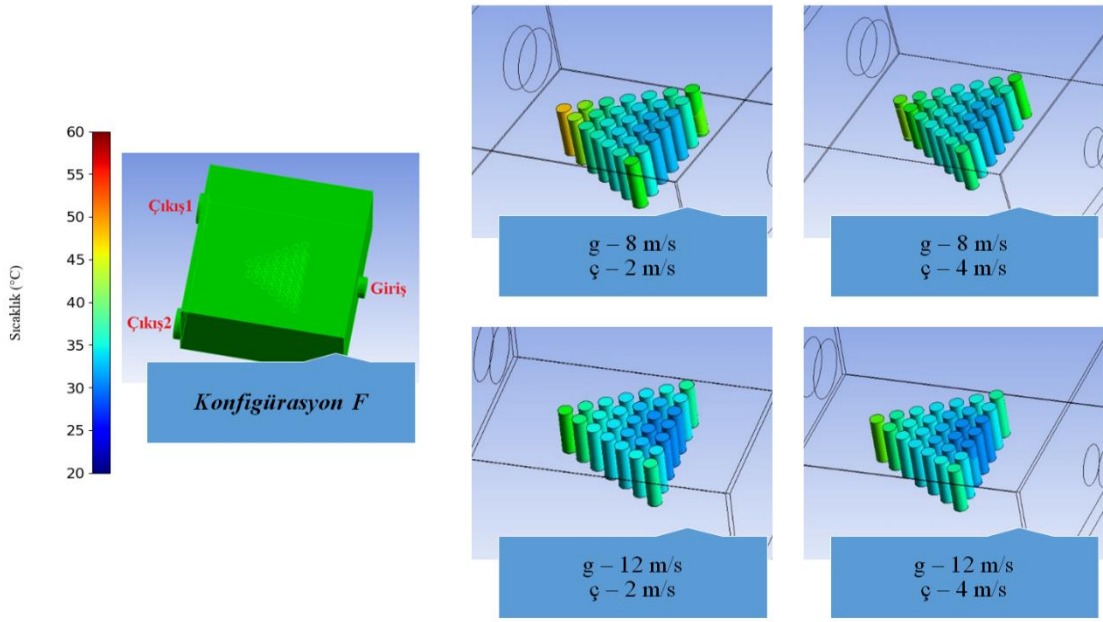
Konfigürasyon E’de, önceki tasarımlardan farklı olarak tek bir giriş ve farklı hızlarda çalışan çift çıkış sistemi test edilmiştir. Hava akışı, modülün ortasındaki tek giriş noktasından sağlanmış; iki çıkış noktası ise alt köşelerde konumlandırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında giriş hızı sabit olarak 8 m/s seçilmiş, çıkış hızları ise her iki çıkış noktası için farklı kombinasyonlarla değerlendirilmiştir. Bu konfigürasyonun, Konfigürasyon A ve B’deki tek çıkışlı sistemlerle karşılaştırıldığında, özellikle fan hızları arasındaki dengenin soğutma performansında kritik rol oynadığı görülmüştür.



Şekil 4.12. Konfigürasyon E’de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.12’deki simülasyon sonuçları incelendiğinde, örneğin 8 m/s giriş hızında çıkış hızlarının her iki fanda aynı olması ($\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = 4 \text{ m/s}$) durumunda, hava akışının modül içerisinde homojen dağılmadığı ve bu nedenle sıcaklık dağılımında dengesizlik olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda, Konfigürasyon C’deki çift girişli sisteme göre daha düşük soğutma verimi elde edilmiştir. Ancak çıkış hızlarının dengeli ayarlandığı durumda ($\dot{V}_1: 1 \text{ m/s}$, $\dot{V}_2: 4 \text{ m/s}$), daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmış ve Konfigürasyon D’deki merkezi çıkışlı sisteme kıyasla daha iyi bir termal denge elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, çift çıkışlı sistemlerde fan hızlarının simetrik ve dengeli ayarlanmasının, sistem performansını optimize etmek açısından oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Bu durum, yalnızca çıkış konumlandırmasının değil, çıkış hızlarının da sistem performansını doğrudan etkileyen temel tasarım parametreleri arasında yer aldığını ortaya koymuştur.

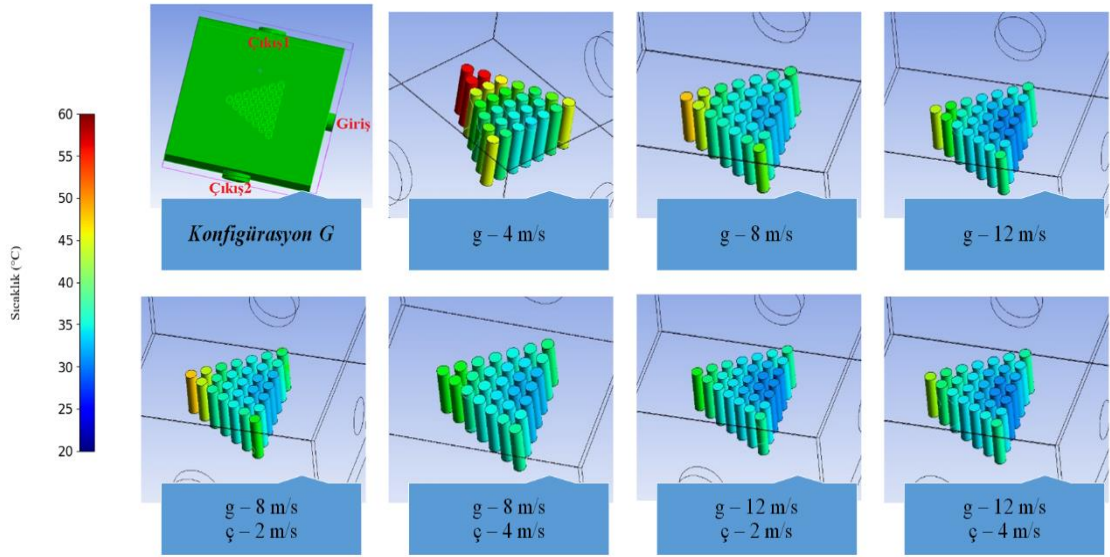
Konfigürasyon F’de, önceki tasarımlardan farklı bir yaklaşım benimsenmiş ve hava akışı modülün geniş yüzeyindeki giriş noktasından sağlanarak, çıkış noktası modülün sivri tarafında konumlandırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında giriş hızları 8 m/s ve 12 m/s olarak belirlenmiş; çıkış hızları ise 2 m/s ve 4 m/s olacak şekilde test edilmiştir. Bu tasarım, Konfigürasyon A’daki doğrudan karşılıklı akış düzeninden ve Konfigürasyon B’deki alt köşe çıkışlı sistemden farklı olarak, hava akışının geniş bir yüzeyden dar bir alana doğru tek yönlü olarak ilerlemesini sağlamıştır.



Şekil 4.13. Konfigürasyon F’de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.13’te görüldüğü üzere, bu düzenleme sayesinde özellikle 8 m/s giriş ve 4 m/s çıkış hızında, Konfigürasyon C ve D’deki çift girişli sistemlere kıyasla daha dengeli bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca 12 m/s giriş ve 2 m/s çıkış hızında, Konfigürasyon E’deki çift çıkışlı düzene göre daha homojen bir soğutma performansı gözlemlenmiştir. Havanın geniş alandan dar alana geçişi, önceki konfigürasyonlarda sıkça karşılaşılan türbülans oluşumu ve dengesiz akış dağılımı gibi problemleri büyük ölçüde azaltmıştır. Bu düzenleme, hem hava akışının doğal yönüne uygunluğu hem de sistemin sade yapısı sayesinde, önceki tasarımlara göre daha basit ve etkili bir termal yönetim çözümü sunmuştur.

Konfigürasyon G’de, hava akışı modülün geniş tarafındaki tek bir giriş noktasından sağlanmış, çıkış noktaları ise modülün yan kenarlarında simetrik olarak konumlandırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında giriş hızları 4 m/s ile 12 m/s arasında, çıkış hızları ise her iki çıkış için 2 m/s ile 4 m/s arasında test edilmiştir. Bu düzenleme, hem geniş alandan giriş hem de yan çıkışlarla hava akışının modül içerisinde daha dengeli yayılmasını hedeflemiştir. Konfigürasyon A’daki karşılıklı giriş-çıkış sistemi ve Konfigürasyon B’deki alt köşe çıkışlarına göre daha etkili bir performans göstermiştir.



Şekil 4.14. Konfigürasyon G’de batarya paketinin sıcaklık dağılımı

Şekil 4.14’te de görülebileceği gibi, özellikle 8 m/s giriş ve 4 m/s çıkış hızında, sıcaklık dağılımının daha homojen olduğu ve Konfigürasyon C ile D’deki çift girişli sistemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 12 m/s giriş hızında bile sıcaklık gradyanlarının E ve F konfigürasyonlarına kıyasla daha az belirgin olması, bu tasarımın yüksek debili akışlarda daha stabil bir performans sunduğunu göstermiştir. Ayrıca çıkış hızlarının artırılmasıyla, türbülans etkisinin ve dengesiz akış dağılımının azaldığı anlaşılmıştır. Bu tasarım, geniş giriş ve simetrik yan çıkışların kombinasyonu sayesinde hem akış kontrolü hem de sıcaklık homojenliği açısından optimize edilmiş bir çözüm sunmuştur.

Yapılan kapsamlı sayısal simülasyon çalışmaları kapsamında, yedi farklı giriş-çıkış konfigürasyonu (A – G) için batarya paketinin soğutma performansı ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Her bir konfigürasyon için farklı giriş ve çıkış hızlarında gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.2. 'de sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, giriş havası hızının artırılmasının soğutma etkinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Özellikle, 12 m/s giriş hızına sahip sistemlerde optimum soğutma performansının sağlandığı gözlemlenmiştir. En yüksek soğutma verimi, 12 m/s giriş ve 4 m/s çıkış hızına sahip çıkış fan destekli Konfigürasyon D’de elde edilmiştir. Bu yapılandırmayı, üstten çift giriş ve alt köşelerden çift çıkış düzenlemesine sahip olan Konfigürasyon C takip etmiştir. Bu iki konfigürasyon arasındaki benzer performansın temel nedeni; Konfigürasyon D’de hava akışının modül içerisinde daha uzun süre

dolaşması sayesinde daha fazla ısı transferinin gerçekleşmesi, Konfigürasyon C'de ise çift çıkışın yarattığı süpürme etkisiyle etkin bir soğutmanın sağlanmasıdır.

Tablo 4.2. Üçgen dizilimin farklı giriş-çıkış konfigürasyonlarına ait sayısal simülasyon sonuçları ve soğutma performans karşılaştırması

Konfigürasyon	Giriş Özellikleri	Çıkış Özellikleri	En İyi Soğutma Performansı
A	Tek giriş (orta)	İki çıkış (orta)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s
B	Tek giriş (orta)	İki çıkış (alt köşe)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s
C	İki giriş (üst)	İki çıkış (alt köşe)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s
D	İki giriş (üst)	Tek çıkış (orta)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s
E	Tek giriş (orta)	İki çıkış (alt köşe)	g: 8 m/s, ç ₁ : 2 m/s ç ₂ : 4 m/s
F	Tek giriş (geniş-orta)	Tek çıkış (sivri)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s
G	İki giriş (geniş)	İki çıkış (yan)	g: 12 m/s, ç: 4 m/s

Tüm konfigürasyonlar değerlendirildiğinde, fan konumlandırması ve fan hızlarının optimize edilmesinin sistemin termal performansı üzerindeki belirleyici etkisi açıkça ortaya çıkmıştır. Özellikle çıkış fanlarının stratejik olarak yerleştirilmesi ve çıkış hızlarının dengeli şekilde ayarlanması, sıcaklık dağılımında homojenliğin sağlanmasına önemli katkı sunmuştur.

Bu bulgular, batarya paketleri için geliştirilen hava soğutmalı termal yönetim sistemlerinde, yalnızca giriş-çıkış konumlarının değil, aynı zamanda fan hızlarının da dikkatle planlanması gerektiğini göstermektedir. Endüstriyel uygulamalarda, fan konfigürasyonlarının doğru seçimi ve parametre optimizasyonu, hem sistem verimliliğini artırmakta hem de termal güvenliği sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma, gelecekteki tasarım çalışmalarına temel teşkil edecek nitelikte önemli mühendislik verileri sunmaktadır.

Gerçekleştirilen sayısal simülasyon çalışmaları kapsamında, farklı giriş ve çıkış hava hızlarının batarya paketi üzerindeki soğutma performansına etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 8 m/s ve 12 m/s giriş hızlarının çeşitli çıkış fan hızları ile kombinasyonlarının sıcaklık dağılımı üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Analizler, yüksek çıkış fan hızlarının (7 m/s) aşırı süpürme etkisine neden olarak sıcaklık dağılımındaki homojenliği bozduğunu; buna karşılık düşük fan hızlarının (2 m/s) ise yetersiz hava sirkülasyonu nedeniyle soğutma performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Özellikle çift girişli sistemlerde (Konfigürasyon C ve D), en homojen sıcaklık dağılımı 4 m/s çıkış fan hızında elde edilmiştir. Ancak, çıkış fanlarının farklı hızlarda çalıştırıldığı durumlarda batarya paketi içerisinde belirgin

sıcaklık gradyanları oluşmuş, bu da sıcaklık homojenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular, yüksek giriş hızı (12 m/s) ile dengeli ve optimize edilmiş çift çıkış fan hızlarının (örneğin 4 m/s) birlikte kullanılmasının, aşırı süpürme etkisinden kaçınarak yeterli ve dengeli bir soğutma performansı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, çıkış fanlarının simetrik ve dengeli şekilde çalıştırılmasının, sıcaklık dağılımındaki homojenlik açısından kritik bir parametre olduğu kanıtlanmıştır.

Bu çalışmayla birlikte elektrikli araç batarya paketlerinin termal yönetiminde zorlanmış hava soğutmanın etkili bir çözüm olduğunu göstermiştir. Özellikle akım değerlerindeki artış (> 10 A) ile fan hızı ve giriş – çıkış konfigürasyonlarının optimizasyonu kritik önem taşımaktadır. Çalışma, gelecekteki BTMS tasarımları için önemli veriler ve tasarım kriterleri sunmaktadır. BTMS' nin 10 amper akım değerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizleri, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tablo 4.3. 'de sunulan veriler, farklı soğutma konfigürasyonları için elde edilen sıcaklık değerlerini ve sapma oranlarını göstermektedir.

Tablo 4.3. Üçgen dizilimde 10 amper için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Parametre	Deneysel Paket Sıcaklığı (10A)	Simülasyon Paket Sıcaklığı (10A)	Fark (%)
Kapalı Sistem	58,5 °C	57,8 °C	1,20
Doğal Taşınım			
● Tek giriş-çıkış	55,2 °C	54,7 °C	0,91
● Çift giriş-çıkış	53,8 °C	53,2 °C	1,12
Zorlanmış Taşınım (4 m/s)			
● Üstten paralel	49,6 °C	48,9 °C	1,41
● Ortadan paralel	45,8 °C	45,2 °C	1,31
Optimizasyon Sonuçları			
● 6 m/s fan hızı	41,2 °C	40,7 °C	1,21
● 8 m/s fan hızı	38,4 °C	37,9 °C	1,30
● 9,6 m/s fan hızı	36,7 °C	36,2 °C	1,36

Karşılaştırmalı analiz sonuçları, sayısal modelin deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kapalı sistem koşullarında gözlemlenen % 1,20' lik sapma, modelin temel termal davranışları başarıyla simüle edebildiğini göstermektedir. Doğal taşınım rejiminde, tek giriş – çıkış konfigürasyonunda % 0,91, çift giriş – çıkış konfigürasyonunda % 1,12 'lik sapmalar elde edilmiştir. Bu değerler, modelin doğal konveksiyon mekanizmalarını doğru bir şekilde temsil ettiğini kanıtlamaktadır. Zorlanmış taşınım koşullarında, 4 m/s fan hızında üstten paralel akışta % 1,41, ortadan

paralel akışta % 1,31' lik sapmalar gözlemlenmiştir. Fan hızının artırılmasıyla (6 m/s, 8 m/s ve 9.6 m/s) elde edilen sonuçlarda sapma oranları % 1,21 ile % 1,36 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, modelin zorlanmış taşınım rejiminde de güvenilir tahminler yapabildiğini göstermektedir.

4.1.2. Diğer dizilimlerin hava soğutma bulguları

Elde edilen düşük sapma oranları, geliştirilen sayısal modelin hem doğal hem de zorlanmış taşınım koşullarında güvenilir ve geçerli sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Modelin doğruluğu kanıtlandıktan sonra, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlere sahip batarya paketlerinin termal performansları analiz edilmiştir. Bu analizlerde, hava giriş-çıkış konumları ile fan yerleşimlerinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiş ve her bir yapılandırma için optimum soğutma senaryoları tanımlanmıştır. Sayısal modelin güvenilirliği sayesinde, farklı geometrik konfigürasyonlara ait sıcaklık profilleri ve hava akışı davranışları etkin biçimde analiz edilerek, sistem tasarımı açısından önemli mühendislik verileri elde edilmiştir.

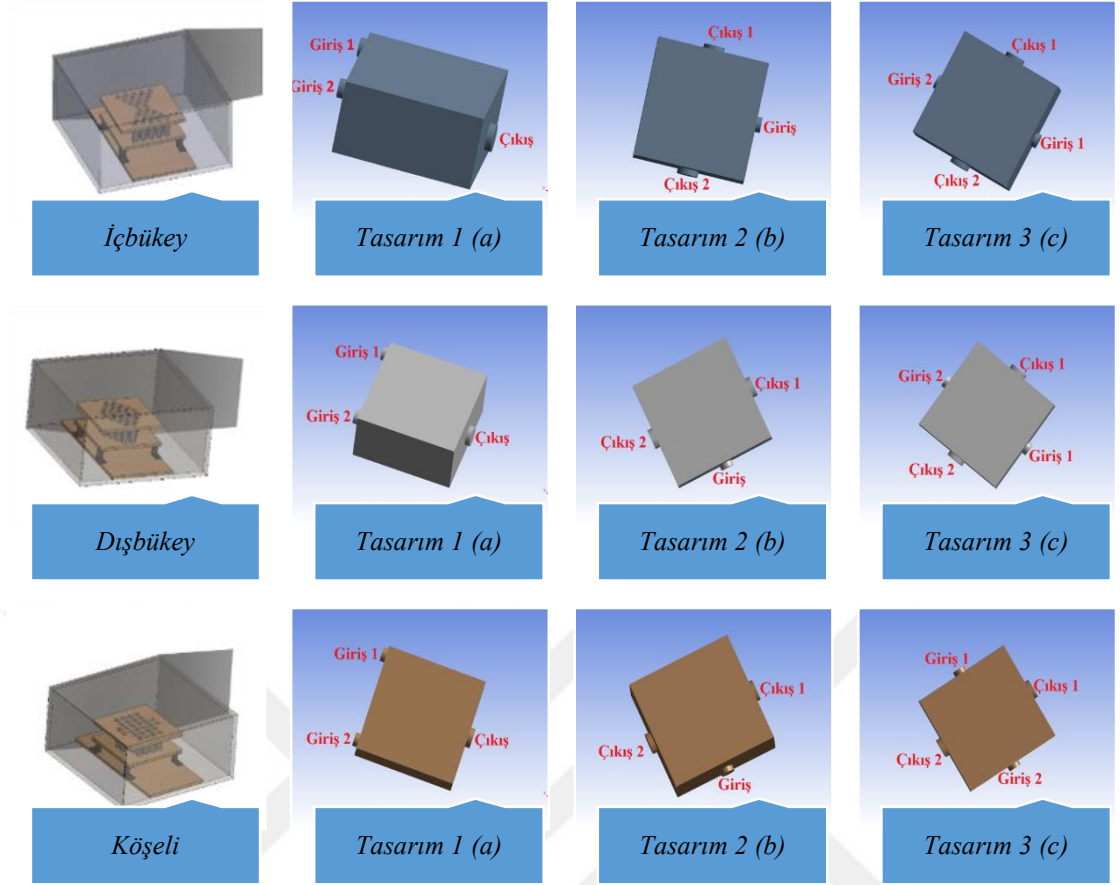
Simülasyon çalışmaları, üçgen dizilime sahip batarya paketi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizlerle uyumlu olacak şekilde yapılandırılmış ve bu sayede deneysel aşamaya geçiş desteklenmiştir. Bu kapsamda, giriş fan hızı ve konumu, çıkış fanı kullanımı, çıkış fanı yerleşimi ve fan hızları gibi kritik parametreler sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Her bir geometrik model için çeşitli akış düzenlemeleri ve fan konfigürasyonları tanımlanmış; bu konfigürasyonlar, akış homojenliği, çıkış hızlarının dengesi ve genel termal yönetim performansı açısından optimize edilmiştir.

Çalışma kapsamında, farklı dizilimlere sahip batarya paketleri için hava soğutmalı termal yönetim sistemlerinin performansı hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, batarya hücrelerinin optimum sıcaklık aralığında (20–40 °C) tutulmasının ve hücreler arasındaki sıcaklık farkının 5 °C'nin altında kalmasının termal denge açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. Zorlanmış taşınım koşullarında 10 A akım ve 20 dakikalık deney süresi temel alınarak yürütülen çalışmalarda; Üstten 2 Giriş, Ortadan 1 Çıkış (Tasarım 1), Geniş Taraftan Giriş, Yanlardan 2 Çıkış (Tasarım 2) ve Karşılıklı 2 Giriş, Karşılıklı 2 Çıkış (Tasarım 3) olmak üzere üç farklı soğutma stratejisinin performansı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Tasarım 1 “a” indisi, Tasarım 2 “b” indisi ve Tasarım 3 “c” indisi ile gösterilmektedir.

Bu stratejilerde fan konumu, fan hızı ve fan kullanımı gibi parametrelerin sıcaklık dağılımı, enerji verimliliği ve termal kararlılık üzerinde belirleyici rol oynadığı tespit edilmiştir. Sayısal sonuçların, üçgen dizilime sahip batarya paketi ile yapılan deneysel verilerle yüksek uyum göstermesi, geliştirilen modelin geçerliliğini desteklemiş ve BTMS' nin tasarım sürecine katkı sağlayacak nitelikli bilgiler sunmuştur.

İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilime sahip farklı geometriler üzerinde gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, üçgen dizilime sahip batarya paketi kullanılarak yapılan deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılarak sayısal modelin doğruluğu kanıtlandıktan sonra, deneysel çalışmalara geçişi destekleyecek şekilde detaylı olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda, giriş fan hızı, giriş fan konumu, çıkışta çıkış fanı kullanımı ve kullanılmaması, çıkış fan konumu ile çıkış fan hızı gibi kritik parametreler sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Her bir geometrik model için çeşitli akış düzenlemeleri ve fan yerleşimleri dikkate alınarak çok sayıda konfigürasyon tanımlanmış ve bu konfigürasyonlar, akış homojenliği, çıkış hızlarının dengesi ve genel termal yönetim performansı açısından optimize edilmiştir.

Özellikle, giriş ve çıkış fanlarının konumlarının yanı sıra hızlarının da akış dinamikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Şekil 4.15'te her bir geometrik model için oluşturulan sayısal model tasarımları görsel olarak sunulmuş, giriş-çıkış düzenlemeleri ile fan yerleşimlerine dair açıklamalar yer almıştır. Bu kapsamlı analizler, farklı geometrik düzenlemelerin batarya paketlerinin termal yönetim performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek adına önemli bir temel oluşturmuş ve deneysel aşamaya geçişte yol gösterici nitelik kazanmıştır.



Şekil 4.15. İçbükey, dışbükey ve köşeli dizilim sayısal model tasarımları

Tasarım 1 (Üstten 2 Giriş, Ortadan 1 Çıkış) soğutma stratejisi altında, farklı giriş ve çıkış fan hızlarının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda dört farklı senaryo değerlendirilmiştir:

- İlk durumda, giriş hızı 4 m/s olarak belirlenmiş ve çıkış fanı kullanılmadan doğal çıkış hızı incelenmiştir.
- İkinci durumda, giriş hızı 8 m/s'ye çıkarılmış, ancak çıkış fanı yine kullanılmamıştır.
- Üçüncü durumda, giriş hızı 8 m/s olup, çıkış fan hızı 2 m/s olarak belirlenmiştir.
- Dördüncü durumda, giriş hızı 8 m/s ve çıkış fan hızı 4 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır.

Tasarım 2 (Geniş Taraftan Giriş, Yanlardan 2 Çıkış) soğutma stratejisi altında, farklı giriş ve çıkış fan hızlarının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda beş farklı senaryo değerlendirilmiştir:

- İlk durumda, giriş hızı 8 m/s olarak belirlenmiş ve çıkış fanı kullanılmadan doğal çıkış hızı incelenmiştir.

- İkinci durumda, giriş hızı 8 m/s olup, çıkış fan hızı 2 m/s olarak ayarlanmıştır.
- Üçüncü durumda, giriş hızı 8 m/s ve çıkış fan hızı 4 m/s olacak şekilde optimize edilmiştir.
- Dördüncü durumda, giriş hızı 12 m/s' ye çıkarılmış, ancak çıkış fanı kullanılmamıştır.
- Beşinci durumda, giriş hızı 12 m/s ve çıkış fan hızı 2 m/s olarak belirlenmiştir.

Tasarım 3 (Karşılıklı 2 Giriş, Karşılıklı 2 Çıkış) soğutma stratejisi altında, farklı giriş ve çıkış fan hızlarının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda beş farklı senaryo değerlendirilmiştir:

- İlk durumda, giriş hızı 4 m/s olarak belirlenmiş ve çıkış fanı kullanılmadan doğal çıkış durumu analiz edilmiştir.
- İkinci durumda, giriş hızı 8 m/s'ye çıkarılmış, ancak çıkış fanı yine kullanılmamıştır.
- Üçüncü durumda, giriş hızı 8 m/s ve çıkış fan hızı 2 m/s olacak şekilde değerlendirilmiştir.
- Dördüncü durumda, giriş hızı 8 m/s olup, çıkış fan hızı 4 m/s olarak ayarlanmıştır.
- Beşinci durumda, giriş hızı 12 m/s ve çıkış fan hızı 2 m/s olarak belirlenmiştir.

Bu senaryolar, sıcaklık dağılımı ve homojenlik açısından analiz edilmiştir. Genel olarak, çıkış fanının devreye alınması sıcaklık birikimini azaltmış ve hücreler arası sıcaklık farklarını düşürerek sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde artırmıştır.

İç bükey dizilim için gerçekleştirilen simülasyonlarda (Tablo 4.4.), deneysel çalışmalara geçişi desteklemek amacıyla giriş fan hızı, giriş fan konumu, çıkışta çıkış fanı kullanımı ve kullanılmaması, çıkış fan konumu ve çıkış fan hızı gibi kritik parametreler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, üç farklı deney türü altında gerçekleştirilmiştir: Üstten 2 Giriş, Ortadan 1 Çıkış (Tasarım 1), Geniş Taraftan Giriş, Yanlardan 2 Çıkış (Tasarım 2) ve Karşılıklı 2 Giriş, Karşılıklı 2 Çıkış (Tasarım 3). Her bir deney türü için farklı giriş ve çıkış hızları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Giriş fan hızları 4 m/s, 8 m/s ve 12 m/s olarak belirlenmiş ve bu hızların akış homojenliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Giriş fanlarının konumu, her bir tasarımın geometrik düzenine göre optimize edilmiştir; örneğin, Tasarım 1'de giriş fanları üst kısımda, Tasarım 3'te ise ortada karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Çıkışta çıkış fanı kullanımı, çıkış hızlarının dengelenmesi ve akış homojenliğinin iyileştirilmesi açısından önemli bir etki göstermiştir. Çıkış fanlarının konumu, her bir düzenlemede simetrik ve akış yönüne uygun şekilde optimize edilmiştir. Çıkış fan hızları ise giriş fan hızlarıyla uyumlu olacak

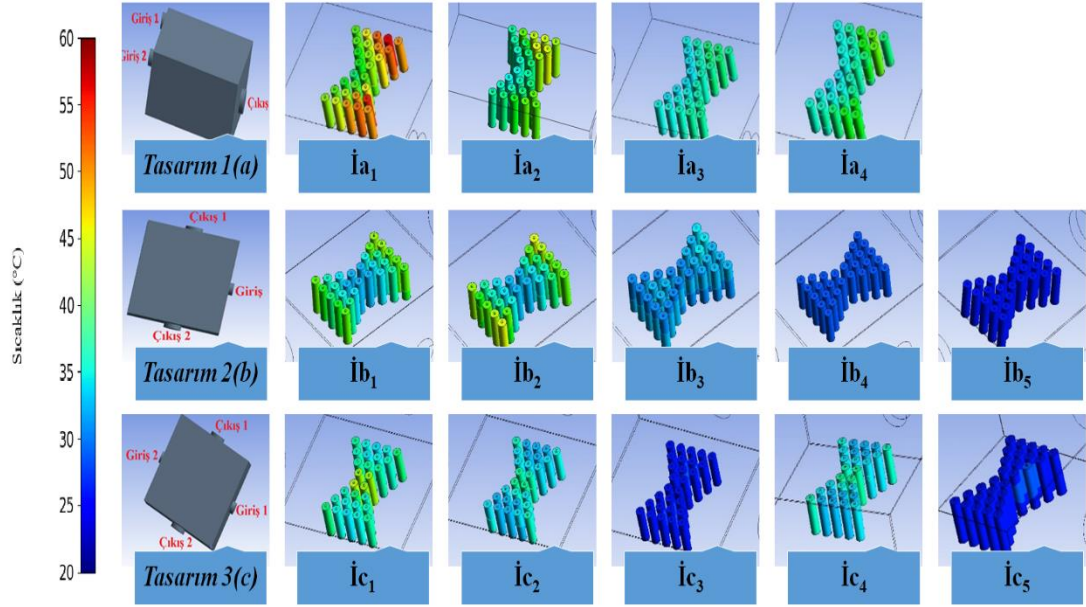
şekilde 2 m/s ve 4 m/s olarak belirlenmiş ve özellikle yüksek giriş hızlarında (12 m/s) çıkış akışının homojenliğini artırmada etkili olmuştur. Bu parametreler, batarya paketlerinin termal yönetim performansını optimize etmek ve farklı tasarım türlerinin akış dinamikleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için önemli bir temel oluşturmuştur.

Tablo 4.4. İçbükey dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri

Geometrik Model	Tasarım Tipi	Analiz Numarası	Giriş Fan Hızları (m/s)	Çıkış Fan Hızları (m/s)
İçbükey (İ)	Tasarım 1 (a)	İa ₁	4	-
		İa ₂	8	-
		İa ₃	8	2
		İa ₄	8	4
	Tasarım 2 (b)	İb ₁	8	-
		İb ₂	8	2
		İb ₃	8	4
		İb ₄	12	-
		İb ₅	12	2
	Tasarım 3 (c)	İc ₁	4	-
		İc ₂	8	-
		İc ₃	8	2
		İc ₄	8	4
		İc ₅	12	2

Dipnot: İ: İçbükey dizilim; İa: Tasarım 1; İb: Tasarım 2; İc: Tasarım 3

Tablo 4.4'te yer alan farklı fan hızları ve konumlarına ait parametre kombinasyonları doğrultusunda gerçekleştirilen simülasyonlar, batarya paketinin termal performansını optimize etme açısından önemli veriler sunmaktadır. Bu parametrelerin her biri, batarya hücreleri arasında oluşan sıcaklık farklarını azaltma ve genel sıcaklık homojenliğini iyileştirme hedefiyle belirlenmiştir. Çizelgedeki senaryoların karşılaştırmalı değerlendirilmesi, özellikle çıkış fanı kullanımının ve fan konumlandırmasının soğutma etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Şekil 4.16.'da sunulan simülasyon görselleri, her bir tasarım stratejisi ve senaryo için elde edilen sıcaklık dağılımlarını görsel olarak ortaya koymakta olup, çizelgedeki sayısal bulgularla birlikte yorumlanarak detaylı analizlere temel oluşturmaktadır.

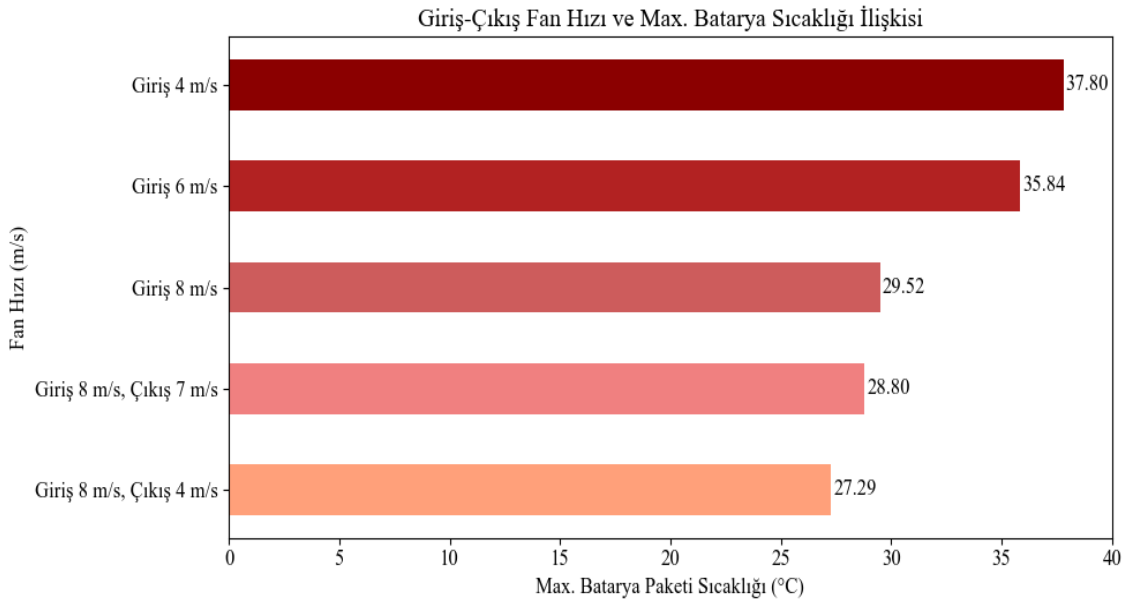


Şekil 4.16. İçbükey dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları

Yürütülen çalışmada, üç farklı hava soğutmalı batarya paket tasarımı için farklı giriş ve çıkış fan hızlarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarım 1 kapsamında elde edilen İa₁–İa₄ numaralı görsellerde, özellikle çıkış fanı kullanılmayan senaryolarda (İa₁ ve İa₂), batarya hücreleri arasında ciddi sıcaklık birikimleri gözlemlenmiştir. Bu duruma karşılık çıkış fanının 2 m/s ve 4 m/s hızlarında devreye alınmasıyla (İa₃ ve İa₄), sıcaklık seviyelerinde belirgin düşüş ve daha homojen bir dağılım sağlandığı görülmüştür. Tasarım 2’ ye ait İb₁–İb₅ numaralı görsellerde, geniş yüzeyden hava girişinin ve yanlardan çıkışın sağlandığı bu düzende, çıkış fanının kullanılması sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde artırmış; özellikle İb₅ senaryosunda (giriş: 12 m/s, çıkış: 2 m/s) sıcaklığın batarya hücreleri arasında oldukça dengeli dağıldığı tespit edilmiştir. Tasarım 3 kapsamında karşılıklı giriş ve çıkışların uygulandığı İc₁–İc₅ görsellerinde ise, simetrik hava akışı sayesinde soğutma performansının diğer tasarımlara kıyasla daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Düşük giriş hızlarında (İc₁) sıcaklık farkları belirgin olmakla birlikte, çıkış fanı ile birlikte 12 m/s giriş ve 2 m/s çıkış hızının kullanıldığı İc₅ senaryosunda, batarya paketindeki sıcaklık dağılımı en homojen ve düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çıkış fanının kullanılması her üç tasarımda da sıcaklık birikimini azaltmakta ve hücreler arası sıcaklık farklarını minimize ederek termal homojenliği iyileştirmektedir. Bununla birlikte, en başarılı sonuçlar Tasarım 3’te elde

edilmiş olup, bu tasarımın hava akışı yönü ve fan konumlandırmasının batarya termal yönetimi açısından optimize bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda, en iyi sonucu veren Tasarım 3 için deneysel çalışmalara geçilmiş ve laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, içbükey dizilime sahip batarya paketi için farklı giriş ve çıkış fan hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. İlk testte, yalnızca 4 m/s giriş fan hızı uygulanmış ve çıkış fanı devre dışı bırakılmıştır. İkinci testte, giriş fan hızı 6 m/s'ye çıkarılmış ancak yine çıkış fanı kullanılmamıştır. Üçüncü test senaryosunda, giriş fan hızı 8 m/s'ye yükseltilmiş ve çıkış fanı olmadan sistem çalıştırılmıştır. Dördüncü durumda, giriş fan hızı 8 m/s olarak korunmuş, çıkış fanı ise 4 m/s hızla devreye alınmıştır. Son testte ise, giriş fanı yine 8 m/s, çıkış fanı ise 7 m/s olarak ayarlanmıştır. Bu beş farklı hız kombinasyonu, içbükey dizilimde giriş ve çıkış fanlarının sıcaklık dağılımı ile termal kararlılık üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, giriş fan hızının artırılmasının ve özellikle çıkış fanının devreye alınmasının, batarya paketi içerisindeki sıcaklık farklarını azaltmada ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamada belirleyici olduğunu göstermiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. 10 Amper akım için içbükey dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi

Şekil 4.17’de sunulan deneysel bulgular, 10 amperlik sabit akım altında içbükey dizilime sahip batarya paketi için gerçekleştirilen farklı giriş ve çıkış fan hızı senaryolarının maksimum sıcaklık üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. İlk testte yalnızca 4 m/s giriş fan hızı uygulanmış ve bu durumda maksimum sıcaklık 37,80 °C ile en yüksek seviyede ölçülmüştür. İkinci testte giriş fan hızı 6 m/s’ye çıkarıldığında maksimum sıcaklık 35,84 °C’ye düşmüş; üçüncü testte ise giriş fanı 8 m/s’ye yükseltilmiş ve sıcaklık 29,52 °C’ye kadar gerilemiştir. Bu sonuçlar, fan hızının artırılmasının batarya yüzeyinden ısı uzaklaştırma kapasitesini önemli ölçüde artırarak termal yönetimi iyileştirdiğini açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, yalnızca giriş fanı kullanıldığında elde edilen sıcaklık değerlerinin, sistemin homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamada yetersiz kaldığını göstermektedir. Dördüncü ve beşinci testlerde çıkış fanı da devreye alınmış; sırasıyla 4 m/s ve 7 m/s hızlarında çalıştırılmıştır. Giriş 8 m/s ve çıkış 4 m/s senaryosunda maksimum sıcaklık 27,29 °C’ye düşerken, çıkış fan hızının 7 m/s olduğu durumda sıcaklık 28,80 °C olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, özellikle giriş ve çıkış fan hızlarının dengeli bir şekilde ayarlanmasının batarya paketi içinde daha düşük maksimum sıcaklıklar ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmesinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. En başarılı sonuç, 8 m/s giriş ve 4 m/s çıkış fan hızı kombinasyonunda elde edilmiş; bu durum, yüksek çıkış fan hızlarının hava akışını bozarak süpürme etkisi yaratabileceğini ve soğutma verimliliğini azaltabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, sistemin termal performansını optimize edebilmek için fan hızlarının dikkatle seçilmesi ve birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

10 A sabit akım altında gerçekleştirilen testler, fan hızının artmasıyla batarya paketi sıcaklığının belirgin şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, artan fan hızının batarya yüzeyinden daha fazla ısıyı uzaklaştırarak termal yönetim performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak yalnızca giriş fanı kullanılan senaryolarda, özellikle düşük hızlarda (4 m/s ve 6 m/s), batarya sıcaklıkları hâlâ yüksek seviyelerde seyretmekte ve bu da termal yönetimin yetersiz kaldığını göstermektedir. Giriş fan hızının 8 m/s 'ye çıkarıldığı durumlarda, çıkış fanının da devreye alınmasıyla sıcaklık dağılımında olumlu yönde bir değişim gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, çıkış fanının termal dengeleme üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymakta; sıcaklık farkını azaltarak sistemin termal kararlılığını artırdığını göstermektedir. Dolayısıyla, hem giriş hem de çıkış fanlarının birlikte çalışması, batarya yüzeyinden ısının daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayarak genel termal yönetim performansını artırmaktadır. Fan hızlarının optimize edilmesi, bataryanın güvenli bir sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak açısından kritik

bir faktördür. Bu çalışma, BTMS' nin tasarımında giriş ve çıkış fan hızlarının birlikte değerlendirilmesi ve dikkatlice seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Dış bükey dizilim için gerçekleştirilen simülasyonlarda (Tablo 4.5.), deneysel çalışmalara geçişi desteklemek amacıyla giriş fan hızı, giriş fan konumu, çıkışta çıkış fanı kullanımı ve kullanılmaması, çıkış fan konumu ve çıkış fan hızı gibi kritik parametreler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, üç farklı deney türü altında gerçekleştirilmiştir: Üstten 2 Giriş, Ortadan 1 Çıkış (Tasarım 1), Geniş Taraftan Giriş, Yanlardan 2 Çıkış (Tasarım 2) ve Karşılıklı 2 Giriş, Karşılıklı 2 Çıkış (Tasarım 3). Her bir deney türü için farklı giriş ve çıkış hızları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Giriş fan hızları 4 m/s, 8 m/s ve 12 m/s olarak belirlenmiş ve bu hızların akış homojenliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Giriş fanlarının konumu, her bir tasarımın geometrik düzenine göre optimize edilmiştir. Çıkışta ise çıkış fanı kullanımı, çıkış hızlarının dengelenmesi ve akış homojenliğinin iyileştirilmesi açısından önemli bir etki göstermiştir. Çıkış fanlarının konumu, her bir düzenlemede simetrik ve akış yönüne uygun şekilde optimize edilmiştir.

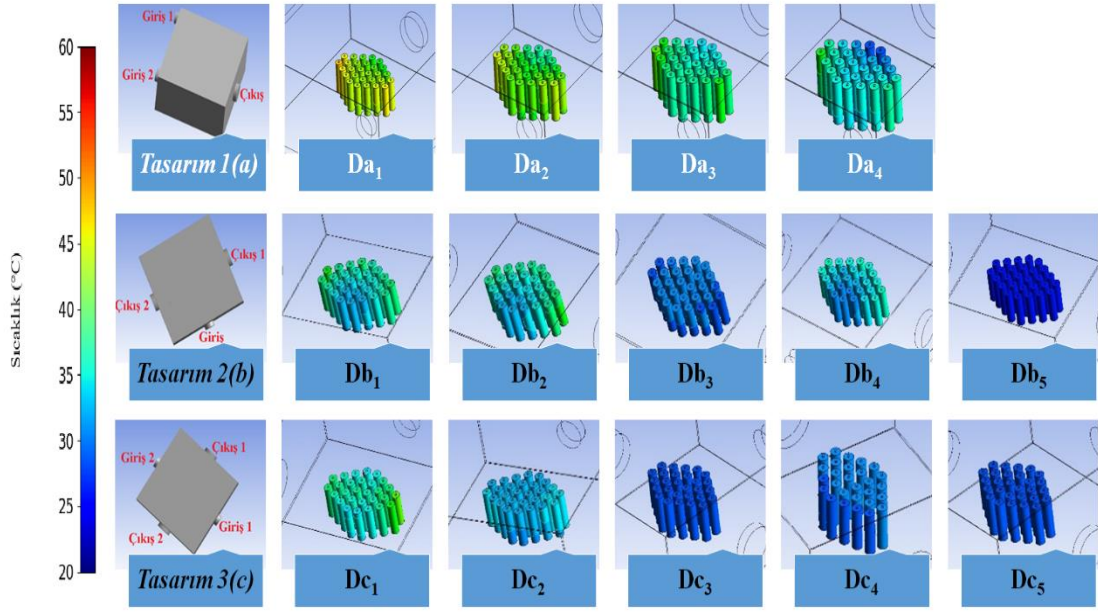
Tablo 4.5. Dışbükey dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri

Geometrik Model	Tasarım Tipi	Analiz Numarası	Giriş Fan Hızları (m/s)	Çıkış Fan Hızları (m/s)
Dışbükey (D)	Tasarım 1 (a)	Da ₁	4	-
		Da ₂	8	-
		Da ₃	8	2
		Da ₄	8	4
	Tasarım 2 (b)	Db ₁	8	-
		Db ₂	8	2
		Db ₃	8	4
		Db ₄	12	-
		Db ₅	12	2
	Tasarım 3 (c)	Dc ₁	4	-
		Dc ₂	8	-
		Dc ₃	8	2
		Dc ₄	8	4
		Dc ₅	12	2

Dipnot: D: Dışbükey dizilim; Da: Tasarım 1; Db: Tasarım 2; Dc: Tasarım 3

Tablo 4.5'te yer alan farklı fan hızları ve konumlarına ait parametre kombinasyonları doğrultusunda gerçekleştirilen simülasyonlar, batarya paketinin termal performansını optimize etme açısından önemli veriler sunmaktadır. Bu parametrelerin her biri, batarya hücreleri arasında oluşan sıcaklık farklarını azaltma ve genel sıcaklık homojenliğini iyileştirme hedefiyle belirlenmiştir. Tablodaki senaryoların karşılaştırmalı

değerlendirilmesi, özellikle çıkış fanı kullanımının ve fan konumlandırmasının soğutma etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Şekil 4.18.'de sunulan simülasyon görselleri, her bir tasarım stratejisi ve senaryo için elde edilen sıcaklık dağılımlarını görsel olarak ortaya koymakta olup, çizelgedeki sayısal bulgularla birlikte yorumlanarak detaylı analizlere temel oluşturmaktadır.

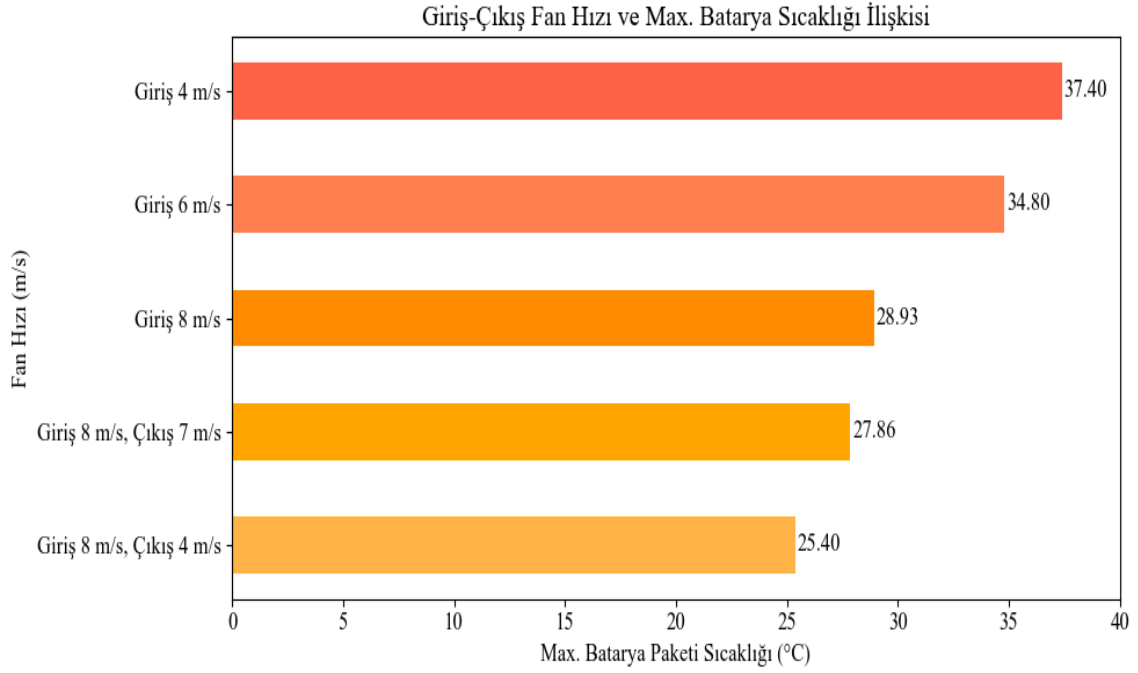


Şekil 4.18. Dışbükey dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları

Yürütülen çalışmada, üç farklı hava soğutmalı batarya paket tasarımı için farklı giriş ve çıkış fan hızlarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarım 1 kapsamında elde edilen Da₁–Da₄ numaralı görsellerde, özellikle çıkış fanı kullanılmayan senaryolarda (Da₁ ve Da₂), batarya hücreleri arasında ciddi sıcaklık birikimleri gözlemlenmiştir. Bu duruma karşılık çıkış fanının 2 m/s ve 4 m/s hızlarında devreye alınmasıyla (Da₃ ve Da₄), sıcaklık seviyelerinde belirgin düşüş ve daha homojen bir dağılım sağlandığı görülmüştür. Tasarım 2' ye ait Db₁–Db₅ numaralı görsellerde, geniş yüzeyden hava girişinin ve yanlardan çıkışın sağlandığı bu düzende, çıkış fanının kullanılması sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde artırmış; özellikle Da₅ senaryosunda (giriş: 12 m/s, çıkış: 2 m/s) sıcaklığın batarya hücreleri arasında oldukça dengeli dağıldığı tespit edilmiştir. Tasarım 3 kapsamında karşılıklı giriş ve çıkışların uygulandığı Dc₁–Dc₅ görsellerinde ise, simetrik hava akışı sayesinde soğutma performansının diğer tasarımlara kıyasla daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Düşük giriş hızlarında (Dc₁) sıcaklık farkları belirgin olmakla birlikte,

çıkış fanı ile birlikte 12 m/s giriş ve 2 m/s çıkış hızının kullanıldığı Dc₅ senaryosunda, batarya paketindeki sıcaklık dağılımı en homojen ve düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çıkış fanının kullanılması her üç tasarımda da sıcaklık birikimini azaltmakta ve hücreler arası sıcaklık farklarını minimize ederek termal homojenliği iyileştirmektedir. Bununla birlikte, en başarılı sonuçlar Tasarım 3'te elde edilmiş olup, bu tasarımın hava akışı yönü ve fan konumlandırmasının batarya termal yönetimi açısından optimize bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda, en iyi sonucu veren Tasarım 3 için deneysel çalışmalara geçilmiş ve laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, dışbükey dizilime sahip batarya paketi için farklı giriş ve çıkış fan hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. İlk testte, yalnızca 4 m/s giriş fan hızı uygulanmış ve çıkış fanı devre dışı bırakılmıştır. İkinci testte, giriş fan hızı 6 m/s'ye çıkarılmış ancak yine çıkış fanı kullanılmamıştır. Üçüncü test senaryosunda, giriş fan hızı 8 m/s'ye yükseltilmiş ve çıkış fanı olmadan sistem çalıştırılmıştır. Dördüncü durumda, giriş fan hızı 8 m/s olarak korunmuş, çıkış fanı ise 4 m/s hızla devreye alınmıştır. Son testte ise, giriş fanı yine 8 m/s, çıkış fanı ise 7 m/s olarak ayarlanmıştır. Bu beş farklı hız kombinasyonu, dışbükey dizilimde giriş ve çıkış fanlarının sıcaklık dağılımı ile termal kararlılık üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, giriş fan hızının artırılmasının ve özellikle çıkış fanının devreye alınmasının, batarya paketi içerisindeki sıcaklık farklarını azaltmada ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamada belirleyici olduğunu göstermiştir (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. 10 Amper akım için dışbükey dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere, 10 A sabit akım altında fan hızının artırılması batarya paketinin sıcaklığında anlamlı bir düşüşe neden olmaktadır. Giriş fan hızının 4 m/s olduğu durumda, maksimum sıcaklık 37,4 °C ile en yüksek seviyede ölçülmüştür. Fan hızı 6 m/s’ye çıkarıldığında bu değer 34,8 °C’ye düşerken, 8 m/s hızında 28,93 °C’ye kadar gerilemiştir. Ancak, yalnızca giriş fanı kullanıldığında elde edilen sıcaklıkların sistemde homojen bir dağılım sağlamada yetersiz kaldığı görülmüştür. Dördüncü ve beşinci testlerde çıkış fanı da devreye alınmış ve sırasıyla 4 m/s ile 7 m/s hızlarında çalıştırılmıştır. Giriş fanı 8 m/s, çıkış fanı ise 4 m/s hızında çalıştığında maksimum sıcaklık 25,40 °C’ye düşmüştür. Çıkış fanı hızının 7 m/s’ye yükseltilmesi durumunda ise sıcaklık 27,86 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, artan fan hızlarının batarya yüzeyinden ısıyı daha etkin şekilde uzaklaştırarak termal yönetim performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle, 8 m/s giriş fanı hızında elde edilen sıcaklık değeri, bataryanın güvenli çalışma aralığına ulaşmasını sağlayarak sistemin termal kararlılığını sağlamaktadır. Fan hızının termal performans üzerindeki belirleyici etkisi açıkça doğrulanmış; optimum fan hızının belirlenmesi batarya sistemlerinin güvenli ve verimli çalışması için kritik bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, 10 A sabit akım altında gerçekleştirilen testlere dayanmaktadır. Fan hızının artırılmasıyla batarya paketi sıcaklığında anlamlı azalma sağlanmış ve artan fan hızı termal yönetimi

iyileştirmiştir. Ancak, yalnızca giriş fanının kullanıldığı düşük hızlarda (4 m/s ve 6 m/s) batarya sıcaklıklarının hâlâ yüksek seviyelerde kaldığı, dolayısıyla termal yönetimin yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.

Dışbükey dizilimde yapılan testlerde ise, giriş fan hızının 8 m/s'ye çıkarılması ve çıkış fanının devreye alınmasıyla sıcaklıklarda kayda değer bir iyileşme sağlanmıştır. Çıkış fanı, sıcaklık farklarını azaltarak sistemin termal kararlılığını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, hem giriş hem de çıkış fanlarının birlikte kullanılması, batarya yüzeyinden ısının daha etkin uzaklaştırılmasını sağlamış ve termal yönetim performansını önemli ölçüde artırmıştır. Fan hızlarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, bataryanın güvenli sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, özellikle dışbükey dizilime sahip sistemlerde giriş ve çıkış fan hızlarının tasarım sürecinde titizlikle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

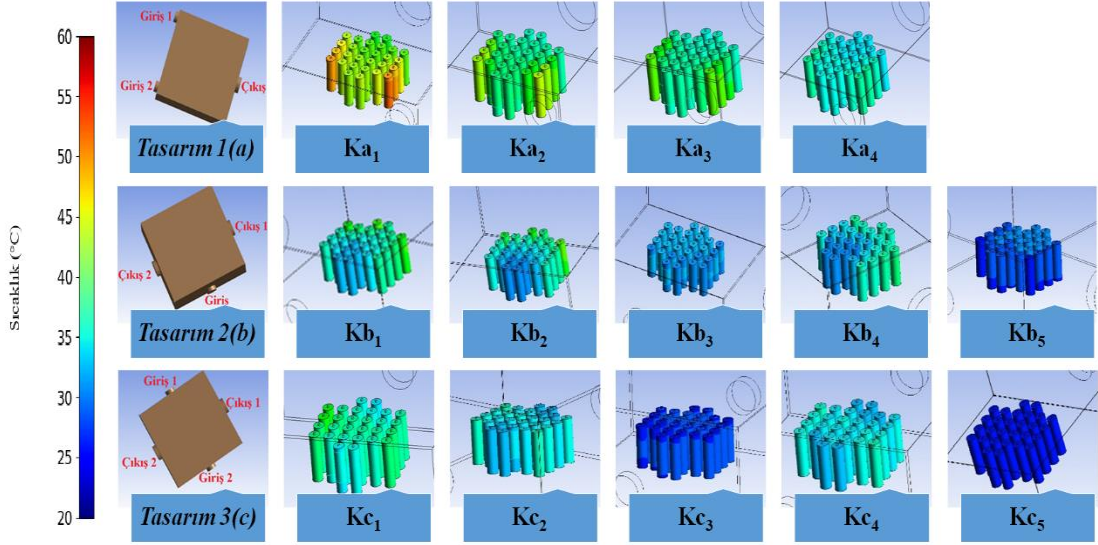
Köşeli dizilim için gerçekleştirilen simülasyonlarda (Tablo 4.6.), deneysel çalışmalara geçişi desteklemek amacıyla giriş fan hızı, giriş fan konumu, çıkışta çıkış fanı kullanımı ve kullanılmaması, çıkış fan konumu ve çıkış fan hızı gibi kritik parametreler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, üç farklı deney türü altında gerçekleştirilmiştir: Üstten 2 Giriş, Ortadan 1 Çıkış (Tasarım 1), Geniş Taraftan Giriş, Yanlardan 2 Çıkış (Tasarım 2) ve Karşılıklı 2 Giriş, Karşılıklı 2 Çıkış (Tasarım 3). Her bir deney türü için farklı giriş ve çıkış hızları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Giriş fan hızları 4 m/s, 8 m/s ve 12 m/s olarak belirlenmiş ve bu hızların akış homojenliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Giriş fanlarının konumu, her bir tasarımın geometrik düzenine göre optimize edilmiştir. Çıkışta çıkış fanı kullanımı, çıkış hızlarının dengelenmesi ve akış homojenliğinin iyileştirilmesi açısından önemli bir etki göstermiştir. Çıkış fanlarının konumu, her bir düzenlemede simetrik ve akış yönüne uygun şekilde optimize edilmiştir.

Tablo 4.6. Köşeli dizilimde 10 amper için sayısal tasarım parametreleri

Geometrik Model	Tasarım Tipi	Analiz Numarası	Giriş Fan Hızları (m/s)	Çıkış Fan Hızları (m/s)
Köşeli (K)	Tasarım 1 (a)	Ka ₁	4	-
		Ka ₂	8	-
		Ka ₃	8	2
		Ka ₄	8	4
	Tasarım 2 (b)	Kb ₁	8	-
		Kb ₂	8	2
		Kb ₃	8	4
		Kb ₄	12	-
		Kb ₅	12	2
	Tasarım 3 (c)	Kc ₁	4	-
		Kc ₂	8	-
		Kc ₃	8	2
		Kc ₄	8	4
		Kc ₅	12	2

Dipnot: K: Köşeli dizilim; Ka: Tasarım 1; Kb: Tasarım 2; Kc: Tasarım 3

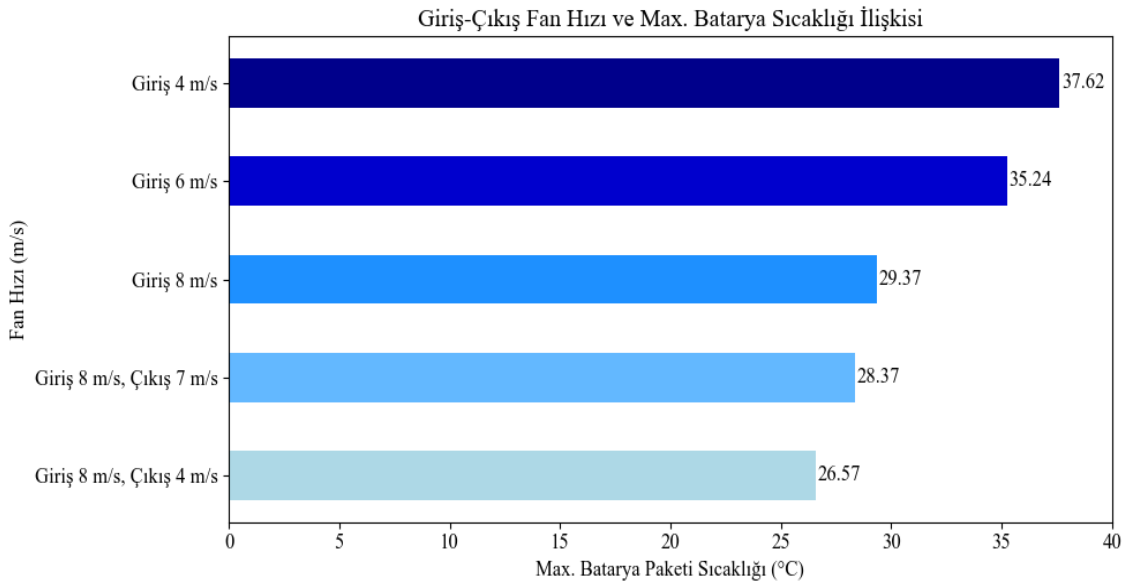
Tablo 4.6’da yer alan farklı fan hızları ve konumlarına ait parametre kombinasyonları doğrultusunda gerçekleştirilen simülasyonlar, batarya paketinin termal performansını optimize etme açısından önemli veriler sunmaktadır. Bu parametrelerin her biri, batarya hücreleri arasında oluşan sıcaklık farklarını azaltma ve genel sıcaklık homojenliğini iyileştirme hedefiyle belirlenmiştir. Çizelgedeki senaryoların karşılaştırmalı değerlendirilmesi, özellikle çıkış fanı kullanımının ve fan konumlandırmasının soğutma etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Şekil 4.22.’de sunulan simülasyon görselleri, her bir tasarım stratejisi ve senaryo için elde edilen sıcaklık dağılımlarını görsel olarak ortaya koymakta olup, çizelgedeki sayısal bulgularla birlikte yorumlanarak detaylı analizlere temel oluşturmaktadır.



Şekil 4.20. Köşeli dizilim için Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 simülasyon sonuçları

Yürütülen çalışmada, üç farklı hava soğutmalı batarya paket tasarımı için farklı giriş ve çıkış fan hızlarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarım 1 kapsamında elde edilen Ka₁–Ka₄ numaralı görsellerde, özellikle çıkış fanı kullanılmayan senaryolarda (Ka₁ ve Ka₂), batarya hücreleri arasında ciddi sıcaklık birikimleri gözlemlenmiştir. Bu duruma karşılık çıkış fanının 2 m/s ve 4 m/s hızlarında devreye alınmasıyla (Ka₃ ve Ka₄), sıcaklık seviyelerinde belirgin düşüş ve daha homojen bir dağılım sağlandığı görülmüştür. Tasarım 2' ye ait Kb₁–Kb₅ numaralı görsellerde, geniş yüzeyden hava girişinin ve yanlardan çıkışın sağlandığı bu düzende, çıkış fanının kullanılması sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde artırmış; özellikle Kb₅ senaryosunda (giriş: 12 m/s, çıkış: 2 m/s) sıcaklığın batarya hücreleri arasında oldukça dengeli dağıldığı tespit edilmiştir. Tasarım 3 kapsamında karşılıklı giriş ve çıkışların uygulandığı Kc₁–Kc₅ görsellerinde ise, simetrik hava akışı sayesinde soğutma performansının diğer tasarımlara kıyasla daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Düşük giriş hızlarında (Kc₁) sıcaklık farkları belirgin olmakla birlikte, çıkış fanı ile birlikte 12 m/s giriş ve 2 m/s çıkış hızının kullanıldığı Kc₅ senaryosunda, batarya paketindeki sıcaklık dağılımı en homojen ve düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çıkış fanının kullanılması her üç tasarımda da sıcaklık birikimini azaltmakta ve hücreler arası sıcaklık farklarını minimize ederek termal homojenliği iyileştirmektedir. Bununla birlikte, en başarılı sonuçlar Tasarım 3'te elde edilmiş olup, bu tasarımın hava akışı yönü ve fan konumlandırmasının batarya termal yönetimi açısından optimize bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda, en iyi sonucu veren Tasarım 3 için deneysel çalışmalara geçilmiş ve laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, köşeli dizilimli batarya paketi için farklı giriş ve çıkış fan hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. İlk testte, yalnızca 4 m/s giriş fan hızı uygulanmış ve çıkış fanı devre dışı bırakılmıştır. İkinci testte, giriş fan hızı 6 m/s'ye çıkarılmış ancak yine çıkış fanı kullanılmamıştır. Üçüncü test senaryosunda, giriş fan hızı 8 m/s'ye yükseltilmiş ve çıkış fanı olmadan sistem çalıştırılmıştır. Dördüncü durumda, giriş fan hızı 8 m/s olarak korunmuş, çıkış fanı ise 4 m/s hızla devreye alınmıştır. Son testte ise, giriş fanı yine 8 m/s, çıkış fanı ise 7 m/s olarak ayarlanmıştır. Bu beş farklı hız kombinasyonu, köşeli dizilimde giriş ve çıkış fanlarının sıcaklık dağılımı ile termal kararlılık üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, giriş fan hızının artırılmasının ve özellikle çıkış fanının devreye alınmasının, batarya paketi içerisindeki sıcaklık farklarını azaltmada ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamada belirleyici olduğunu göstermiştir (Şekil 4.21.).



Şekil 4.21. 10 Amper akım için köşeli dizilimde giriş hızının ve çıkış fanının soğutmaya etkisi

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere, köşeli dizilime sahip batarya paketi için 10 A sabit akım altında gerçekleştirilen deneylerde, farklı fan hızlarının batarya sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fan hızının artırılmasıyla batarya paketi sıcaklığının anlamlı düzeyde azaldığını göstermektedir. Giriş fan hızının 4 m/s olduğu durumda, maksimum sıcaklık 37,4 °C ile en yüksek seviyede ölçülmüştür. Fan hızının 6 m/s’ye çıkarılmasıyla bu değer 35,8 °C’ye düşerken, 8 m/s fan hızında ise maksimum

sıcaklık 29,5 °C'ye kadar azalmıştır. Sabit giriş fan hızı 8 m/s iken, farklı çıkış fan hızlarının etkileri de incelenmiştir. Çıkış fan hızının 4 m/s olduğu durumda batarya sıcaklığı en düşük seviye olan 26,57 °C'ye ulaşmıştır. Çıkış fan hızı 7 m/s'ye çıkarıldığında ise sıcaklık 28,37 °C olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, çıkış fanının devreye alınmasıyla batarya yüzeyinden ısıнын daha etkin şekilde uzaklaştırıldığını ve termal yönetim performansının önemli ölçüde artırıldığını ortaya koymaktadır. Ancak çıkış fan hızının 4 m/s üzerindeki artışı, sıcaklık düşüşünü sınırlı düzeyde etkilemiş ve optimum çıkış fan hızının sistemin enerji verimliliği ve termal performansı açısından kritik olduğu vurgulanmıştır. Artan fan hızlarının, batarya yüzeyinden daha fazla ısıyı uzaklaştırarak sistemin termal yönetimini önemli ölçüde iyileştirdiği; özellikle 8 m/s giriş fan hızında batarya sıcaklığının güvenli sınırlar içerisine düştüğü ve sistemin termal kararlılığının sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak, köşeli dizilimde giriş ve çıkış fanlarının birlikte kullanılması, sistemin termal kararlılığını sağlamada ve performansını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, fan hızlarının optimize edilerek termal yönetim sisteminin etkinliğinin artırılabilirliğini açıkça ortaya koymuştur.

10 Amper sabit akım altında içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimler için aynı giriş hava sıcaklığı, aynı süre ve aynı fan hızlarında (4 m/s, 6 m/s ve 8 m/s) gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, fan hızının artmasıyla batarya paketi sıcaklıklarının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük fan hızında (4 m/s), dışbükey dizilim 37,4 °C ile en düşük maksimum sıcaklık değerini verirken; köşeli dizilim 37,62 °C, içbükey dizilim ise 37,8 °C ile daha yüksek sıcaklıklar sergilemiştir. Orta fan hızında (6 m/s) dışbükey dizilim yine en iyi termal performansı göstererek maksimum sıcaklığı 34,8 °C'ye düşürmüş, köşeli dizilimde bu değer 35,24 °C, içbükey dizilimde ise 35,84 °C olarak ölçülmüştür. Yüksek fan hızında (8 m/s) ise dışbükey dizilim 28,93 °C ile en düşük sıcaklık değerini sağlarken; köşeli ve içbükey dizilimler sırasıyla 29,374 °C ve 29,525 °C sıcaklık değerleri ile onu takip etmiştir.

Bu bulgular, dışbükey dizilimin her üç fan hızı düzeyinde de batarya yüzeyinden ısıyı uzaklaştırma açısından en etkin dizilim olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük ve orta fan hızlarında, dışbükey dizilim, diğer dizilim türlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklar sağlamış ve böylece termal yönetim açısından üstün performans sergilemiştir.

Giriş fan hızının sabit 8 m/s olarak ayarlandığı ve çıkış fan hızlarının 4 m/s ve 7 m/s olarak değiştirildiği ilave testlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çıkış fanının devreye alınmasının sıcaklık farklarını azaltmada ve sistemin termal performansını iyileştirmede etkili olduğu açıkça gözlemlenmiştir. İçbükey dizilimde çıkış fanı

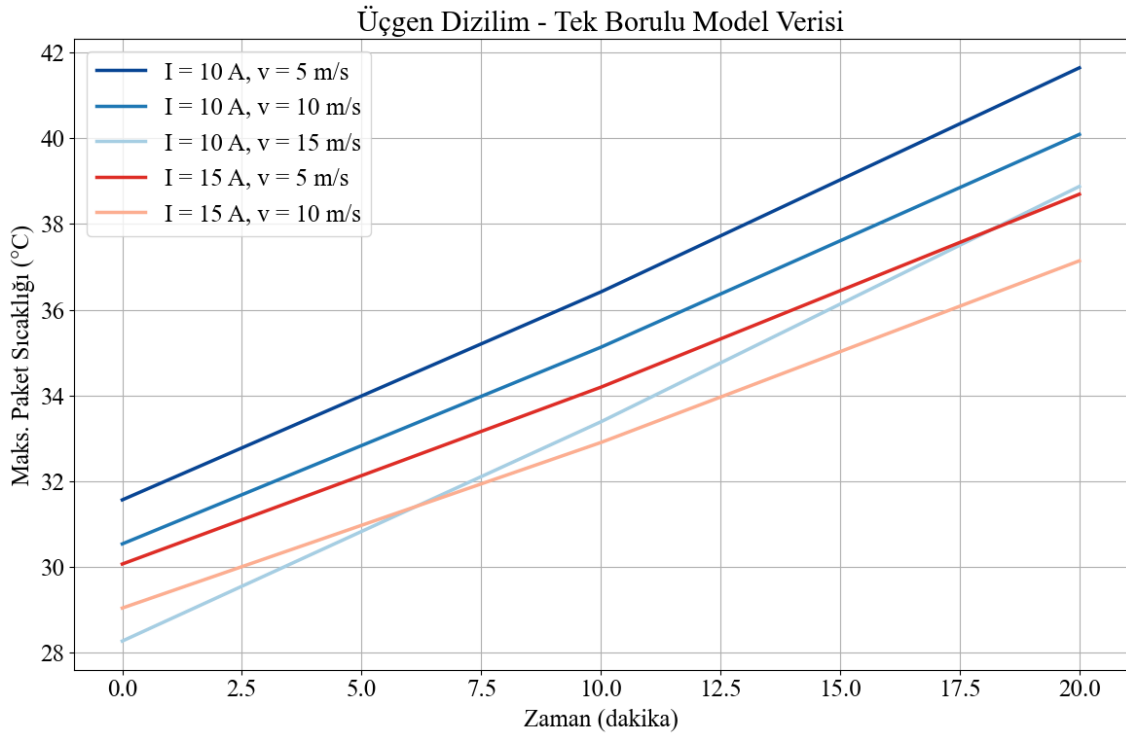
kullanılmadığında maksimum sıcaklık 29,52 °C iken, 4 m/s çıkış fanı ile bu değer 27,29 °C'ye düşmüş, 7 m/s hızında ise 28,80 °C olarak ölçülmüştür. Köşeli dizilimde çıkış fanı olmaksızın sıcaklık 29,37 °C, 4 m/s çıkış fanı ile 26,57 °C ve 7 m/s hızında 28,37 °C olarak tespit edilmiştir. Dışbükey dizilimde ise çıkış fanı devrede değilken sıcaklık 28,93 °C iken, 4 m/s fan hızıyla 25,40 °C'ye kadar düşmüş, 7 m/s hızda ise 27,86 °C'ye yükselmiştir.

Elde edilen bu veriler, dışbükey dizilimin yalnızca giriş fan hızına bağlı olarak değil, aynı zamanda çıkış fanının devreye alınmasıyla da en düşük sıcaklık değerlerine ulaştığını ve 4 m/s çıkış fan hızıyla 25,40 °C' lik minimum sıcaklığa erişerek termal yönetim açısından en iyi performansı sağladığını ortaya koymuştur. Bu kapsamda, dışbükey dizilimin batarya sistemlerinin termal kararlılığını sağlamada en etkili dizilim olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.2. Isı Borulu Soğutma Bulguları

Isı borulu termal yönetim sistemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizler sonucunda, farklı dizilim geometrilerine sahip batarya paketlerinin ısı borusu entegrasyonu altındaki termal tepkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Üçgen dizilimde 1 adet, içbükey dizilimde 2 adet, dışbükey dizilimde 3 adet ve köşeli dizilimde 2 adet ısı borusu kullanılarak yapılan çalışmalarda, batarya paketlerinin termal yönetiminde ve homojen sıcaklık kontrolüne olan katkısı değerlendirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, ısı borularının konumu ve temas yüzeyleri dikkate alınarak maksimum hücre sıcaklıkları ve hücreler arası sıcaklık farklarının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Isı borularının yüksek ısı iletim kapasiteleri sayesinde, belirli dizilimlerde belirgin termal iyileşmeler elde edilirken; bazı konfigürasyonlarda ise geometrik yerleşim nedeniyle ısı yayılımı sınırlı kalmış ve ısı transferinde düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ısı borulu soğutma sistemlerinde hem dizilim yapısının hem de ısı borularının yerleşiminin, sistemin termal kararlılığı ve güvenli çalışma aralığında tutulması açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

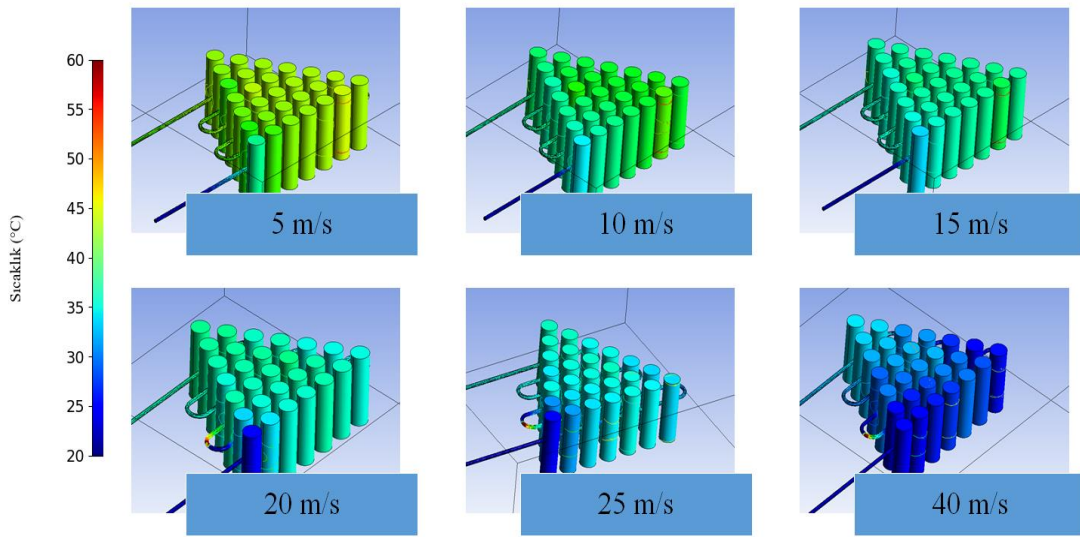
Bu çalışmada incelenen üçgen dizilime sahip tek borulu sistemin soğutma performansına ilişkin deneysel analiz verileri, Şekil 4.22. 'te sunulmuştur. Şekilde, farklı akım (10 A ve 15 A) ve hava akış hızı (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s) koşulları altında maksimum paket sıcaklığının zamanla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.22. 1 borulu üçgen dizilime sahip batarya paketi deneysel veriler

Şekil 4.22’de, üçgen dizilime sahip ve tek borulu bir batarya paketinde, farklı akım ve hava akış hızı koşullarında elde edilen modelleme verilerine göre maksimum batarya sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Genel olarak, zaman ilerledikçe maksimum batarya sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, özellikle yüksek akım uygulandığında daha belirgin hale gelmiştir; çünkü akımın artması, batarya sistemi içerisindeki ısı üretimini doğrudan artırmakta ve dolayısıyla daha yoğun bir soğutma ihtiyacı doğurmaktadır. Örneğin, 10 A akım ve 5 m/s hızda sıcaklık 31.5 °C’den 41.5 °C’ye yükselerek 10.0 °C’ lik bir artış göstermiştir. Aynı akım altında hava hızının 10 m/s’ye çıkarılmasıyla sıcaklık farkı 9.6 °C’ye, 15 m/s’de ise 9.0 °C’ye düşmüştür. Benzer şekilde, 15 A akım uygulanması durumunda, 5 m/s hızda sıcaklık artışı 8.5 °C, 10 m/s hızda ise 8.0 °C olarak kaydedilmiştir. Bu bulgular, sabit akım altında artan hava hızının konvektif ısı transferini artırarak maksimum sıcaklığı düşürdüğünü ve sıcaklık farkını azalttığını göstermektedir. Sonuç olarak, batarya paketlerinde yeterli hava akışı sağlanması, özellikle yüksek akım koşullarında termal yönetim açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Deneyisel hesaplamalar sonucu elde edilen bulguların model doğrulamasını sağlamak amacıyla, üçgen dizilime sahip tek borulu batarya paketinde kapsamlı termal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, özellikle kritik akım değeri olarak kabul edilen 10 A altında elde edilen veriler, sistemin soğutma performansını değerlendirmede temel referans olarak kullanılmıştır. Farklı akım ve hava hızı koşulları altında yapılan değerlendirmeler, batarya sisteminin termal davranışının hem zamana bağlı hem de işletme parametrelerine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yüksek akım seviyeleri ve düşük hava hızlarında, maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklık farklarının arttığı; dolayısıyla soğutma performansının yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, hava hızının artırılmasıyla birlikte sıcaklık dağılımının daha homojen hâle geldiği ve batarya hücreleri çevresindeki sıcaklık gradyanlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda yapılan analizler, batarya sistemlerinde uygun hava akışının sağlanmasının termal dengenin korunması açısından kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.23. 1 borulu üçgen dizilim sayısal sonuçları

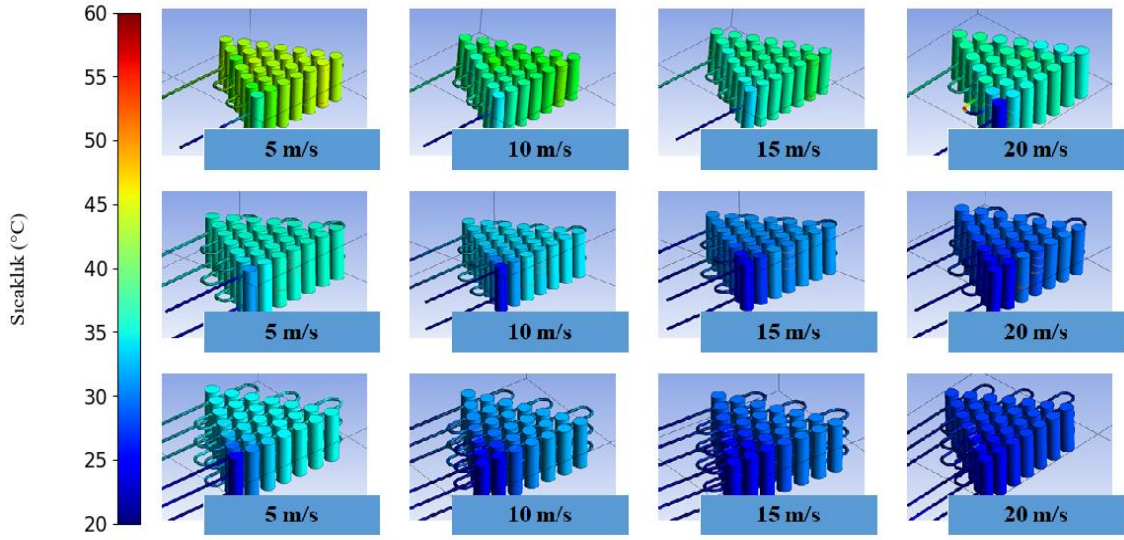
Şekil 4.23'te, üçgen dizilime sahip batarya paketine entegre edilmiş tek borulu hava soğutma sisteminde, farklı hava hızları (5–40 m/s) altında elde edilen sıcaklık dağılımı konturları sunulmuştur. Görsel analizler, hava hızının sistemin termal performansı üzerindeki belirleyici etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle düşük hızlarda (örneğin 5 m/s ve 10 m/s), boru yüzeylerinin giriş bölgelerinde sıcaklıkların yaklaşık 50 °C civarına ulaştığı görülmüştür. Bu hızlarda giriş yapan hava, sistemin yalnızca ön kısmında sınırlı bir soğutma etkisi yaratabilmiş; akışın boru boyunca

ilerledikçe etkinliğini kaybetmesiyle, arka sıralardaki batarya hücrelerinde yüksek sıcaklık bölgeleri oluşmuştur. Hava hızının 15 m/s'ye çıkarılmasıyla birlikte ortalama yüzey sıcaklıklarında belirgin bir düşüş yaşanmış, sıcaklık dağılımı daha homojen hâle gelmiş ve sıcaklıklar 35–45 °C aralığına gerilemiştir. Bu iyileşme, 20 m/s ve 25 m/s gibi daha yüksek hızlarda da sürmüştür; sıcaklıkların 25–35 °C seviyelerine kadar indiği ve soğutma etkinliğinin anlamlı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek performans ise 40 m/s hava hızında elde edilmiştir. Bu durumda, boru diziliminin neredeyse tamamı 20–25 °C aralığında sabitlenmiş; kontur haritalarında ise koyu mavi tonların baskın olduğu görülmüştür. Bu renk dağılımları, simülasyon yazılımında tanımlanan sıcaklık skalasına bağlı olarak görselleştirilmiş olup, sıcaklık seviyelerinin grafiksel ifadesidir. Renk skalasındaki ton değişimleri, ilgili bölgelerdeki ısı yük yoğunluğunu ve soğutma etkinliğini temsil etmektedir. Dolayısıyla, koyu kırmızı tonlar yüksek sıcaklıkları, mavi tonlar ise daha düşük sıcaklıkları ifade etmektedir. Bu bulgular, hava hızındaki artışın konvektif ısı transfer mekanizmasını etkin bir şekilde güçlendirerek maksimum sıcaklıkları düşürdüğünü ve sistemin genel termal yönetimini optimize ettiğini açıkça göstermektedir. Ancak, hava hızının artmasıyla birlikte fan gücü ve enerji tüketiminin de yükseldiği göz önünde bulundurulduğunda, 15–25 m/s aralığı, optimum soğutma performansı ile enerji verimliliği açısından en uygun çalışma bölgesi olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, yapılan sayısal modelleme çalışmaları yalnızca maksimum sıcaklıkların azaltılmasını değil, aynı zamanda sistem genelinde sıcaklık homojenliğinin sağlanmasını da mümkün kılmış; bu durum, batarya paketinin güvenli, kararlı ve uzun ömürlü çalışması açısından kritik bir avantaj sunmuştur.

Tüm koşullar değerlendirildiğinde, simülasyon modelinin doğruluğu hava akış hızı ile doğru orantılı şekilde artmakta, düşük hızlarda ise sıcaklık farkları belirginleşmektedir. 10 A deşarj akımında özellikle 10 m/s ve üzeri hava hızlarında, simülasyon modeli ile deneysel veriler arasında küçük sapmalar gözlenmiştir. Buna karşın, 5 m/s hava akış hızı gibi düşük akış rejimlerinde farklar olmakta ve bu da düşük hava debisinin sebep olduğu laminar/türbülans geçiş bölgesi akışlarının simülasyon ortamında yeterince temsil edilememesiyle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca iç ısı üretimi yüksek olan senaryolarda da sapmalar artış göstermektedir. Bu bağlamda, modelin orta-yüksek hava hızlarında oldukça güvenilir olduğu görülmektedir.

Şekil 4.24'te, iki borulu ve üç borulu hava soğutmalı BTMS' e ait, farklı hava hızlarındaki simülasyon sonuçları sunulmaktadır. İki borulu sistemde, her bir boru için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava hızlarında ayrı ayrı yapılan analizler, bu yapının tek borulu modele

kıyasla daha düşük sıcaklık değerlerine ulaştığını ve batarya yüzeyinde daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağladığını ortaya koymuştur. Üç borulu modelde ise daha kompakt bir boru yerleşimi bulunduğundan, sistem yine 5 – 20 m/s hava hızlarında test edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, düşük ve orta seviyeli hava hızlarında dahi etkili bir soğutma performansı sağlandığını ve batarya yüzeyinde ani sıcaklık artışlarının önüne geçilebildiğini göstermiştir.



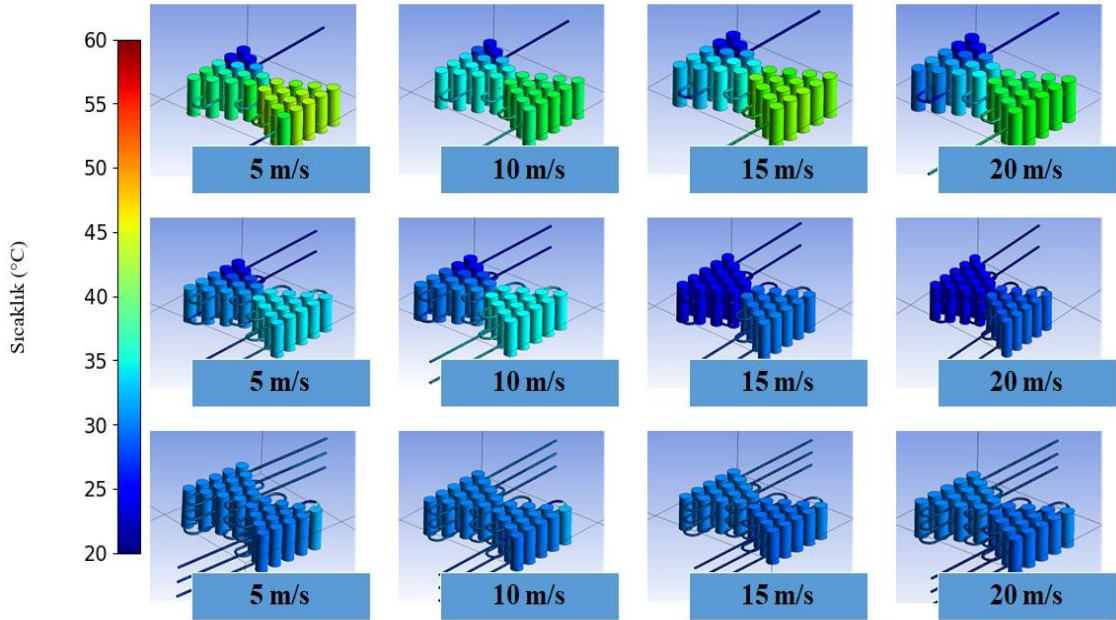
Şekil 4.24. Üçgen dizilim 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları

Şekil 4.24'te, üçgen dizilime sahip batarya paketine entegre edilmiş tek borulu, iki borulu ve üç borulu hava soğutmalı termal yönetim sistemlerine ait, farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 ve 20 m/s) elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görselde, yatay sıralama üstten alta doğru sırasıyla tek borulu, iki borulu ve üç borulu yapılandırmaları temsil etmektedir. Bu kapsamlı analiz, hem hava hızının hem de boru sayısının batarya paketindeki termal performansa etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Tek borulu sistemde, düşük hava hızlarında (özellikle 5 m/s) hava akışı yalnızca batarya modülünün ön sıralarına ulaşabilmiş ve bu da sınırlı bir soğutma etkisi yaratmıştır. Giriş bölgesinde oluşan şok etkisi, orantısız ve ani bir soğumaya yol açarak sistem genelinde termal dengesizliklere neden olmuştur. Akışın ilerlemesiyle birlikte hız ve basınç kayıpları artmış, özellikle arka sıralarda yüksek sıcaklık bölgeleri oluşmuştur. Bu yapıdaki sıcaklıklar 5 m/s'de 45–50 °C, 10 m/s'de 40–45 °C, 15 m/s'de 35–40 °C ve 20 m/s'de 32–37 °C aralığında ölçülmüştür. Ancak tek borulu sistem, yalnızca yüksek hava hızlarında etkili sonuçlar vermekte; bu durum da fan gücü ve enerji tüketiminin

artmasına, dolayısıyla sistem verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. İki borulu sistemde ise hava akışı daha dengeli yönlendirilmiş ve soğutma yüzeyleri üzerindeki konvektif ısı transferi anlamlı ölçüde iyileştirilmiştir. 5 m/s hava hızında bile tek borulu yapıya göre daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmiş (37–42 °C); bu değerler 10 m/s’de 33–37 °C, 15 m/s’de 30–35 °C ve 20 m/s’de 25–30 °C aralığına gerilemiştir. İlk temastaki şok etkisinin daha yaygın bir alana dağılması sayesinde, soğutma başlangıcı daha dengeli gerçekleşmiş ve ani sıcaklık farklarının oluşturduğu termal stres önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu yapı, orta düzey hava hızlarında dahi yeterli performans sağlayarak, hem termal denge hem de enerji verimliliği açısından etkili bir alternatif sunmaktadır. Üç borulu sistem ise yönlendirilmiş ve kompakt hava akışı sayesinde tüm hava hızlarında en yüksek soğutma performansını sergilemiştir. Özellikle 5 m/s gibi düşük hızlarda dahi batarya modülü genelinde yüksek sıcaklık homojenliği sağlanmış, sıcaklıklar 30–35 °C aralığında kalmıştır. Havanın 10 m/s ve 15 m/s’ye çıkarılmasıyla sıcaklıklar sırasıyla 25–30 °C ve 20–25 °C düzeylerine gerilemiş, 20 m/s’de ise tüm boruların yüzey sıcaklıkları 20–25 °C arasında sabitlenmiştir. Bu sonuçlar, düşük hava hızlarında bile maksimum sıcaklık farklarının azaltılarak kararlı bir termal yapının elde edildiğini göstermektedir. Ancak, üç borulu sistemin bu üstün performansına rağmen, daha karmaşık bir tasarıma sahip olması maliyet artışı, üretim zorlukları ve montaj sürecinde mühendislik hassasiyeti gerektirmesi gibi dezavantajlar doğurmaktadır. Sistem boyutlarının kompaktlaşması, iç akış yollarının daralmasına ve üretim toleranslarının sıkılaşmasına neden olmakta; bu da prototipleme ve uygulama süreçlerini daha karmaşık hâle getirmektedir. Sonuç olarak, BTMS’ de yalnızca maksimum sıcaklıkların düşürülmesi değil, aynı zamanda sıcaklık dağılımının homojenliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Üç borulu yapı, bu bağlamda en yüksek termal performansı sunarken; iki borulu yapı, özellikle orta seviye hava hızlarında optimum verimlilik sağlamaktadır. Tek borulu sistem ise sadece yüksek hava hızlarında tatmin edici sonuçlar vermekte ve bu da enerji tüketimi ile soğutma etkinliği arasında dikkatli bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, sistem tasarımında boru sayısı, hava hızı, enerji tüketimi, üretim maliyeti ve montaj kolaylığı gibi mühendislik kriterlerinin bir bütün olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Üçgen dizilime sahip ısı borulu sistemin ardından, batarya paketinin termal yönetim performansını artırmak amacıyla içbükey dizilim yapısına geçilmiştir. İçbükey dizilime sahip sistemde, hava akışının farklı boru yapılandırmalarıyla hücreler üzerindeki etkisini analiz edebilmek amacıyla 1, 2 ve 3 borulu düzenekler tasarlanmış ve kapsamlı sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, tüm

konfigürasyonlar için 10 amperlik deşarj akımı altında 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s hava hızlarında analizler yapılmıştır. Bu geniş parametre aralığı sayesinde hem boru sayısının hem de hava akış hızının batarya paketi üzerindeki termal etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş; elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları Şekil 4.25.'de sunulmuştur.



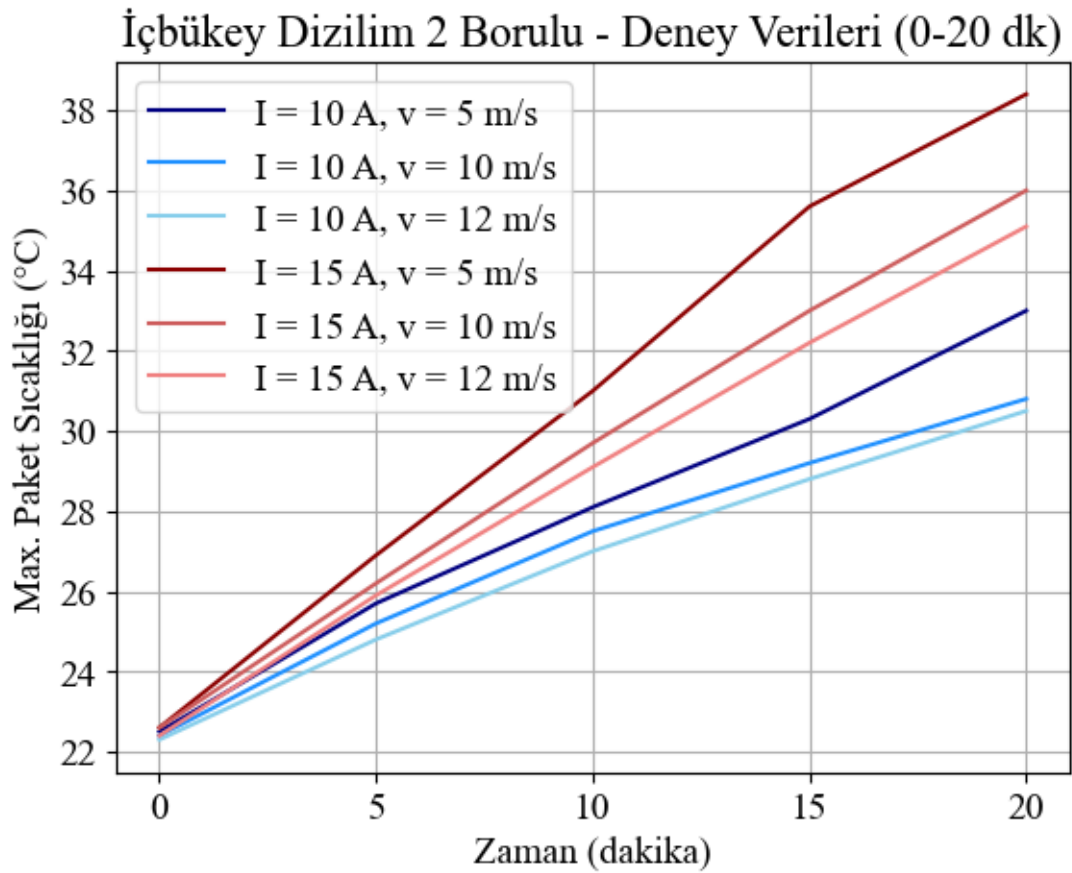
Şekil 4.25. İçbükey dizilim 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları

Şekil 4.25'te, içbükey dizilime sahip batarya paketine entegre edilmiş tek borulu, iki borulu ve üç borulu hava soğutmalı termal yönetim sistemlerine ait, farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 ve 20 m/s) elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görselde, yatay sıralama üstten alta doğru sırasıyla tek borulu, iki borulu ve üç borulu yapılandırmaları temsil etmektedir. Bu analiz, hem hava hızının hem de boru sayısının içbükey dizilimli batarya yapılarında termal performans üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Tek borulu sistemde, düşük hava hızlarında (özellikle 5 m/s) hava akışı sadece batarya modülünün ön bölgelerine ulaşabilmiş ve bu durum sınırlı bir soğutma etkisine neden olmuştur. İçbükey dizilimin oluşturduğu hava dolaşımı kısıtlamaları, giriş bölgesinde şok etkisinin artmasına ve sistem genelinde termal dengesizliklere yol açmıştır. Akışın ilerlemesiyle birlikte hız ve basınç kayıpları meydana gelmiş, özellikle batarya dizisinin iç bükey kavislerinde sıcak hava birikimleri gözlemlenmiştir. Bu yapıdaki sıcaklıklar 5 m/s'de 42–48 °C, 10 m/s'de 38–44 °C, 15 m/s'de 35–40 °C ve 20 m/s'de 31–36 °C aralığında kalmıştır. Ancak tek borulu sistem yalnızca yüksek hava hızlarında etkili sonuçlar verebilmekte; bu da enerji tüketiminin

artmasına ve sistem verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. İki borulu sistemde ise hava akışı daha dengeli yönlendirilmiş ve içbükey yapının merkez bölgelerine kadar nüfuz ederek soğutma yüzeyleri üzerindeki konvektif ısı transferi önemli ölçüde iyileştirilmiştir. 5 m/s hava hızında dahi tek borulu yapıya göre daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmiş (36–40 °C); bu değerler 10 m/s’de 32–36 °C, 15 m/s’de 29–34 °C ve 20 m/s’de 25–30 °C aralığına gerilemiştir. İlk temas bölgesindeki ani sıcaklık düşüşü daha geniş bir alana yayılmış ve bu durum sistem genelinde daha homojen bir soğutma sağlamıştır. İki borulu yapı, orta düzey hava hızlarında dahi yeterli performans sunarak, enerji verimliliği açısından dikkat çekici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Üç borulu sistem ise yönlendirilmiş ve kompakt hava akışı sayesinde içbükey dizilimde dahi tüm hava hızlarında en yüksek soğutma performansını sergilemiştir. 5 m/s gibi düşük hava hızlarında bile tüm batarya modülünde yüksek sıcaklık homojenliği sağlanmış, sıcaklıklar 30–35 °C aralığında tutulmuştur. Hava hızının 10 m/s ve 15 m/s’ye çıkarılmasıyla sıcaklıklar sırasıyla 25–30 °C ve 20–25 °C seviyelerine düşmüş, 20 m/s’de ise tüm boruların yüzey sıcaklıkları 20–25 °C arasında sabitlenmiştir. Bu sonuçlar, düşük hava hızlarında bile içbükey dizilimin getirdiği akış zorluklarının üç borulu yapı ile başarıyla aşılabildiğini ve termal kararlılığın sağlandığını göstermektedir. Ancak üç borulu sistemin bu yüksek performansı, karmaşık yapısı nedeniyle üretim zorlukları, maliyet artışı ve montaj sürecinde mühendislik hassasiyeti gerektirmesi gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. İçbükey dizilim ile birleştğinde, sistemin kompakt yapısı iç akış yollarının daha da daralmasına neden olmakta; bu da üretim toleranslarını zorlaştırmakta ve prototipleme sürecini karmaşıktırmaktadır. Sonuç olarak, içbükey dizilime sahip BTMS’ de yalnızca maksimum sıcaklıkların düşürülmesi değil, sıcaklık dağılımının homojenliği de dikkate alınmalıdır. Üç borulu yapı bu bağlamda en yüksek termal performansı sunarken; iki borulu yapı, orta seviye hava hızlarında optimum verimlilik sağlamaktadır. Tek borulu sistem ise sadece yüksek hava hızlarında tatmin edici sonuçlar sunmakta ve bu da enerji tüketimi ile soğutma etkinliği arasında dikkatli bir denge kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, sistem tasarımında boru sayısı, hava hızı, enerji tüketimi, üretim maliyeti ve montaj kolaylığı gibi mühendislik parametrelerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sayısal analiz bulgularının doğrulanması amacıyla 2 borulu konfigürasyon için fiziksel bir deney düzeneği hazırlanmış ve çeşitli hava hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, batarya hücreleri üzerine uygulanan soğutma performansını değerlendirebilmek için sırasıyla 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında

testler yapılmış; bu testler 10 amperlik deşarj akımı altında yürütülmüştür. Ayrıca, daha yüksek olan 15 amperlik deşarj akımı altında ise batarya sıcaklıklarındaki artışın daha belirgin olacağı öngörülerek 5 m/s ve 10 m/s hızlarında testler uygulanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan borular içerisinden hava geçirilerek sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleri yardımıyla ölçülmüş ve farklı hava hızlarının soğutma performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları ve batarya tepki verileri Şekil 4.26’da verilmiş olup, bu veriler hem sistemin yüksek akım altındaki davranışını ortaya koymakta hem de sayısal model doğrulamasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.26. İçbükey dizilim 2 borulu deneysel sonuçları

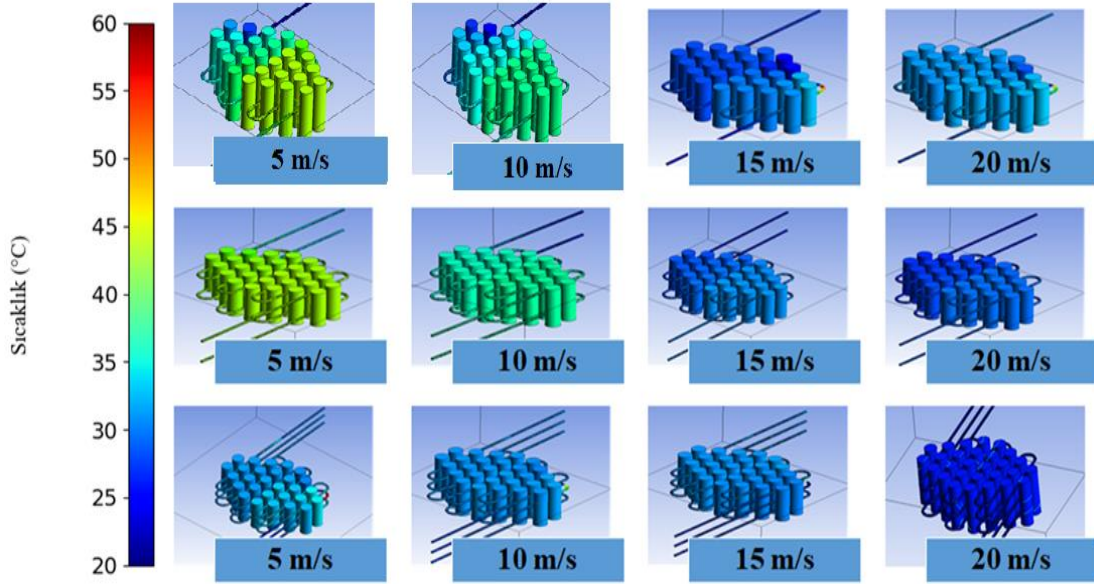
Şekil 4.26’da, içbükey dizilime sahip batarya paketinin iki borulu hava soğutma sistemi altında, farklı hava hızları (5 m/s, 10 m/s, 12 m/s) ve iki farklı deşarj akımı (10 A ve 15 A) için 0–20 dakika aralığında elde edilen deneysel maksimum batarya sıcaklığı verileri sunulmuştur. Grafik, hem uygulanan akımın hem de hava akış hızının batarya sıcaklığı üzerindeki etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. 10 amperlik deşarj akımı altında, artan hava akış hızı batarya sıcaklığındaki yükselişi önemli ölçüde sınırlamıştır.

5 m/s hava akış hızında maksimum sıcaklık yaklaşık 35 °C'ye kadar ulaşırken, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında bu değer sırasıyla yaklaşık 32 °C ve 30 °C seviyelerinde kalmıştır. Bu sonuç, hava akış hızındaki artışın konvektif ısı transferini artırarak daha etkili bir soğutma sağladığını göstermektedir. 15 amperlik daha yüksek akım seviyesinde ise bataryada üretilen ısı miktarı daha fazla olduğundan, genel sıcaklık değerleri daha yüksektir. 5 m/s hava akış hızında maksimum sıcaklık yaklaşık 38 °C'ye ulaşırken, 10 m/s ve 12 m/s hızlarında bu değerler sırasıyla yaklaşık 36 °C ve 34 °C civarına düşmüştür. Bu durum, hava akış hızının artırılmasıyla birlikte sistemin termal yükü daha etkili şekilde taşımaya başladığını ve sıcaklık artış hızının yavaşladığını göstermektedir.

Sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, iki borulu hava soğutma sistemi altında aynı hava hızlarında elde edilen sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık değerleri açısından genel bir uyum gözlemlenmektedir. Her iki çalışmada da hava akış hızının artmasıyla birlikte batarya paketinin daha etkin bir şekilde soğutulduğu ve sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği görülmektedir. Genel olarak, sayısal modelleme ile elde edilen sıcaklık dağılımı eğilimleri deneysel bulgularla tutarlılık göstermektedir. Ancak mutlak sıcaklık değerleri deneysel bir miktar daha yüksek gözlenmiştir; bu durum, hava akış hızının sürekli stabil olamaması, gerçek sistemdeki temas dirençleri, hava sızıntıları veya sensör yerleşimi gibi fiziksel etkenlerden kaynaklanabilir. Bununla birlikte, simülasyonun deneysel trendleri başarıyla yakaladığı ve modelin doğrulama açısından güvenilir olduğu sonucuna varılabilir.

İçbükey dizilime sahip batarya paketine yönelik yapılan sayısal ve deneysel analizlerin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında dışbükey dizilime sahip batarya paketine geçilmiştir. Bu yeni konfigürasyonda hücre yerleşimi ve hava akış yollarının farklılık göstermesi nedeniyle, soğutma performansının geometrik değişikliklerle nasıl etkilendiği detaylı biçimde incelenmiştir. Dışbükey yapı ile birlikte hava akışının hücre yüzeylerine teması ve genel akış düzeni yeniden değerlendirilmiş; aynı deşarj akımı ve hava akış hızı parametreleri korunarak, üçgen ve içbükey dizilimlerle karşılaştırmalı analiz yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dışbükey dizilime sahip batarya paketine ait 1, 2 ve 3 borulu hava soğutma sistemleri ayrı ayrı modellenmiş ve zorlanmış hava akışı altında her bir düzenlemenin termal performansı değerlendirilmiştir. Tüm konfigürasyonlar için analizler, 10 amperlik deşarj akımı altında ve 5, 10, 15 ve 20 m/s hava akış hızlarında yürütülmüştür. Batarya hücreleri arasına simetrik şekilde yerleştirilen bakır borularla ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı

biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.27’de sunulmakta olup, dışbükey dizilime sahip batarya paketinde farklı boru sayıları ve hava hızlarına bağlı sıcaklık dağılımlarını yansıtmaktadır.



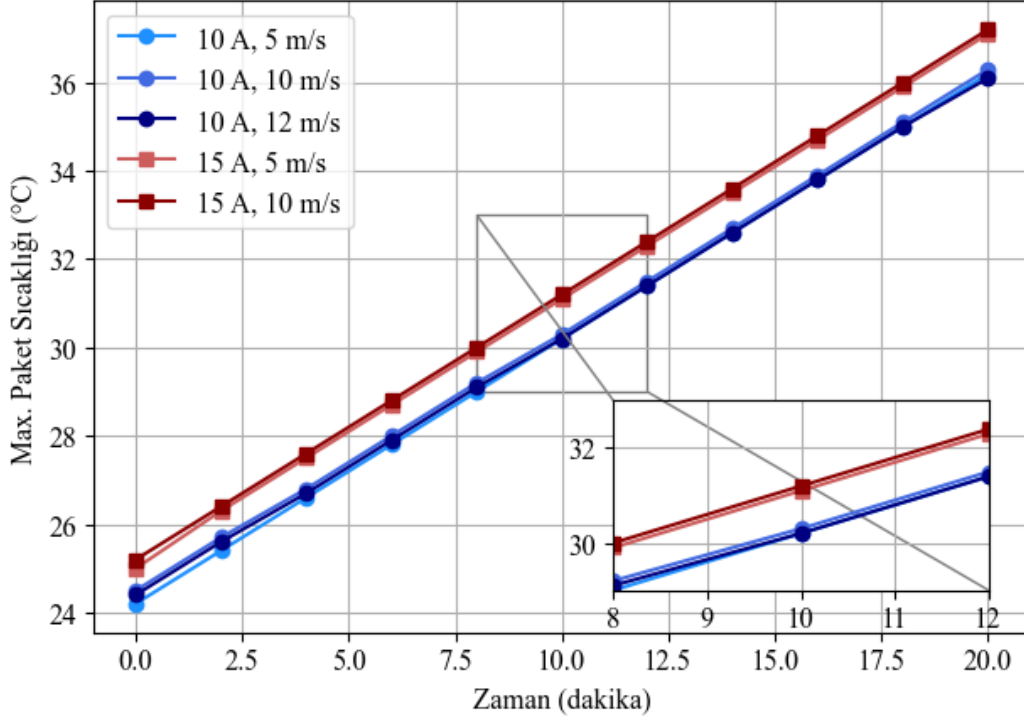
Şekil 4.27. Dışbükey dizilime ait 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları

Şekil 4.27’de, dışbükey dizilime sahip batarya paketine entegre edilmiş tek borulu, iki borulu ve üç borulu hava soğutmalı termal yönetim sistemlerine ait, farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 ve 20 m/s) elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görselde yatay sıralama üstten alta doğru sırasıyla tek borulu, iki borulu ve üç borulu yapılandırmaları temsil etmektedir. Bu analiz, hem hava hızının hem de boru sayısının dışbükey dizilime sahip batarya yapılarında termal performans üzerindeki etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Tek borulu sistemde, 5 m/s gibi düşük hava hızlarında dışbükey dizilim nedeniyle hava, kenar bölgelerde daha rahat yayılım göstermiş ancak orta kısımda akış sınırlı kalmıştır. Bu durum, kenarlarda kısmi bir soğutma sağlarken orta bölgelerde yüksek sıcaklık birikimine yol açmıştır. Bu sistemde gözlenen sıcaklıklar, 5 m/s’de 43–50 °C, 10 m/s’de 40–45 °C, 15 m/s’de 35–40 °C ve 20 m/s’de 32–37 °C aralığında seyretmiştir. Yalnızca yüksek hava hızlarında etkili olabilen bu yapı, enerji tüketimi ve fan gücü açısından verimsiz bir seçenek oluşturmaktadır. İki borulu sistemde, dışbükey dizilimin kenarlarda sağladığı akış kolaylığı, ikinci boru ile merkez bölgelere kadar daha homojen bir hava dağılımı elde edilmesini sağlamıştır. Bu sayede 5 m/s hızda dahi sıcaklıklar 37–42 °C aralığında

kalmış; 10 m/s'de 33–37 °C, 15 m/s'de 30–35 °C ve 20 m/s'de 25–30 °C düzeyine düşmüştür. Ayrıca, dışbükey geometrinin sağladığı aerodinamik avantaj ile akış, batarya yüzeylerine daha dengeli bir biçimde yönlendirilmiş ve bu da soğutma performansını olumlu etkilemiştir. İlk bölgedeki şok etkisinin yayılımı, sıcaklık farklarının daha düşük kalmasını sağlamış, termal stresler azaltılmıştır. Üç borulu sistem, dışbükey yapının sunduğu genişletilmiş akış alanını maksimum düzeyde kullanarak, tüm hava hızlarında en yüksek soğutma performansını göstermiştir. Özellikle düşük hava hızlarında (5 m/s) dahi tüm batarya yüzeylerinde sıcaklık dağılımı oldukça homojen gerçekleşmiş ve sıcaklıklar 30–35 °C aralığında kalmıştır. 10 m/s'de 25–30 °C, 15 m/s'de 20–25 °C, 20 m/s'de ise 20–25 °C değerleri elde edilmiştir. Dışbükey form, üç borunun sağladığı geniş etki alanı ile birleştiğinde, batarya modülünün tamamında kararlı bir termal yapı oluşturmuştur. Ancak üç borulu sistemin bu üstün performansına rağmen, daha karmaşık bir yapıya sahip olması üretim maliyetlerini artırmakta, montaj sürecinde daha fazla mühendislik hassasiyeti gerektirmekte ve sistemin prototiplenmesini zorlaştırmaktadır. Dışbükey dizilimdeki daralan iç yollar bu karmaşıklığı daha da artırabilmektedir. Sonuç olarak, dışbükey dizilime sahip BTMS' de yalnızca maksimum sıcaklıkların düşürülmesi değil, sıcaklık dağılımının homojenliği de kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir. Üç borulu yapı, bu bağlamda en yüksek performansı sunarken; iki borulu sistem orta seviyedeki hava hızlarında optimum verimlilik sağlamaktadır. Tek borulu sistem ise yalnızca yüksek hava hızlarında tatmin edici sonuçlar vermekte ve bu durum sistem enerji tüketimi ile etkinliği arasında dikkatli bir denge kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, boru sayısı, hava hızı, üretim ve montaj kolaylığı gibi mühendislik parametreleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir.

Simülasyon çalışmalarının ardından, dışbükey dizilime sahip batarya paketi için yalnızca 3 borulu sistem fiziksel olarak üretilmiş ve deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, 10 amperlik deşarj akımı altında 5, 10 ve 12 m/s hava hızlarında, 15 amperlik deşarj akımı altında ise 5 ve 10 m/s hızlarında testler uygulanmıştır. Deney düzeneği dışbükey yerleşim geometrisine uygun şekilde tasarlanmış, hücreler arasındaki üç bakır borudan zorlanmış hava akışı sağlanarak sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Elde edilen deneysel veriler, sayısal modelin kalibrasyonunda ve doğruluk değerlendirmesinde kullanılmıştır.

3 Borulu Dışbükey Dizilim Zamana Bağlı Batarya Paket Sıcaklığı (10 A ve 15 A)



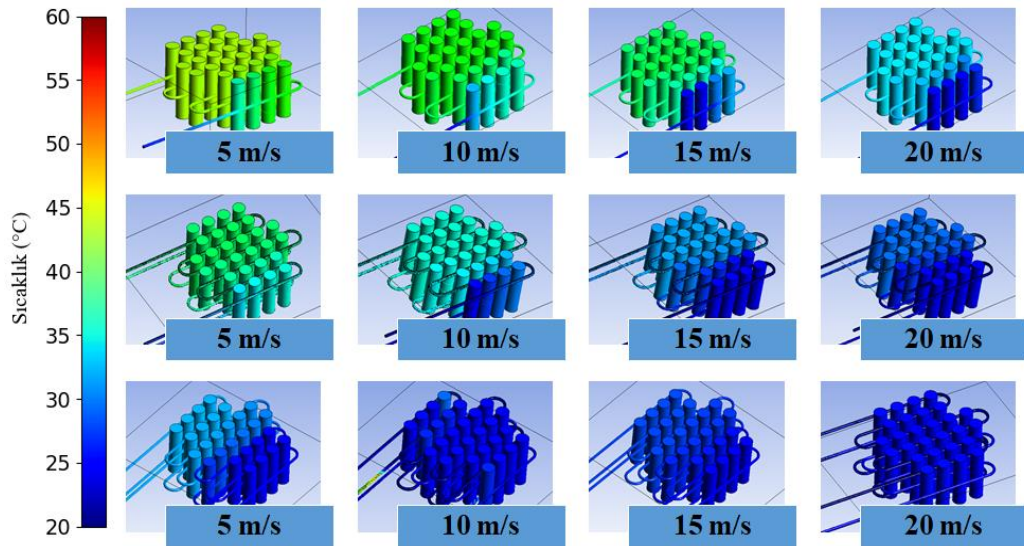
Şekil 4.28. 3 borulu dışbükey dizilim deneysel sonuçlar

Şekil 4.28’de 3 borulu dışbükey dizilim için 10 A ve 15 A akım altında farklı hava hızlarında elde edilen batarya paket sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi verilmiştir. 10 A akım altında, 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında sırasıyla daha düşük sıcaklık artışları gözlemlenmiş, özellikle 5 m/s hızda en düşük maksimum sıcaklık elde edilmiştir. 15 A akım uygulandığında ise sıcaklık artışları belirgin şekilde yükselmiş ve bu durum artan akımın batarya ısınmasına etkisini ortaya koymuştur. 15 A için 5 m/s ve 10 m/s hızlarında elde edilen sıcaklık değerleri, 10 A verileriyle karşılaştırıldığında sistemin daha yüksek soğutma kapasitesine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Tüm veriler doğrultusunda, artan hava akış hızı batarya sıcaklığının kontrol altına alınmasında etkili olurken, akım artışı sıcaklık değerlerini yükseltmiş ve sistemin termal yönetim açısından daha kritik hale geldiği gözlemlenmiştir.

Sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, 3 borulu dışbükey dizilime sahip batarya paketinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklık dağılımları genel olarak benzer eğilimler göstermektedir. Her iki çalışmada da hava akış hızının artışıyla birlikte batarya paketinin daha etkin bir şekilde soğutulduğu ve sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. Genel olarak, sayısal modelleme ile elde edilen sıcaklık dağılımı eğilimleri deneysel verilerle uyumlu olup,

modelin termal davranışı başarıyla temsil ettiği anlaşılmaktadır. Deneysel sıcaklık değerlerinin simülasyona kıyasla bir miktar daha yüksek olması; sistemdeki temas dirençleri, sensör yerleşimi, hava sızıntıları ve hava akış hızındaki dalgalanmalar gibi fiziksel etkilerden kaynaklanabilir. Buna rağmen, sayısal simülasyonlar deneysel trendleri yakalayarak modelin güvenilirliğini ve doğruluk düzeyini desteklemektedir.

Üçgen, içbükey ve dışbükey dizilime sahip batarya paketlerine yönelik yapılan sayısal ve deneysel analizlerin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında köşeli dizilime sahip batarya paketine geçilmiştir. Bu yeni konfigürasyonda hücre yerleşimi ve hava akış yolları belirgin biçimde farklılık gösterdiğinden, geometrik değişikliklerin soğutma performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Köşeli yapı ile birlikte hava akışının hücre yüzeylerine teması, akışın yönlenmesi ve genel hava sirkülasyonu yeniden değerlendirilmiş; aynı deşarj akımı ve hava akış hızı parametreleri korunarak üçgen, içbükey ve dışbükey dizilimlerle karşılaştırmalı analiz yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Köşeli dizilime sahip batarya paketine ait 1, 2 ve 3 borulu hava soğutma sistemleri ayrı ayrı modellenmiş ve zorlanmış hava akışı altında her bir düzenlemenin termal performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 10 amperlik deşarj akımı altında yürütülmüş olup, tüm konfigürasyonlar için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava akış hızlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya hücreleri arasına simetrik şekilde yerleştirilen bakır borular ile ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, Şekil 4.29'de sunulmakta olup, köşeli dizilime sahip batarya paketinde farklı boru sayısı ve hava hızlarına bağlı sıcaklık dağılımlarını yansıtmaktadır.

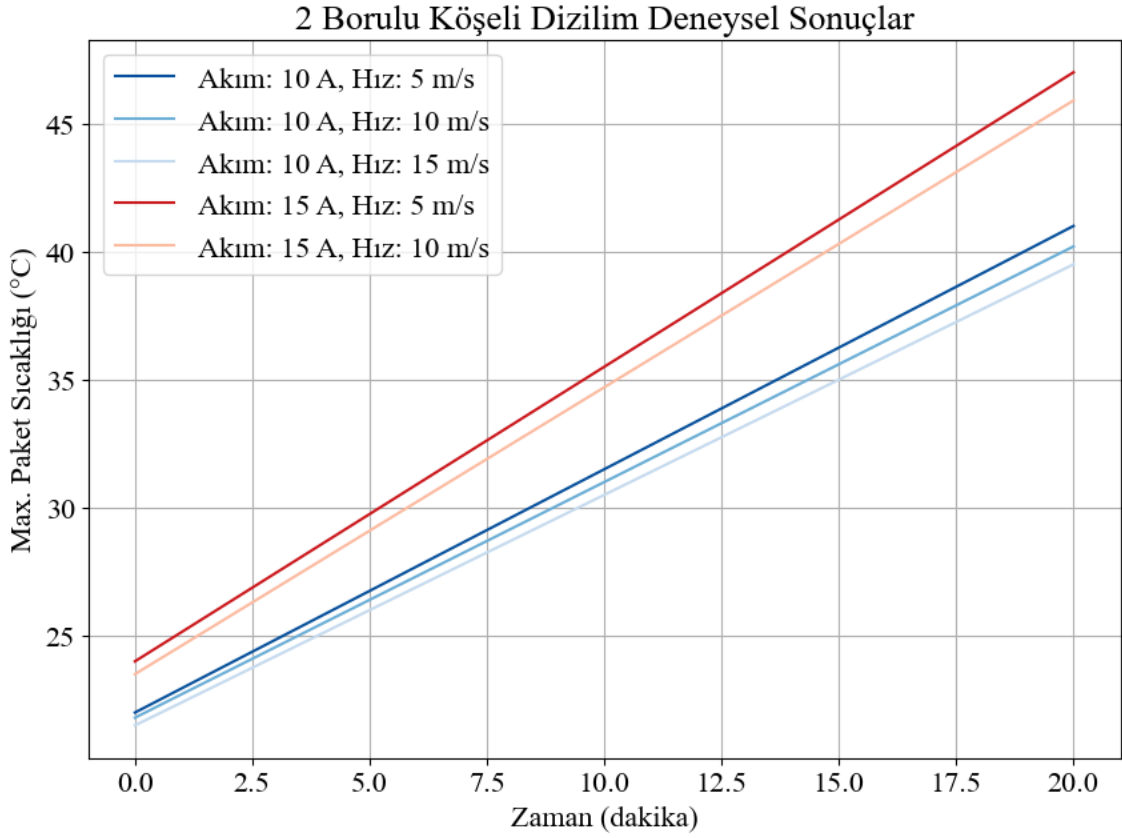


Şekil 4.29. Köşeli dizilime ait 1-2-3 borulu simülasyon sonuçları

Şekil 4.29’da, köşeli dizilime sahip batarya paketine entegre edilmiş tek borulu, iki borulu ve üç borulu hava soğutmalı termal yönetim sistemlerine ait, farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 ve 20 m/s) elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görselde yatay sıralama üstten alta doğru sırasıyla tek borulu, iki borulu ve üç borulu sistem yapılarını temsil etmektedir. Bu analiz, hava hızı ve boru sayısının köşeli dizilime sahip batarya paketleri üzerindeki soğutma etkinliğini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Tek borulu sistemde, 5 m/s gibi düşük hava hızlarında soğutma etkisi sınırlı kalmış; özellikle iç kısımlarda yüksek sıcaklık alanları oluşmuştur. Köşeli dizilimin sert kenar geometrileri, hava akışının yön değiştirmesine neden olarak ön sıralarda soğutma etkinliğini artırsa da arka bölgelere ulaşımında zorluk yaratmıştır. Bu durum, batarya modülü genelinde sıcaklık dengesizliklerine yol açmış ve sıcaklık değerleri sırasıyla 5 m/s’de 45–50 °C, 10 m/s’de 40–45 °C, 15 m/s’de 35–40 °C, 20 m/s’de ise 32–37 °C aralığında ölçülmüştür. Yüksek hava hızlarında kısmen başarılı olsa da enerji tüketimi açısından bu yapı verimli bir çözüm sunmamaktadır. İki borulu sistem, hava akışını daha dengeli bir biçimde yönlendirerek köşeli dizilimin iç ve arka bölgelerinde de etkili bir soğutma sağlamıştır. 5 m/s hava hızında 37–42 °C aralığında sıcaklık değerleri gözlemlenmiş, bu değerler hava hızının artışıyla birlikte 10 m/s’de 33–37 °C, 15 m/s’de 30–35 °C ve 20 m/s’de 25–30 °C’ye kadar düşmüştür. İki borulu yapı, köşeli dizilimdeki ani yön değişimlerine rağmen akış kesintilerini azaltarak, daha homojen bir sıcaklık dağılımı sunmuş ve sistem genelinde termal dengenin korunmasına katkı sağlamıştır. Üç borulu sistem, en yüksek soğutma performansını tüm hava hızlarında sergilemiştir. Hava

akışı köşeli dizilimin her bölgesine etkili şekilde ulaşmış, özellikle batarya paketi iç kısımlarında bile yüksek sıcaklık farkları ortadan kaldırılmıştır. 5 m/s hava hızında sıcaklıklar 30–35 °C aralığında kalırken, 10 m/s’de 25–30 °C, 15 m/s’de 20–25 °C, 20 m/s’de ise tüm modül genelinde sıcaklıklar 20–25 °C’ye kadar gerilemiştir. Bu yapı sayesinde düşük hava hızlarında bile yüksek homojenlik sağlanmış ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkları minimize edilmiştir. Bununla birlikte, üç borulu sistemin karmaşık yapısı üretim ve montaj süreçlerinde mühendislik hassasiyeti gerektirmekte, maliyetleri artırmakta ve tasarımın uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Köşeli dizilimle birleştğinde, boru yönlendirmeleri ve akış yolculukları daha da karmaşık hâle gelmekte, bu da sistemin üretim toleranslarını sıkılaştırmaktadır. Sonuç olarak, köşeli dizilime sahip BTMS’ de yalnızca ortalama sıcaklık değil, sıcaklık dağılımının homojenliği de kritik önem taşımaktadır. Üç borulu yapı, bu açıdan en başarılı çözüm olarak öne çıkarken; iki borulu yapı, daha sade tasarımıyla özellikle orta seviyedeki hava hızlarında enerji verimliliği ve performansı birlikte sunmaktadır. Tek borulu yapı ise düşük hava hızlarında yetersiz kalmakta ve sadece yüksek debilerde etkili olabilmektedir. Bu nedenle sistem tasarımı yapılırken, soğutma performansının yanı sıra üretim zorlukları, enerji tüketimi ve mühendislik uygulanabilirliği birlikte değerlendirilmelidir.

Sayısal analizlerin ardından, deneysel çalışmalar yalnızca 2 borulu soğutma konfigürasyonu için uygulanmış ve bu amaçla, köşeli dizilime sahip batarya paketlerine uygun özel bir test düzeneği hazırlanmıştır. Deneysel kapsamda, batarya hücrelerinin yalnızca bir tarafına temas eden iki adet bakır boru yerleştirilmiş; yerleşim geometrisi gereği bir boru dizinin alt kısmına, diğeri ise üst kısmına karşılıklı olarak konumlandırılarak hücrelerin yalnızca birer yüzeyine temas sağlanmıştır. Bu temas düzeni, boruların yalnızca tek taraflı soğutmaya imkân tanıdığı sınırlı bir yüzey alanı oluşturmuş olsa da karşılıklı yerleşim sayesinde sıcaklık dağılımları etkili biçimde gözlemlenebilmiştir. Soğutma performansını değerlendirebilmek amacıyla farklı hava akış hızlarında testler yapılmış; 2 borulu soğutma sisteminde bakır borular içerisine belirli hızlarda hava akışı sağlanarak sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleriyle kaydedilmiştir. Bu kapsamda, 10 amperlik deşarj akımı altında sırasıyla 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızları uygulanarak soğutma performansı incelenmiş; 15 amperlik daha yüksek deşarj akımı altında ise batarya hücrelerinde daha belirgin sıcaklık artışları beklendiğinden, sistemin termal tepkisini analiz edebilmek amacıyla 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akış hızı kullanılmıştır.



Şekil 4.30. 2 borulu köşeli dizilim deneysel sonuçları

Şekil 4.30’da, 2 borulu köşeli dizilime sahip batarya paketi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda farklı hava hızları ve deşarj akımları altında elde edilen maksimum paket sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Grafik genel olarak, zaman ilerledikçe batarya sıcaklıklarının arttığını ve bu artışın özellikle yüksek akım değerlerinde daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. 10 amperlik deşarj akımı altında 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında yapılan karşılaştırmalarda, hava akış hızının artmasıyla birlikte sıcaklık artışının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir; bu durum, hava akış hızının artırılmasının soğutma performansını iyileştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. 15 amperlik daha yüksek akım altında ise yalnızca 5 m/s ve 10 m/s hava hızları denenmiş, bu koşullarda elde edilen sıcaklıklar 10 amperlik denemelere kıyasla daha yüksek seviyelerde seyretmiş; ayrıca hava akış hızındaki artış, sıcaklık artışını sınırlı da olsa azaltmıştır. Tüm bu veriler, soğutma sisteminin performansının hem uygulanan akım seviyesine hem de hava akış hızına duyarlı olduğunu ve özellikle yüksek akım altında daha etkili soğutmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Yapılan sayısal analiz çalışmaları sonucunda, ısı borulu BTMS’ de kullanılan dört farklı hücre dizilim geometrisinin (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilim) farklı giriş

hava hızlarında (5, 10, 15 ve 20 m/s) altındaki termal performansları kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizlerin yapılmasındaki temel hedef, farklı geometrilerin batarya modülü içerisindeki sıcaklık dağılımı, maksimum sıcaklık değeri ve sıcaklık farkı üzerindeki etkilerini belirleyerek, daha etkili bir termal yönetim stratejisi geliştirmektir.

Üçgen dizilime sahip batarya hücreleri eşkenar üçgen formatında yerleştirilmiş olup, daha kompakt bir tasarım elde edilmiştir. Üçgen yapı, hava akışına karşı daha az direnç sunarak akışın hücre yüzeylerine daha simetrik dağılmasını sağlar. Üçgen dizilimde, tek borulu sistem belirli düzeyde simetrik hava akışı sağlasa da hava girişinin tek noktadan olması nedeniyle alt ve üst kısımlarda soğutma yetersiz kalmaktadır. Bu durum, özellikle düşük hızlarda sıcaklık farkının yüksek olmasına neden olur; 5 m/s hızında yaklaşık 6 °C'lik bir fark oluşmaktadır. Fan hızı artırıldığında hava daha geniş yüzeylere yayılabildiği için 20 m/s'de bu fark 3 °C'ye kadar düşse de genel performans sınırlıdır. İki borulu sistemde üçgen dizilim, hava akışının daha homojen ve dengeli dağılmasını sağlar. Alt ve üst hücre yüzeylerine eş zamanlı temas eden hava, ısıyı daha etkin biçimde uzaklaştırır. Bu yapı, özellikle 10 m/s fan hızında sıcaklık farkı 3.5 °C'ye, 20 m/s'de ise 2 °C'ye kadar düşürerek termal yönetimde ciddi iyileşme sağlar. Akış alanının genişlemesi, sistem verimliliğini artırır. Üç borulu sistem ile üçgen dizilim en verimli halini alır. Havanın üç farklı noktadan hücrelere ulaşması sayesinde soğutma tüm yüzeylerde eş zamanlı olur. Hava sirkülasyonu daha dengeli hale gelir ve 5 m/s'de sıcaklık farkı 4 °C'ye, 20 m/s'de 1.5 °C'ye kadar geriler. Bu yapı, özellikle yüksek hücre yoğunluğuna sahip sistemlerde tercih edilebilecek güçlü bir alternatiftir.

İçbükey dizilime sahip batarya hücreleri içe doğru kıvrımlı bir düzlemde ve merkezi hava girişine göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu yerleşim, hava akışının merkezden çevreye eşit şekilde dağılmasını sağlayarak hücrelerin tamamına etkin soğutma uygulanmasını mümkün kılmaktadır. İçbükey dizilimde tek borulu yapı dahi oldukça verimli sonuçlar verebilmektedir. Hücrelerin içe doğru kavisli yerleşimi, havanın doğal olarak merkezden kenarlara yönelmesini kolaylaştırır. Bu yönlendirme sayesinde 5 m/s hızda sıcaklık farkı yaklaşık 4 °C seviyesine kadar düşmektedir. Konvektif ısı transferi açısından bu yapı, fan desteğiyle etkili soğutma sağlar. İki borulu sistem ile birlikte içbükey dizilim daha da etkin hale gelir. Havanın iki simetrik noktadan hücrelere yönelmesi, sıcaklık farkının belirgin şekilde azalmasına neden olur. 10 m/s'de sıcaklık farkı 2 °C'ye kadar inerken, 20 m/s gibi yüksek hızlarda bu değer 1.5 °C'nin de altına düşebilir. Yapının içe dönük formu, havanın tüm yüzeylere eşit dağılımını kolaylaştırır. Üç borulu sistem içbükey dizilimde maksimum performansı sağlar. Havanın üç noktadan

akışı, hücreler boyunca izotermal bir profil oluşturur. 5 m/s hızında bile sıcaklık farkı 2.5 °C civarındayken, 20 m/s’de bu fark 1 °C’ye kadar düşer. Hem hacimsel verimlilik hem de ısı homojenlik açısından bu kombinasyon, batarya sistemleri için ideal bir çözümdür.

Dışbükey dizilime sahip batarya hücreleri, dışa doğru kavisli ve doğrusal bir hatta dizilmiş olup, hava akışının hücre yüzeylerine paralel ve daha homojen dağılmasını sağlamaktadır. Bu yapı, hücreler arası hava geçiş yollarını genişlettiği için akış direncini azaltmakta ve konvektif ısı transfer yüzey alanını artırmaktadır. Dışbükey dizilimde tek borulu sistemde hava akışı dış yüzeylere etkin şekilde ulaşsa da iç kısımlarda durgun bölgeler oluşur. Bu nedenle, 5 m/s hızında sıcaklık farkı değeri yaklaşık 6 °C olup yüksek sıcaklık farkları gözlenir. Geometrik yapının dışa dönük olması, hava yönlendirmesini zorlaştırmaktadır. İki borulu sistemle birlikte dışbükey dizilimde performans artışı sağlanır. Havanın üst ve alt yüzeylere eş zamanlı yönelmesi, dış yüzeylerdeki ısı transferini artırırken merkez bölgelerdeki hava dolaşımı da gelişir. Bu sayede 10 m/s hızında sıcaklık farkı 3 °C’ye, 20 m/s’de ise 2 °C’ye kadar düşmektedir. Üç borulu sistemde, hava akışının daha dengeli ve yayılmış olmasını sağlar. Havanın her açıdan hücrelere temas etmesi, dış yüzeylerde etkili soğutma sağlarken iç bölgelerdeki sıcaklık birikmesini de azaltır. 5 m/s’de sıcaklık farkı 3 °C, 20 m/s’de ise 1.8 °C civarına düşerek sistemin kararlı çalışmasına katkı sağlar.

Köşeli dizilime sahip batarya hücreleri, geometrik olarak kompakt bir yerleşim sağlasa da, hava akışının özellikle iç köşe bölgelerinde düşük hızda kalmasına neden olmakta ve bu da yerel sıcaklık birikimlerine yol açmaktadır. Köşeli dizilimde tek borulu sistem, en düşük soğutma performansını sunmaktadır. Havanın köşeli ve dar bölgelere ulaşması zor olduğu için ısı birikmesi kaçınılmazdır. 5 m/s’de sıcaklık farkı yaklaşık 9–10 °C düzeyinde seyretmekte olup, sıcaklık dağılımında ciddi dengesizlikler gözlenmektedir. İki borulu sistemde köşeli yapının bazı dezavantajları azaltılsa da hava yönlendirmesi halen sınırlıdır. Alt ve üstten gelen hava akımı kenar bölgelerde verim sağlar; ancak merkezdeki hücrelerde ısı dengesizlik devam eder. 10 m/s hızda sıcaklık farkı 5 °C, 20 m/s’de ise 3.5 °C civarındadır. Üç borulu sistem, köşeli dizilimin soğutma performansını nispeten iyileştirir. Hava akışının üç noktadan yapılması, iç bölgelerdeki durgunluğu azaltır. Ancak geometrik yapı nedeniyle yönlendirme halen zayıftır. 5 m/s’de sıcaklık farkı 6 °C, 20 m/s’de 3 °C seviyelerinde kalmakta ve diğer dizilimlere göre geride kalmaktadır.

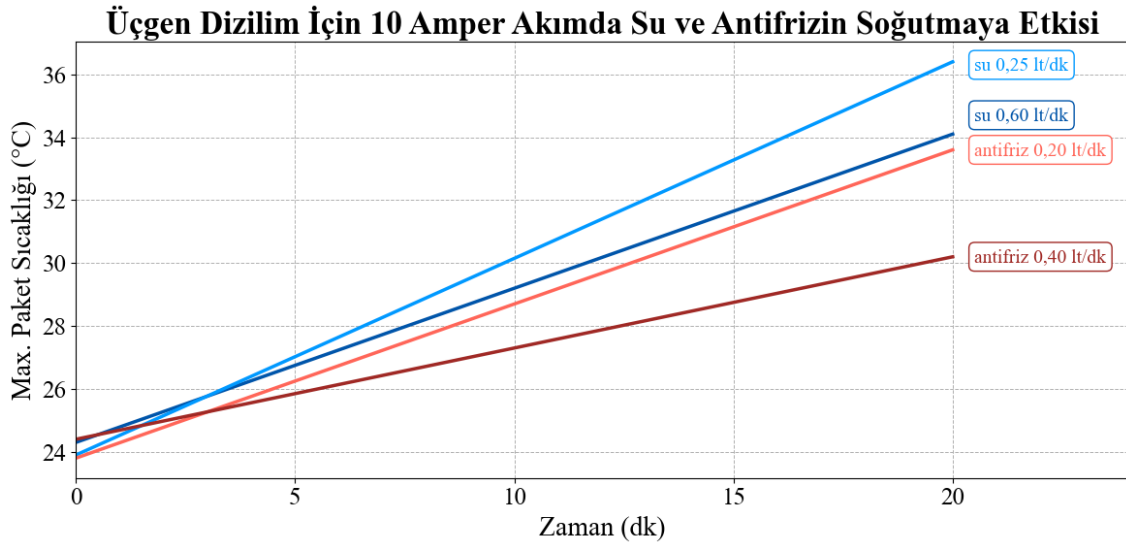
Yapılan analizler sonucunda, üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlerin farklı boru sayılarıyla birlikte soğutma performansları karşılaştırıldığında, termal yönetim açısından en verimli yapının içbükey dizilim olduğu tespit edilmiştir. İçbükey yapı, özellikle üç borulu sistemle birlikte kullanıldığında, hava akışını hücre yüzeylerine homojen bir şekilde dağıtarak sıcaklık farkını minimuma indirmiş ve izotermal bir ortam sağlamıştır. Üçgen dizilim, içbükeye göre biraz daha düşük performans sergilese de, üç borulu sistemde etkin bir hava dağılımı sağlayarak tatmin edici soğutma sonuçları vermiştir. Dışbükey dizilim ise geometrik dezavantajlarına rağmen çoklu borulu yapılarda dengeli hava akışıyla belirli bir verimliliğe ulaşabilmiştir. Buna karşın, köşeli dizilim tüm senaryolarda en düşük performansı göstermiş; özellikle tek borulu sistemde yüksek sıcaklık farklarına ve dengesiz ısı dağılımına neden olmuştur. Bu bağlamda, BTMS' de en uygun dizilimin, geometrik yapısı sayesinde hava akışını yönlendiren ve ısıyı eşit dağıtan içbükey dizilim olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, boru sayısının artırılması her dizilimde performansı olumlu yönde etkilemiş ve sistemin soğutma kabiliyetini önemli ölçüde artırmıştır.

4.3. Sıvı Soğutma Bulguları

Sıvı soğutma sistemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizler sonucunda, farklı dizilim geometrilerine sahip batarya paketlerinin sıvı soğutma entegrasyonu altındaki termal davranışları detaylı şekilde incelenmiştir. Üçgen dizilimde 1 adet, içbükey dizilimde 2 adet, dışbükey dizilimde 3 adet ve köşeli dizilimde 2 adet sıvı soğutma kanalı kullanılarak yapılan çalışmalarda, batarya paketlerinin termal yönetimindeki etkinliği ve hücreler arası sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesi değerlendirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, sıvı soğutma kanallarının yerleşimi ve akış yönleri dikkate alınarak maksimum hücre sıcaklıklarının ve hücreler arası sıcaklık farklarının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Soğutma akışkanları olarak su ve antifriz kullanılmış olup, her iki akışkanın yüksek ısı taşıma kapasiteleri sayesinde belirli dizilimlerde belirgin termal iyileşmeler sağlanmıştır. Ancak, bazı geometrik yerleşimlerde akış kanallarının yetersizliği nedeniyle ısı transferi sınırlı kalmış ve soğutma performansında azalma gözlemlenmiştir. Bu nedenle, dizilim geometrisi ve sıvı soğutma kanallarının konumu sistemin termal yönetim performansını doğrudan etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar, sıvı soğutmalı BTMS' de hem dizilim yapısının hem

de soğutma kanallarının doğru yerleşiminin, sistemin termal kararlılığı ve güvenli çalışma sınırları içinde tutulması açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

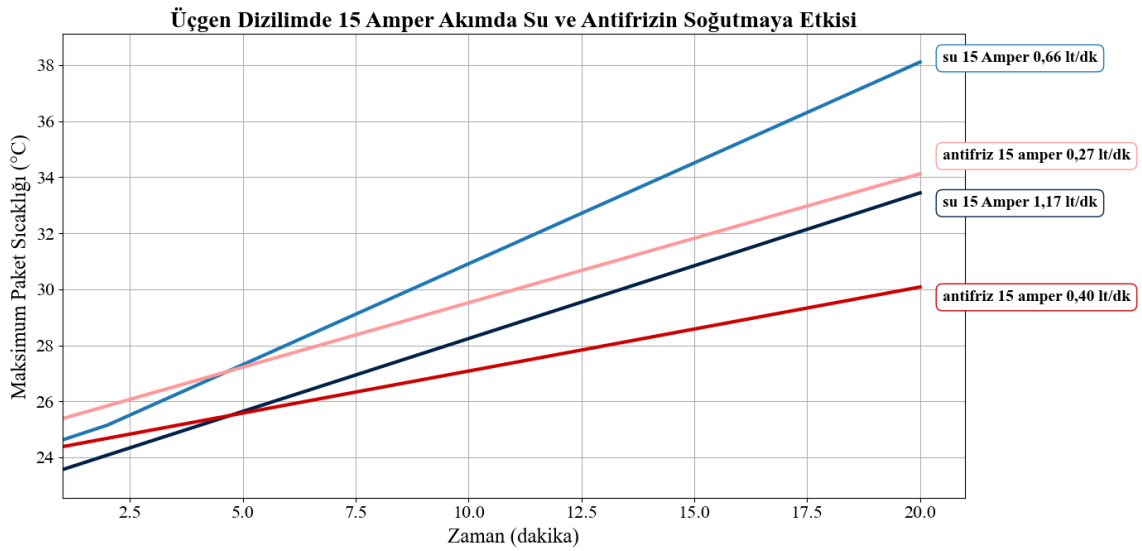
Üçgen dizilime sahip batarya paketi, sahip olduğu kompakt yerleşim yapısı ve sınırlı soğutma kanalı sayısı nedeniyle termal yönetim açısından özel bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu dizilimde sadece bir adet sıvı soğutma kanalı kullanılmış olup, bu durum hem akış alanının daralmasına hem de ısı transfer yüzeyinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Ancak kompakt yapının sağladığı daha kısa ısı yayılım yolları sayesinde, uygun debi ve soğutucu seçimiyle etkin bir soğutma başarılabilir. Bu bağlamda, üçgen dizilimin sahip olduğu geometrik avantajlar ve sınırlayıcı unsurlar dikkate alınarak yapılan analizler, bu konfigürasyonun optimize edilmesiyle yeterli termal performans elde edilebileceğini göstermektedir. Bu değerlendirmeler ışığında, üçgen dizilime sahip sıvı soğutma sisteminin soğutma performansına ilişkin elde edilen veriler, Şekil 4.31'de sunulmaktadır. Şekilde, 10 amper sabit akım altında, farklı sıvı akış hızları için maksimum batarya paket sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Farklı debi değerlerinde uygulanan su ve antifriz akışkanlarının, batarya üzerindeki soğutma etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4.31. 1 borulu üçgen dizilimde su ve antifriz için 10 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları

Şekil 4.31’de, 10 amperlik sabit deşarj akımı altında su ve antifriz akışkanları ile farklı debilerde gerçekleştirilen batarya soğutma senaryolarına ait maksimum sıcaklıkların zamana bağlı değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm senaryolarda başlangıç sıcaklıkları yaklaşık 23,8 °C ile 24,6 °C arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklar,

sistemin başlangıç koşullarının birbirine oldukça yakın olduğunu ve analizlerin karşılaştırılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir. Su kullanılan sistemlerde (mavi tonlu eğriler), debi arttıkça maksimum sıcaklık artış eğiminin azaldığı net bir şekilde gözlemlenmektedir. En düşük debiye sahip olan 0,25 lt/dk su senaryosunda, başlangıç sıcaklığı 23,9 °C olup, 20. dakikada sıcaklık 36,4 °C'ye ulaşmış ve bu durumda $\Delta T \approx 12,5$ °C olmuştur. 0,60 lt/dk debili su kullanımında, sıcaklık 24,3 °C'den başlayarak 34,1 °C'ye çıkmış ve $\Delta T \approx 9,8$ °C olarak gerçekleşmiştir. En yüksek debili su akışında ise (0,93 lt/dk), başlangıçta 24,6 °C olan sıcaklık, 20. dakikada 32,3 °C'ye ulaşmış ve bu durumda sıcaklık farkı $\Delta T \approx 7,7$ °C olmuştur. Bu değerler, debi arttıkça sıcaklık yükselmesinin daha sınırlı kaldığını ve soğutma veriminin arttığını ortaya koymaktadır. Antifriz kullanılan senaryolarda (kırmızı tonlu eğriler) da benzer bir eğilim söz konusudur; debi arttıkça sıcaklık artışı daha sınırlı düzeyde gerçekleşmektedir. 0,20 lt/dk debide antifriz ile soğutma yapılan senaryoda, başlangıç sıcaklığı 23,8 °C, 20. dakikadaki sıcaklık ise 33,6 °C olup, $\Delta T \approx 9,8$ °C olarak gerçekleşmiştir. En yüksek antifriz debisi olan 0,40 lt/dk senaryosunda ise, sıcaklık 24,4 °C'den başlayarak 30,2 °C seviyesinde sonlanmış, bu durumda $\Delta T \approx 5,8$ °C olmuştur. Su ve antifrizli soğutma senaryoları karşılaştırıldığında, antifrizin aynı veya benzer debilerde suya kıyasla daha düşük sıcaklık artışları sağladığı açıkça görülmektedir. Özellikle 0,40 lt/dk antifriz senaryosu, 0,60 lt/dk debili su senaryosundan yaklaşık 3,9 °C daha düşük bir maksimum sıcaklık değeri sağlamış ve sıcaklık farkı açısından da 4 °C daha düşük ΔT değeri elde etmiştir. Bu performans farkı, antifrizin kimyasal yapısı nedeniyle daha yüksek ısı taşıma kapasitesi, viskozite uyumu ve geniş kaynama noktası aralığı gibi özelliklerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bu analiz, antifrizin belirli debi aralıklarında suya göre daha verimli soğutma sağlayabildiğini ve özellikle düşük-orta debi koşullarında termal yönetim açısından daha kararlı sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, BTMS tasarımı sadece akışkan tipi değil, aynı zamanda akış debisinin de sistem performansına olan etkisinin dikkatlice optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

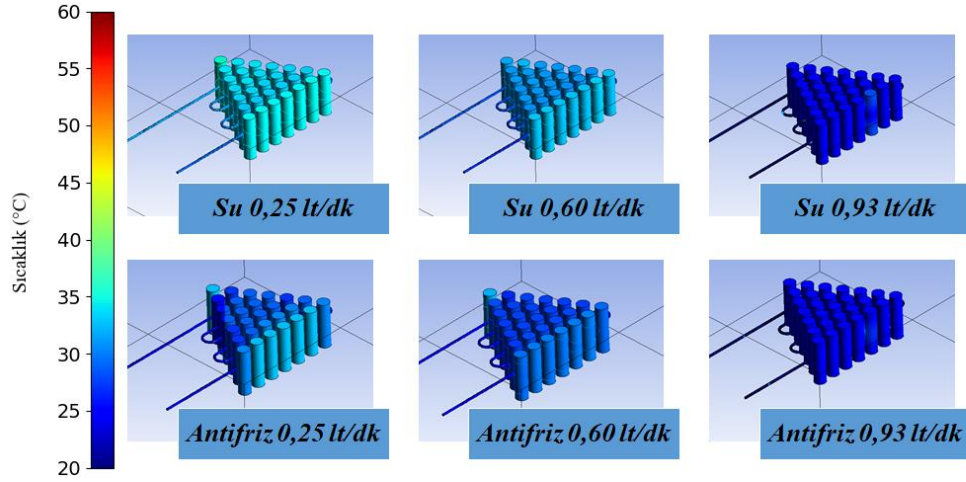


Şekil 4.32. 1 borulu üçgen dizilimde su ve antifriz için 15 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları

Şekil 4.32’de, 15 amperlik sabit bir deşarj akımı altında su ve antifriz akışkanları ile farklı debilerde gerçekleştirilen batarya soğutma senaryolarının, maksimum paket sıcaklığı üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Grafik üzerinde yer alan eğrilerden görüldüğü üzere, tüm başlangıç sıcaklıkları 23,5 °C ila 25,3 °C arasında değişmekte olup bu durum analizlerin karşılaştırılabilirliğini sağlamaktadır. Su kullanılan senaryolarda (mavi tonlu çizgiler), debi arttıkça sıcaklık artış hızında belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. 0,66 lt/dk debili su kullanımında sıcaklık 24,6 °C’den başlayarak 20. dakikada 38,1 °C’ye ulaşmış, $\Delta T \approx 13,5$ °C olmuştur. Diğer yandan, 1,17 lt/dk debideki su ile yapılan soğutma işlemi sonucunda sıcaklık 23,6 °C’den 33,4 °C’ye çıkarak $\Delta T \approx 9,8$ °C ile en düşük sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Bu veriler, suyun debisi arttıkça daha etkili bir ısı uzaklaştırma sağladığını ve maksimum sıcaklığın daha düşük değerlere çekilebildiğini göstermektedir. Antifriz kullanılan senaryolarda (kırmızı tonlu çizgiler), daha düşük sıcaklık artışlarıyla daha başarılı bir soğutma performansı sergilendiği dikkat çekmektedir. 0,27 lt/dk antifriz kullanıldığında sıcaklık 25,4 °C’den 34,1 °C’ye çıkarak $\Delta T \approx 8,7$ °C oluşmuştur. Bu senaryo, benzer debideki su uygulamasından daha düşük bir sıcaklık artışı ile sonuçlanmıştır. Daha yüksek debili antifriz uygulamalarında ise fark daha netleşmektedir. 0,40 lt/dk antifriz senaryosunda sıcaklık 24,3 °C’den 30,1 °C’ye çıkarak yalnızca $\Delta T \approx 5,8$ °C’lik bir artış göstermiştir. Bu, hem mutlak sıcaklık değeri hem de sıcaklık farkı açısından tüm senaryolar içinde en başarılı soğutma performansına işaret etmektedir. Bu grafiksel analiz, antifrizin özellikle düşük ve orta debi aralıklarında, suya göre daha düşük sıcaklık artışları sağladığını

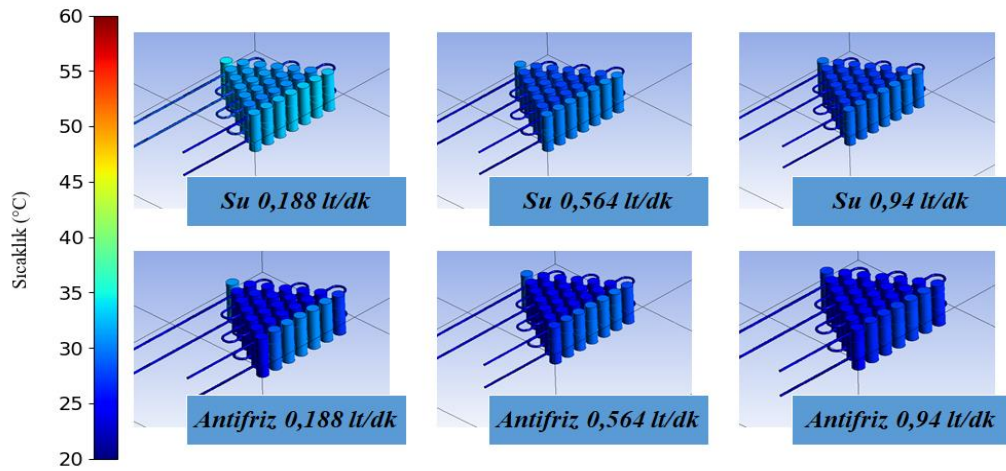
göstermektedir. Özellikle 0,40 lt/dk antifriz ile 1,17 lt/dk su senaryosu karşılaştırıldığında, yaklaşık 0,77 lt/dk daha düşük debiye rağmen antifrizle elde edilen maksimum sıcaklığın yaklaşık 3,4 °C daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, antifrizin termal yönetim açısından daha verimli bir soğutucu akışkan olduğunu ortaya koymaktadır. Bu performans farkı; antifrizin suya kıyasla daha geniş kaynama noktası aralığına, daha kararlı viskozite profiline ve daha yüksek ısı taşıma kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede antifriz, yüksek ısı yük altındaki sistemlerde daha kararlı bir akış ve etkin ısı uzaklaştırma sağlamaktadır. Sonuç olarak, 15 amper gibi daha yüksek akım senaryolarında da antifrizin, özellikle optimize edilmiş debilerle birlikte, suya kıyasla daha etkili bir termal kontrol sağlayabileceğini göstermektedir. Bu bulgu, BTMS tasarım sürecinde sadece soğutucu tipi değil, aynı zamanda bu akışkanların debi optimizasyonunun da sistemin genel performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Deneysel analizler sonucunda elde edilen veriler, antifriz ve su gibi farklı soğutucu akışkanların batarya paketlerinin termal davranışı üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymuştur. Ancak bu bulguların daha geniş bir parametre aralığında test edilmesi, akış alanlarının detaylı incelenmesi ve ısı transfer mekanizmalarının daha kapsamlı analiz edilebilmesi için sayısal yöntemlerin kullanılması gerekliliği doğmuştur. Bu doğrultuda, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında model doğrulaması yapılmış ve sayısal analiz sürecine geçilmiştir. İlk olarak, deneysel düzeneğe karşılık gelen 1 borulu soğutma sistemi için geometrik model oluşturulmuş ve deneysel verilerle karşılaştırmalı doğrulama gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.33). Elde edilen uyumlu sonuçlar sonrasında, 2 ve 3 borulu sistemler için geometrik modeller geliştirilmiş ve bu yeni konfigürasyonlar üzerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda, deneysel çalışmalarda kullanılan akış hızları aynen korunmuş, ek olarak 2 ve 3 borulu dizilimlerde farklı hız senaryoları da değerlendirmeye alınmıştır.



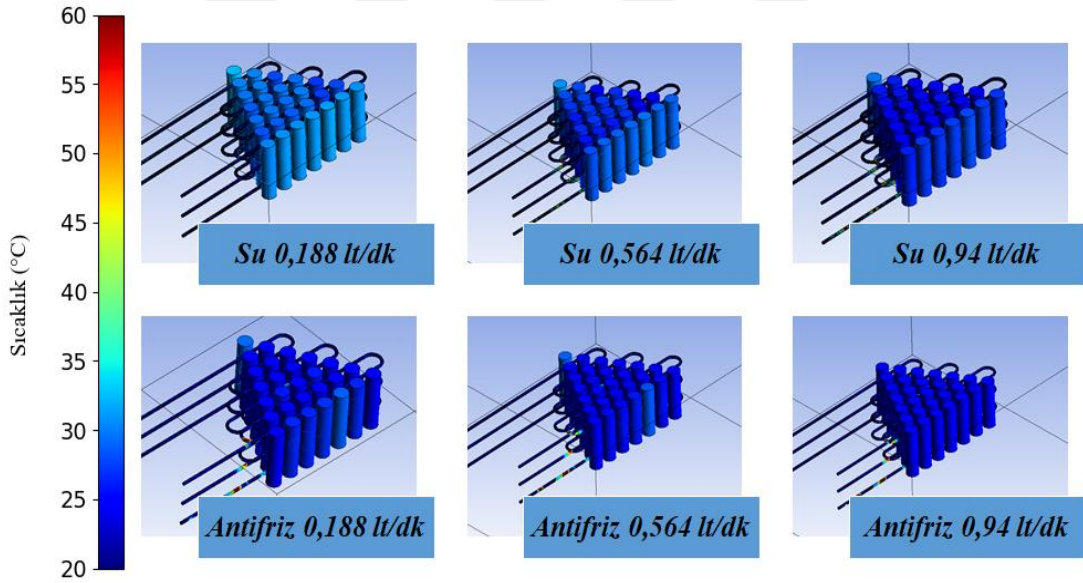
Şekil 4.33. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 1 borulu sayısal sonuçlar

Şekil 4.33’ de, 0,25 lt/dk, 0,60 lt/dk ve 0,93 lt/dk debi değerlerinde hem su hem de antifriz akışkanları için elde edilen sayısal sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Görselde üst sıra suyla, alt sıra ise antifrizle yapılan analizleri temsil etmektedir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, debi arttıkça sıcaklıkların düşme eğiliminde olduğu ve soğutma etkinliğinin yükseldiği açıkça görülmektedir. Özellikle antifriz kullanımının, suya kıyasla daha düşük sıcaklık seviyeleri sağladığı ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, deneysel verilerle yüksek oranda uyum göstermekte olup, oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Elde edilen bu doğrulama neticesinde, daha gelişmiş çok borulu sistemler için sayısal analizlere geçiş yapılmıştır (Şekil 4.34 ve Şekil4.35).



Şekil 4.34. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 2 borulu sayısal sonuçlar

Şekil 4.34'te, iki borulu soğutma sistemi için su ve antifriz kullanılarak farklı debilerde gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sıcaklık dağılımı sonuçları sunulmuştur. 0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk debi değerleriyle elde edilen bulgular, her iki soğutucu akışkanın da batarya modüllerinin termal yönetiminde etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, antifriz tüm debi aralıklarında suya kıyasla daha düşük sıcaklık seviyeleri oluşturmuş ve daha dengeli bir soğutma karakteristiği sergilemiştir. Özellikle en düşük debi olan 0,188 lt/dk'da bile antifriz, batarya hücre sıcaklıklarını güvenli çalışma sınırları içerisinde tutabilmiş, oysa aynı koşullarda suyun yeterli soğutma sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Debi arttıkça – özellikle 0,94 lt/dk seviyesinde – her iki akışkan da etkili bir ısı giderimi sağlamış, ancak antifrizle 20–27 °C sıcaklık aralığına kadar düşüşler elde edilerek daha üstün bir performans ortaya konmuştur. Bu bulgular, antifrizin hem düşük hem de yüksek debi koşullarında suya göre daha verimli bir ısı transfer kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymakta ve iki borulu sistemlerde tercih edilmesi gereken bir soğutucu olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.35. Üçgen dizilimde su ve antifriz için 3 borulu sayısal sonuçlar

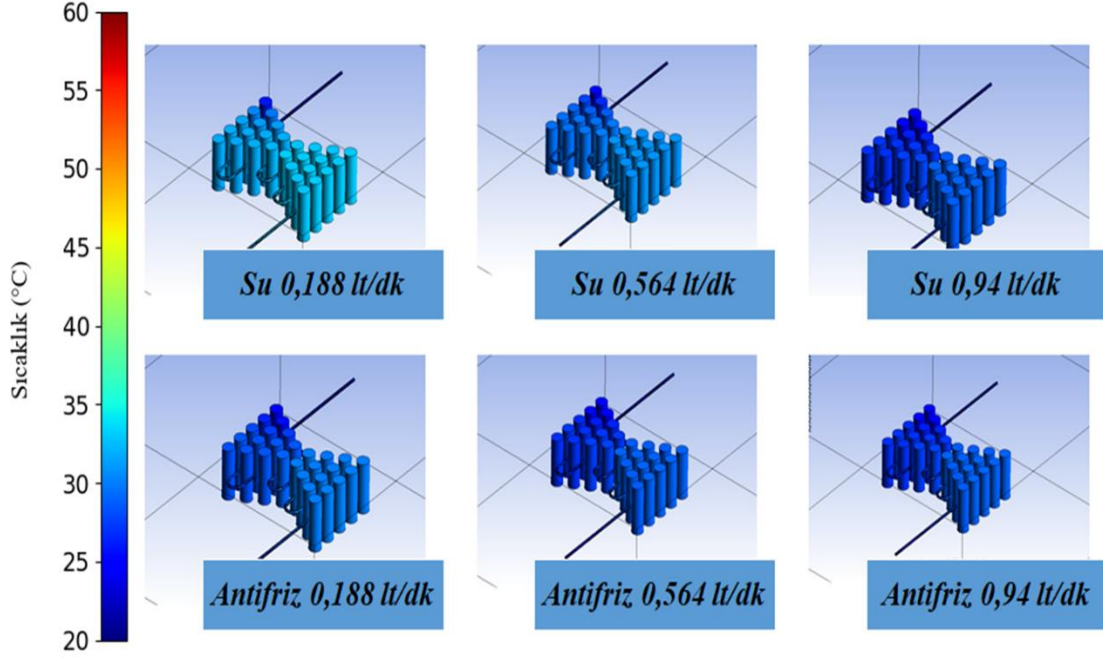
Şekil 4.35'te, üç borulu soğutma sistemi için su ve antifriz kullanılarak farklı debi değerlerinde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sıcaklık dağılımları verilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki soğutucu akışkanın da batarya modüllerinin termal kontrolünde etkili rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ancak antifriz, tüm debi senaryolarında suya kıyasla daha düşük sıcaklık seviyeleri sağlamış ve daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sunmuştur. Özellikle en düşük debide (0,188 lt/dk),

antifrizle batarya hücrelerinin sıcaklıkları güvenli sınırlar içerisinde tutulabilirken, aynı koşullarda suyun yetersiz bir soğutma sağladığı görülmüştür. Debi değeri arttıkça (özellikle 0,94 lt/dk'da), her iki akışkan da etkili bir soğutma sağlamış olsa da, antifrizle elde edilen sıcaklıkların 20–25 °C aralığına kadar düştüğü ve daha homojen bir ısı dağılımı elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, antifrizin yalnızca yüksek debilerde değil, düşük debi koşullarında da suya kıyasla üstün bir termal performans sergilediğini ve üç borulu sistemler için etkili bir soğutucu alternatifi sunduğunu göstermektedir.

Deneysel ve sayısal analizlerin bütüncül değerlendirmesi sonucunda, üçgen dizilim geometrisine sahip batarya paketlerinde kullanılan soğutucu akışkanın türü ve debi değeri, sistemin termal performansı üzerinde doğrudan etkili parametreler olarak öne çıkmıştır. Gerek tek borulu gerekse çok borulu sistemlerde yapılan çalışmalar, antifrizin suya kıyasla daha düşük sıcaklık değerleri sağladığını ve sıcaklık dağılımını daha homojen hâle getirdiğini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, sayısal modellerin deneysel verilerle yüksek oranda örtüşmesi, yapılan CFD analizlerinin güvenilirliğini teyit etmiş ve çok borulu konfigürasyonlara yönelik tasarım sürecinde sağlam bir temel sunmuştur. Özellikle düşük debi koşullarında dahi antifriz ile elde edilen etkin soğutma, hem enerji verimliliği hem de batarya güvenliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu doğrultuda, antifriz temelli soğutma stratejileri, yoğun enerji gereksinimi olan batarya sistemlerinin uzun ömürlü ve güvenli şekilde çalışabilmesi adına etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Üçgen dizilime sahip batarya paketine yönelik gerçekleştirilen sayısal ve deneysel incelemelerin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında içbükey dizilime sahip batarya paketine geçilmiştir. Bu konfigürasyonda, hücrelerin içe doğru kavisli bir formda yerleştirilmesi ve sıvı soğutma kanallarının konumlandırılmasındaki değişiklikler, geometrik yapının soğutma performansına etkilerini değerlendirmek amacıyla detaylı biçimde ele alınmıştır. İçbükey dizilim, soğutucu akışkanın merkezden çevreye doğru daha dengeli bir şekilde dağılmasına olanak tanıyarak, hücreler arası sıcaklık farklarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, öncelikle sayısal simülasyon çalışmaları yürütülmüş; 1, 2 ve 3 sıvı soğutma kanallı içbükey konfigürasyonlar ayrı ayrı modellenerek termal performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar, 10 amperlik deşarj akımı altında ve farklı soğutucu akışkan debilerinde gerçekleştirilmiş, hücreler arasına yerleştirilen kanallar sayesinde ısı transfer yüzey alanındaki artışın soğutma etkinliğine etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, uygun kanal yerleşimi ve debi seçimi ile içbükey dizilimin, termal yönetimde oldukça verimli sonuçlar sunabileceğini ortaya

koymaktadır. Bu nedenle, içbükey dizilimde kanal konumlandırması ve akış yönü, termal performans üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu konfigürasyona ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları aşağıda detaylı şekilde sunulmuştur.

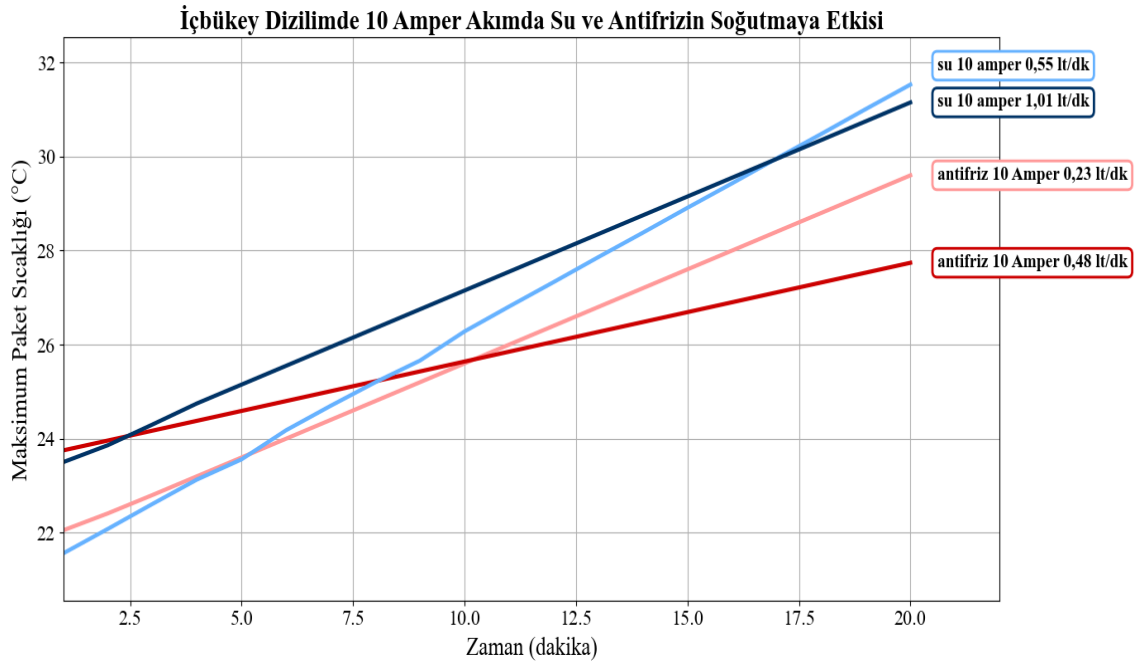


Şekil 4.36. İçbükey dizilimde 10 Amper akımda 1 borulu simülasyon sonuçları

Şekil 4.36’ da, içbükey dizilime sahip ve tek boru kanalıyla tasarlanmış batarya paketinde, farklı soğutucu türleri (su ve antifriz) ile üç farklı debide (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) gerçekleştirilen sayısal analizlerin sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Üst sırada su soğutma sonuçları, alt sırada ise antifriz soğutma sonuçları yer almaktadır. Renk skalası 20 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklık değerlerini temsil etmekte olup, mavi tonlar düşük sıcaklıkları, kırmızıya yakın tonlar ise yüksek sıcaklık bölgelerini ifade etmektedir. Düşük debide (0,188 lt/dk) her iki soğutucu akışkan için de batarya hücreleri üzerinde daha yüksek sıcaklık bölgeleri olduğu gözlemlenmiştir. Debi artırıldığında, soğutucu akışkanın konvektif ısı taşıma kapasitesi artmış, buna bağlı olarak sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmiş ve maksimum sıcaklık değerleri kayda değer oranda azalmıştır. Su, sahip olduğu yüksek ısıl iletkenlik ve özgül ısı kapasitesi sayesinde özellikle yüksek debi aralıklarında daha düşük sıcaklık seviyeleri elde etmiştir. Ancak, antifriz kullanımı, yüksek viskozitesine rağmen, özellikle en yüksek debi olan 0,94 lt/dk’da, daha kararlı bir sıcaklık profili ve daha düşük maksimum sıcaklık değeri sunarak en iyi termal performansı sağlamıştır. Bu durum, antifrizin geniş sıcaklık

aralıklarında ısı kararlılığını koruması ve akışkanın boru içi türbülans karakteristiğini iyileştirmesi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, batarya paketinde hücre merkezleri arası mesafenin sağ ve sol taraflarda kısmi olarak farklılık göstermesi, yerel sıcaklık alanlarında küçük varyasyonlara neden olmuştur. Ancak bu geometrik farklılıklardan kaynaklanan sıcaklık sapmalarının, genel soğutma performansına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

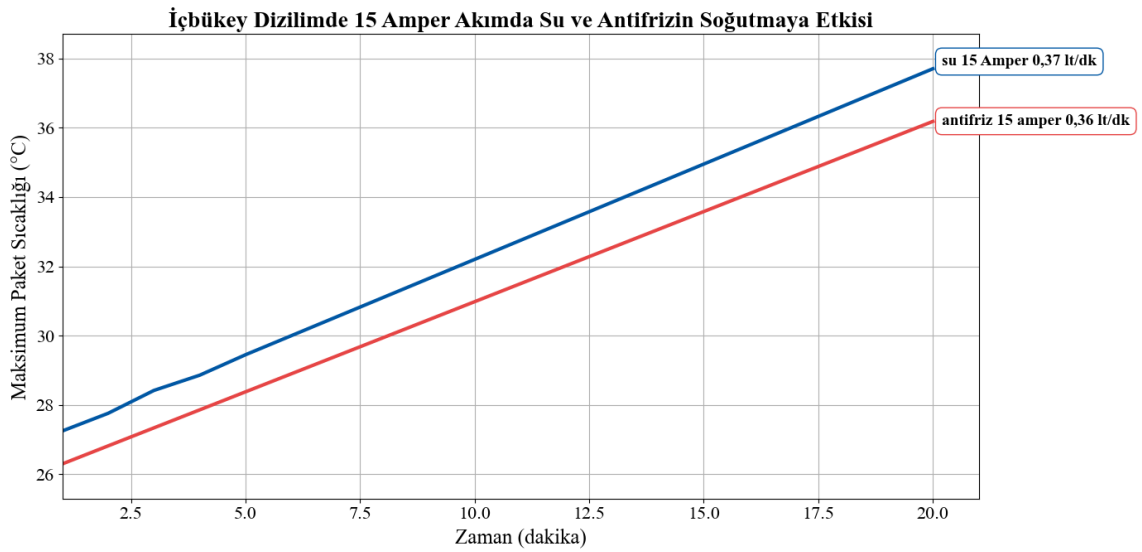
Tek borulu içbükey dizilime sahip düzenekte özellikle düşük debilerde (0,188 lt/dk) akışkanın batarya paketine dağılımının yeterince homojen olmaması, hücreler arasında belirgin sıcaklık farklarının oluşmasına neden olmuştur. Düşük debilerde akışın belirli bölgelerde yoğunlaşması, kenar kısımlarda soğutma etkinliğinin azalmasına ve termal homojenliğin bozulmasına yol açmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla iki borulu tasarımda kanal yerleşimi, akışkanın hem giriş hem de çıkış bölgelerinde daha dengeli bir dağılım sağlayacak şekilde yeniden düzenlenmiş ve tüm hücreler üzerinde daha homojen bir soğutma sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, su soğutma için 0,55 lt/dk ve 1,01 lt/dk, antifriz soğutma için ise 0,23 lt/dk ve 0,48 lt/dk debilerinde testler yapılmıştır. Mini borulu yapıda su testlerinde elde edilen yüksek hız değerlerini antifriz ile birebir yakalamanın zorluğu nedeniyle, antifriz deneylerinde suya karşılık gelen akış hızlarındaki debiler tercih edilmiştir. Deneysel dizilim sonrasında, elde edilen verilerin detaylı analizi ve farklı çalışma koşullarının incelenebilmesi amacıyla aynı iki borulu konfigürasyon sayısal simülasyon ortamına aktarılmış ve CFD çalışmaları yürütülmüştür.



Şekil 4.37. 2 borulu içbükey dizilimde su ve antifriz için 10 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları

Şekil 4.37’ de, 10 amperlik sabit bir deşarj akımı altında içbükey dizilime sahip batarya paketine uygulanan su ve antifriz bazlı soğutma senaryolarının zamana bağlı maksimum sıcaklık değişimleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik üzerinde yer alan dört farklı soğutma senaryosu, iki farklı akışkan (su ve antifriz) ve iki farklı debi düzeyiyle temsil edilmiştir. Bu sayede hem akışkan türünün hem de debinin sıcaklık üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Su kullanılan senaryolarda (mavi tonlu çizgiler), sıcaklık artışı daha belirgin olup debi arttıkça sıcaklık artış oranının azaldığı gözlemlenmiştir. 0,55 lt/dk debili su kullanıldığında sıcaklık 21,9 °C’den başlayarak 20. dakikada yaklaşık 31,8 °C’ye ulaşmış ve $\Delta T \approx 9,9$ °C olmuştur. Daha yüksek debi olan 1,01 lt/dk su senaryosunda ise sıcaklık 23,8 °C’den 31,6 °C’ye yükselerek $\Delta T \approx 7,8$ °C olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, suyun debisinin artırılmasının sıcaklık artış hızını sınırladığını göstermektedir. Antifriz kullanılan senaryolarda (kırmızı tonlu çizgiler), suya kıyasla daha düşük sıcaklık artışları elde edilmiştir. 0,23 lt/dk debili antifriz uygulamasında sıcaklık 22 °C’den 29,3 °C’ye çıkarak $\Delta T \approx 7,3$ °C olmuştur. Daha yüksek debili (0,48 lt/dk) antifriz senaryosunda ise sıcaklık 23,9 °C’den başlayarak 27,8 °C’ye ulaşmış ve sadece $\Delta T \approx 3,9$ °C artmıştır. Bu değerler, içbükey dizilimde antifrizin, aynı akım koşulları altında suya kıyasla daha verimli bir ısı uzaklaştırma sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle 1,01 lt/dk su ile 0,48 lt/dk antifriz senaryoları karşılaştırıldığında, antifrizin yaklaşık daha düşük bir debiyle çalışmasına rağmen yaklaşık 3,7 °C daha düşük

bir maksimum sıcaklık sağladığı görülmektedir. Bu bulgu, antifrizin daha yüksek ısı taşıma kapasitesine, kaynama noktasına ve kararlı viskozite profiline sahip olması sayesinde, termal yönetim sistemlerinde debi bağımlılığı daha az olan etkili bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, içbükey dizilime sahip batarya paketlerinde 10 amper akım altında gerçekleştirilen bu analizler, antifrizin suya göre daha düşük debilerde dahi daha etkin bir soğutma sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle sınırlı pompa gücü ve kompakt sistem tasarımı gerektiren batarya paketlerinde antifrizin tercih edilmesini desteklemektedir. Ayrıca, sadece soğutucu tipi değil, aynı zamanda akış debisinin optimize edilmesi gerektiği de vurgulanmaktadır.

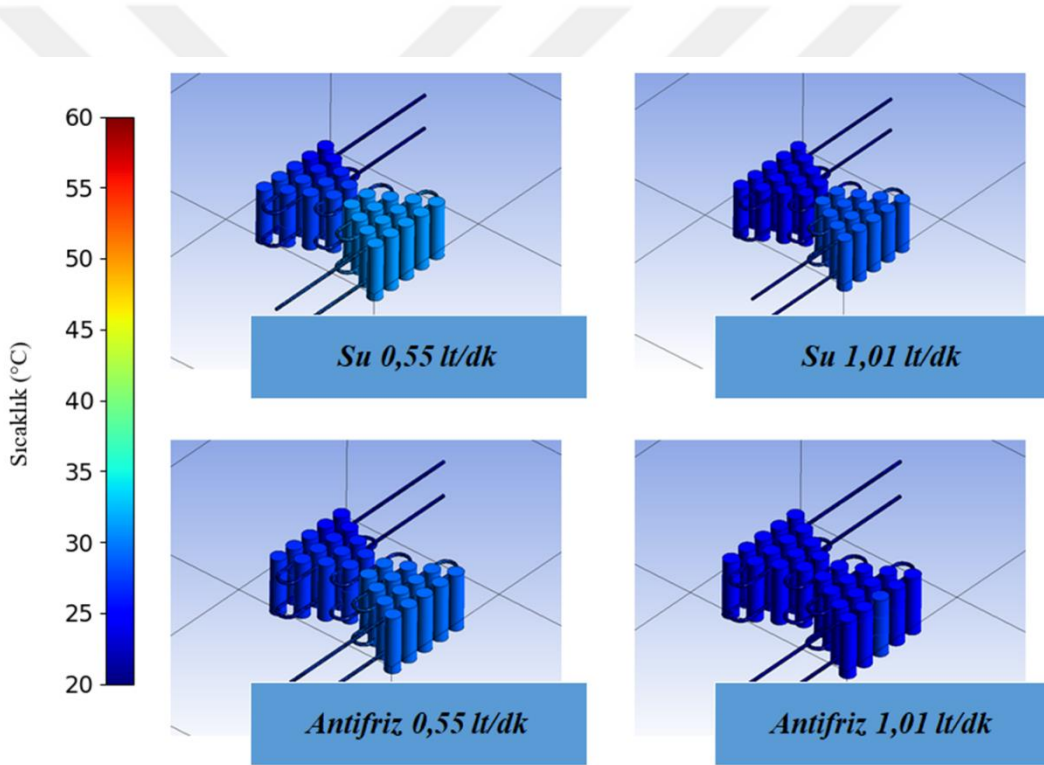


Şekil 4.38. 2 borulu içbükey dizilimde su ve antifriz için 15 Amper akımda soğutma deneysel sonuçları

Şekil 4.38’ de, içbükey dizilime sahip batarya paketinde 15 amperlik sabit bir deşarj akımı uygulanarak yürütülen deneysel çalışmada, farklı soğutma akışkanları (su ve antifriz) ve farklı debi değerlerinde maksimum hücre sıcaklığı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Su kullanılan senaryolarda (mavi tonlu çizgiler), sıcaklık artışı daha hızlı gerçekleşmiştir. 0,37 lt/dk su debisiyle yapılan uygulamada sıcaklık 27,2 °C’den başlayarak 20. dakikada 37,8 °C’ye ulaşmış ve $\Delta T \approx 10,6$ °C olmuştur. Daha yüksek debili (0,80 lt/dk) su uygulamasında ise sıcaklık 23,6 °C’den başlayarak 32,5 °C’ye yükselmiş ve $\Delta T \approx 8,9$ °C olarak kaydedilmiştir. Bu durum, debinin artırılmasının sıcaklık artış hızını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Antifriz kullanılan senaryolarda (kırmızı tonlu çizgiler), aynı debi seviyelerinde suya kıyasla daha düşük maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir. 0,36 lt/dk debili antifriz uygulamasında sıcaklık 26,3 °C’den

başlayarak 36,1 °C'ye ulaşmış ve $\Delta T \approx 9,8$ °C olmuştur. Aynı debide çalışan antifriz ve su karşılaştırıldığında, antifrizin yaklaşık 1,5 °C daha düşük maksimum sıcaklık sağladığı dikkat çekmektedir. Bu fark, antifrizin daha yüksek ısıl iletkenliği ve termal kararlılığı sayesinde sağlanmaktadır. Bu bulgular, artan akım seviyesinde (15 A) soğutma yükünün arttığını ve dolayısıyla hem akışkan seçiminin hem de debi miktarının daha kritik hale geldiğini ortaya koymaktadır. İçbükey dizilimde, antifriz kullanımı daha etkin bir ısı yönetimi sunarken, özellikle yüksek debi seviyelerinde sıcaklık artışını baskılamada belirgin avantaj sağlamaktadır.

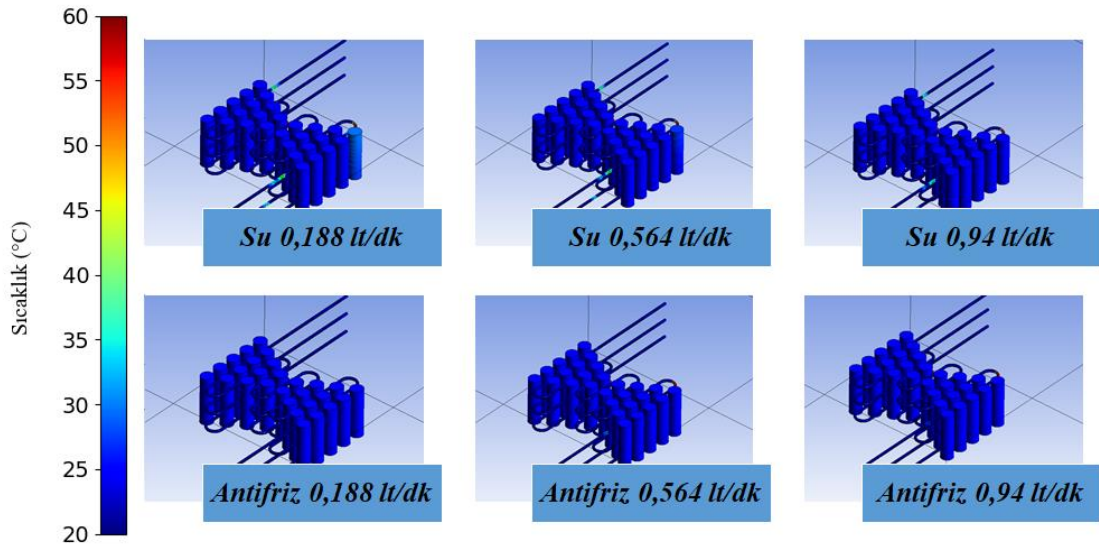
İçbükey dizilime sahip deneysel çalışmaların ardından, su soğutmada kullanılan debiler (0,55 lt/dk ve 1,01 lt/dk) simülasyon çalışmalarında karşılaştırmaların yapılabilmesi için antifrizli soğutma debisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.39. 2 borulu içbükey dizilimde 10 Amper akımda sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.39' da, içbükey dizilime sahip iki borulu batarya paketinde, farklı soğutucu akışkan türleri (su ve antifriz) ve iki farklı debi değerinde (0,55 lt/dk ve 1,01 lt/dk) gerçekleştirilen sayısal analizlerin sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Üst sırada su soğutma sonuçları, alt sırada ise antifriz soğutma sonuçları yer almaktadır. Sayısal analiz sonuçları, aynı çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle tutarlı olup, elde edilen sıcaklık profilleri ve maksimum sıcaklık değerleri arasındaki uyum, modelin

doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Deneysel verilerle kıyaslandığında, özellikle yüksek debi koşullarında (örneğin 1,01 lt/dk) antifriz ile gerçekleştirilen soğutma senaryolarında maksimum sıcaklık değerlerinin en düşük seviyede kalması, her iki yöntem açısından da paralel sonuçlar sunmaktadır. Debi arttıkça, sayısal ve deneysel analizlerde sıcaklık dağılımının daha homojenleştiği, sıcaklık piklerinin azaldığı ve batarya modülünün termal performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Antifriz, yüksek viskozitesine rağmen iki borulu içbükey dizilimde sağladığı dengeli akış dağılımı sayesinde, özellikle yüksek debi koşulunda, suya kıyasla daha etkin bir ısı taşıma kapasitesi göstermiştir. Bu durum, 1,01 lt/dk su ile 0,48 lt/dk antifriz senaryolarının karşılaştırmasında da açıkça görülmekte; antifriz, yaklaşık yarı debi ile daha düşük maksimum sıcaklık (yaklaşık 3,7 °C daha az) sağlamaktadır. Sonuç olarak, Şekil 4.39' da görülen sayısal sıcaklık dağılımları, deneysel bulgularla paralellik göstermekte olup, antifriz bazlı soğutma sisteminin özellikle sınırlı debi koşullarında bile üstün termal yönetim sağladığı net olarak ortaya konmaktadır. Bu da içbükey dizilimde kullanılan iki borulu batarya paketlerinde antifrizin etkinliğini ve tercih edilebilirliğini güçlendirmektedir.



Şekil 4.40. 3 borulu içbükey dizilimde 10 Amper akımda sayısal analiz sonuçları

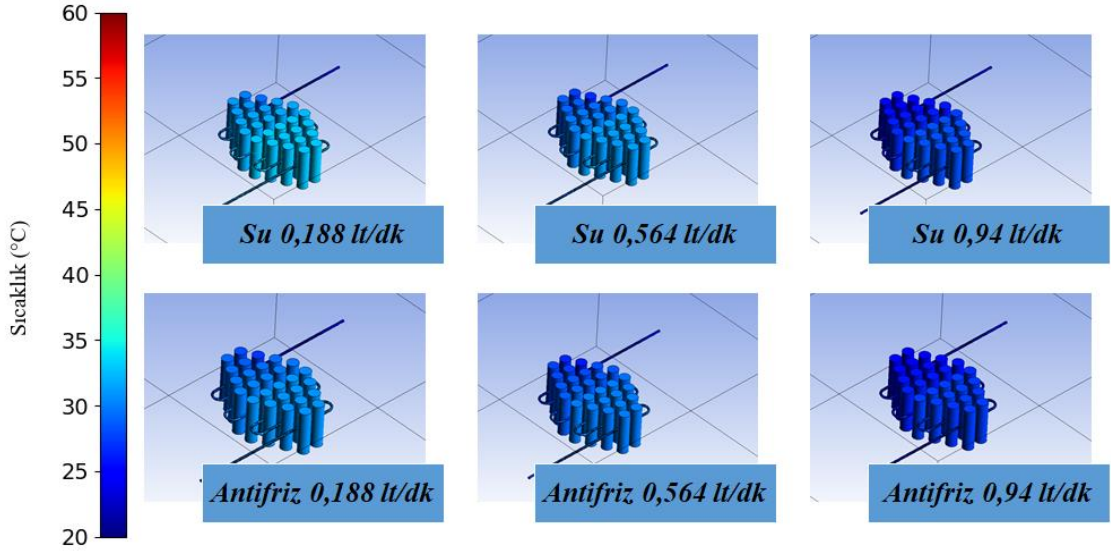
Şekil 4.40, içbükey dizilim geometrisine sahip üç borulu soğutma sistemi için su ve antifriz kullanılarak farklı debi değerlerinde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Analiz sonuçları, her iki soğutucu akışkanın da batarya modüllerinin sıcaklık kontrolünde etkili

olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, antifriz tüm debi senaryolarında suya kıyasla daha düşük maksimum sıcaklıklar ve daha dengeli bir sıcaklık profili sağlamıştır. En düşük debi olan 0,188 lt/dk koşulunda, antifriz ile batarya hücrelerinin sıcaklıkları güvenli aralıkta korunabilirken, aynı şartlarda su soğutmanın yeterli performansı gösteremediği görülmüştür. Debinin artmasıyla birlikte (özellikle 0,94 lt/dk'da), her iki akışkan da başarılı bir soğutma sağlasa da, antifriz kullanımında sıcaklıkların 20–25 °C aralığına kadar düştüğü ve tüm modül genelinde oldukça homojen bir ısı dağılımı elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, antifrizin yalnızca yüksek debilerde değil, düşük debi koşullarında da suya göre üstün soğutma kapasitesine sahip olduğunu ve üç borulu soğutma sistemleri için güvenilir ve verimli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Deneysel ve sayısal analizlerin bütüncül değerlendirmesi sonucunda, içbükey dizilim geometrisine sahip batarya paketlerinde kullanılan soğutucu akışkanın türü ve debi değeri, sistemin termal performansı üzerinde doğrudan etkili parametreler olarak öne çıkmıştır. Tek veya çok borulu sistemlerde yapılan çalışmalar, antifrizin suya kıyasla daha düşük sıcaklık değerleri sağladığını ve sıcaklık dağılımını daha homojen hâle getirdiğini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, sayısal modellerin deneysel verilerle yüksek oranda örtüşmesi, yapılan CFD analizlerinin güvenilirliğini teyit etmiş ve çok borulu konfigürasyonlara yönelik tasarım sürecinde sağlam bir temel sunmuştur. Özellikle düşük debi koşullarında dahi antifriz ile elde edilen etkin soğutma, hem enerji verimliliği hem de batarya güvenliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu doğrultuda, antifriz temelli soğutma stratejileri, yoğun enerji gereksinimi olan batarya sistemlerinin uzun ömürlü ve güvenli şekilde çalışabilmesi adına etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

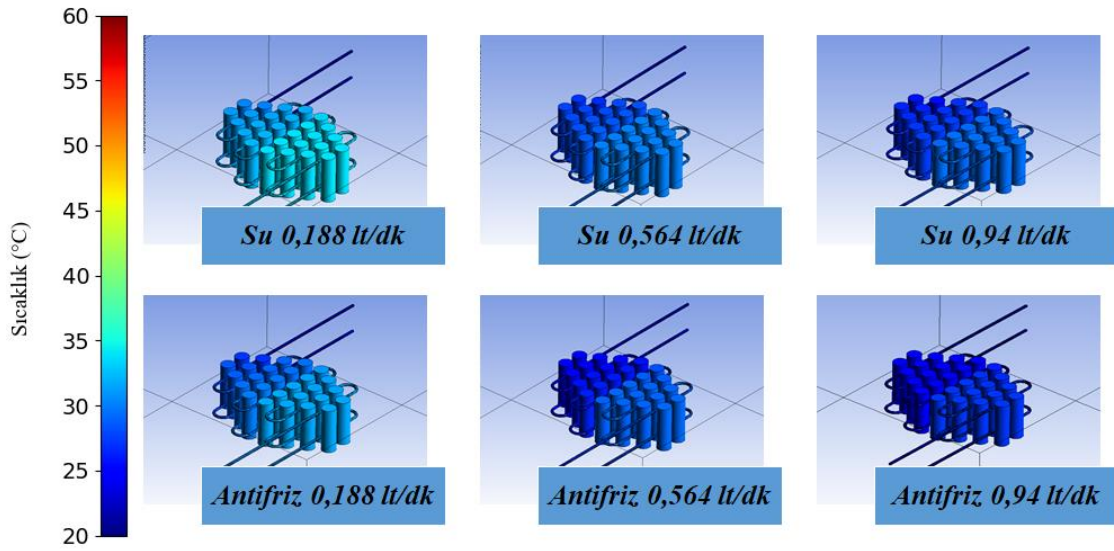
İçbükey dizilime sahip batarya paketine yönelik yapılan sayısal ve deneysel analizlerin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında dışbükey dizilime sahip batarya paketine geçilmiştir. Bu yeni konfigürasyonda hücre yerleşimi ve sıvı akış kanallarının farklılık göstermesi nedeniyle, soğutma performansının geometrik değişikliklerle nasıl etkilendiği detaylı biçimde incelenmiştir. Dışbükey dizilime sahip batarya paketi, hücrelerin dışa doğru kavisli bir yapı oluşturacak şekilde yerleştirilmesiyle, soğutucu akışkanın geniş bir yüzey boyunca yayılmasına imkân tanımaktadır. Dışbükey yapı, özellikle yüksek debilerde akışın daha kontrollü ilerlemesine ve ısı transferinin daha dengeli gerçekleşmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dışbükey dizilime sahip batarya paketine ait 1, 2 ve 3 sıvı soğutma kanallı sistemler ayrı ayrı modellenmiş ve her bir düzenlemenin termal

performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları, 10 amperlik deşarj akımı altında ve farklı soğutucu akışkan debilerinde yürütülmüştür. Batarya hücreleri arasına simetrik şekilde yerleştirilen sıvı kanallarıyla ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Yapılan analizler, dışbükey konfigürasyonun uygun kanal yerleşimiyle oldukça etkili bir termal yönetim sunabileceğini ortaya koymaktadır.



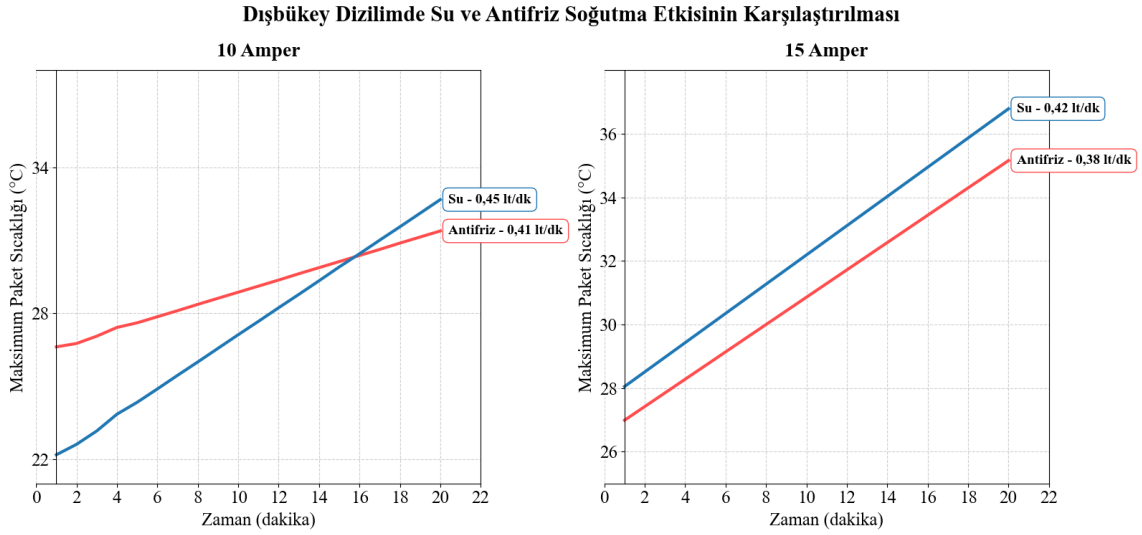
Şekil 4.41. 1 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.41’de, dışbükey dizilim geometrisine sahip tek borulu soğutma sistemi için farklı debilerde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) su ve antifriz soğutucu akışkanlarının kullanılması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımları sunulmaktadır. Görselde üst sırada su, alt sırada ise antifriz kullanılan senaryolar yer almakta olup her iki akışkan için debi arttıkça batarya yüzeyinde oluşan sıcaklıkların belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Düşük debi değerlerinde (0,188 lt/dk) soğutma etkinliği sınırlı kalırken, 0,94 lt/dk debide hem su hem de antifriz ile daha homojen ve düşük sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Renk skalası incelendiğinde, antifrizin tüm debi koşullarında suya kıyasla daha düşük sıcaklık seviyelerine ulaştığı, dolayısıyla daha etkin bir soğutma performansı sergilediği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, soğutma performansının hem akışkan tipine hem de debi değerine doğrudan bağlı olduğunu ve yüksek debi ile antifriz kullanımının sistem verimliliğini artırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.42. 2 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları

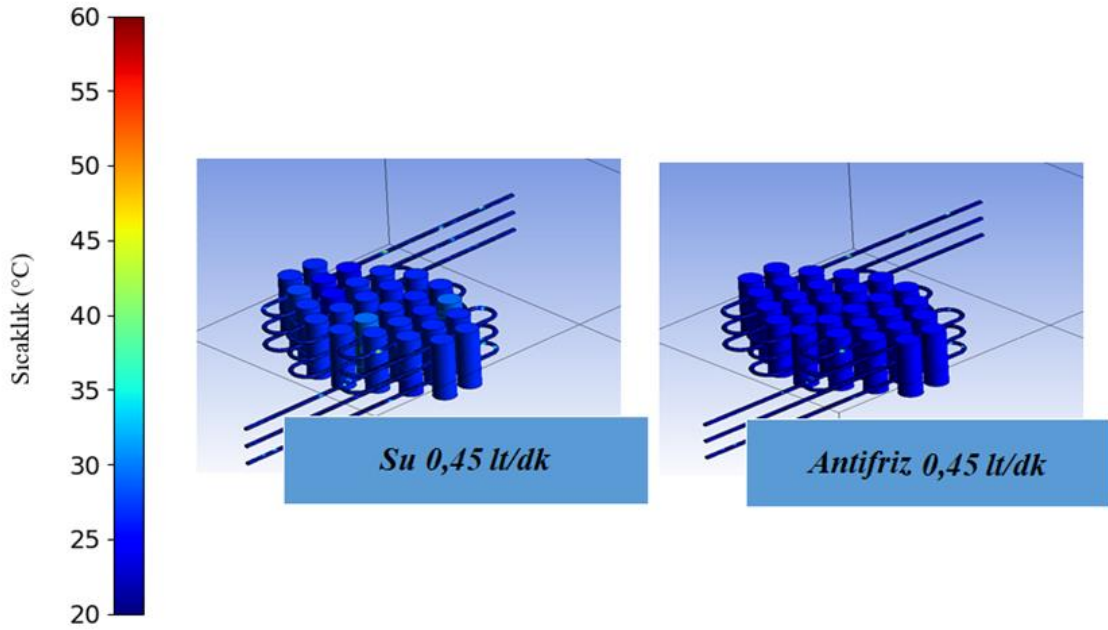
Şekil 4.42’de, dışbükey dizilim geometrisine sahip iki borulu soğutma sistemi için farklı debi değerlerinde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) su ve antifriz soğutucu akışkanlarının kullanılması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Üst sırada su, alt sırada ise antifriz kullanılan senaryolar yer almakta olup, her iki akışkan için de debi arttıkça batarya yüzeyinde oluşan sıcaklıkların belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Düşük debide (0,188 lt/dk) soğutma etkisi sınırlı kalırken, 0,94 lt/dk debide hem su hem de antifriz ile daha homojen ve düşük sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Renk skalası incelendiğinde, antifrizin tüm debi koşullarında suya kıyasla daha düşük sıcaklık değerlerine ulaştığı ve daha etkili bir soğutma sağladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, antifrizin ısıl iletim özellikleri ile sistemdeki akış davranışının birleşimi sonucu ortaya çıkmakta olup, yüksek debi ve antifriz kullanımıyla sistemin soğutma verimliliğinin belirgin ölçüde arttığı sonucunu desteklemektedir.



Şekil 4.43. 3 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için farklı akımlarda soğutma deneysel sonuçları

Şekil 4.43'te, dışbükey dizilime sahip batarya paketi için 10 ve 15 amperlik sabit deşarj akımları altında, su ve antifriz akışkanları ile gerçekleştirilen soğutma senaryolarının maksimum paket sıcaklığı üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Şeklin sol tarafında 10 amper, sağ tarafında ise 15 amperlik akım altında elde edilen veriler yer almaktadır. Sol grafikte (10 Amper), yalnızca 0,45 lt/dk debili su ve 0,41 lt/dk debili antifriz akışkanlarına ait senaryolar karşılaştırılmıştır. Su kullanılan senaryoda, sıcaklık 22,2 °C'den başlayarak 20. dakikada 32,7 °C'ye ulaşmış ve $\Delta T \approx 10,5$ °C olarak ölçülmüştür. Antifriz kullanılan senaryoda ise sıcaklık 26,6 °C'den başlayarak 31,4 °C'ye yükselmiş ve $\Delta T \approx 4,8$ °C olmuştur. Başlangıç sıcaklıklarının farklı olması deneysel ortam koşullarındaki ortam ve akışkan sıcaklığı, akışkanın bekleme süresi veya cihazın ön çalışma durumu gibi nedenlerle ortaya çıkmıştır. Daha düşük bir başlangıç sıcaklığına rağmen su senaryosunda daha yüksek bir maksimum sıcaklığa ulaşılmıştır. Bu durum, aynı çalışma koşullarında antifrizin daha düşük sıcaklık artışıyla daha kararlı bir termal yönetim sunduğunu ortaya koymaktadır. Sağ grafikte (15 Amper), yalnızca 0,42 lt/dk debili su ve 0,38 lt/dk debili antifriz senaryoları karşılaştırılmıştır. Su kullanılan durumda sıcaklık 28 °C'den başlayarak 36,8 °C'ye yükselmiş ve $\Delta T \approx 8,8$ °C olarak gerçekleşmiştir. Antifriz kullanılan senaryoda ise sıcaklık 26,9 °C'den başlayarak 35,1 °C'ye ulaşmış ve $\Delta T \approx 8,2$ °C olmuştur. Bu veriler, her iki akışkanda da benzer sıcaklık artışları elde edilmesine rağmen antifrizin daha düşük maksimum sıcaklık değerine ulaştığını göstermektedir. Sonuç olarak, dışbükey dizilime sahip batarya paketlerinde hem 10 hem de 15 amperlik deşarj akımları altında, benzer

debilerde antifriz kullanımı, suya kıyasla daha düşük sıcaklık artışları ve daha düşük maksimum sıcaklık değerleri ile daha etkili bir soğutma performansı sağlamıştır. Bu bulgu, antifrizin daha yüksek ısı taşıma kapasitesi, viskozite kararlılığı ve geniş kaynama noktası aralığı gibi özellikleri sayesinde BTMS için suya kıyasla daha avantajlı bir soğutucu akışkan olduğunu ortaya koymakta; ayrıca batarya sistemlerinin tasarımında yalnızca akışkan türünün değil, bu akışkanlara ait debi parametresinin de kritik önemde olduğunu göstermektedir.

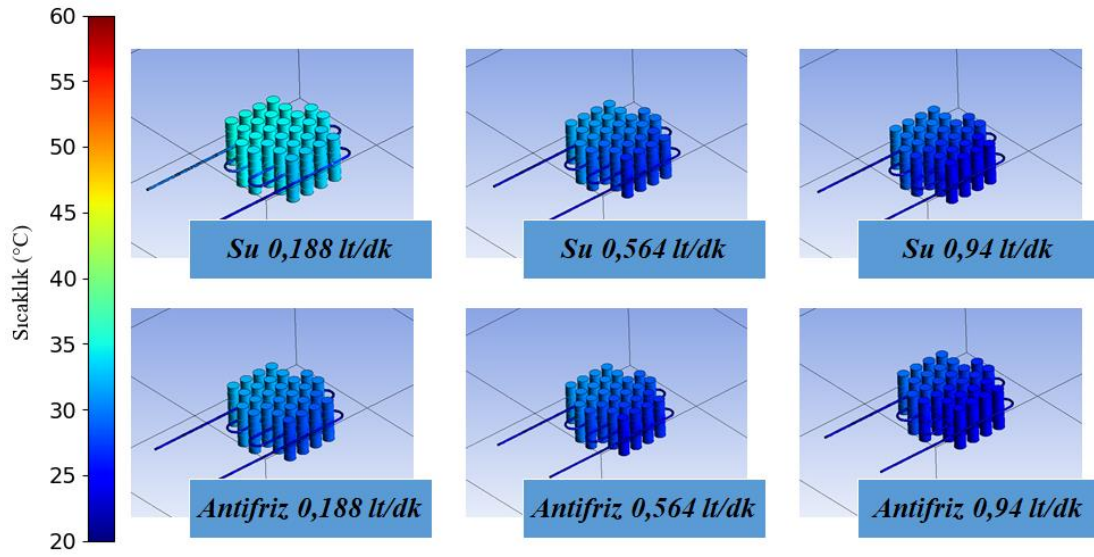


Şekil 4.44. 3 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için aynı debide sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.44'te, deneysel olarak suyun kullanıldığı 0,45 lt/dk debi koşulunda antifriz kullanılarak yapılan sayısal analiz sonuçları gösterilmektedir. Bu çalışma, deneysel verilerin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilmiş olup, deneylerde aynı debi koşullarında hem su hem de antifriz ile test yapılmasının mümkün olmaması nedeniyle, antifriz senaryosu yalnızca sayısal olarak modellenmiştir. Görselden de görüldüğü üzere, her iki akışkanda da sıcaklık dağılımı oldukça homojen olup, antifrizin ısıl performansı ile suya kıyasla sıcaklık seviyelerindeki farklılık net bir şekilde ortaya konmuştur. Böylece, deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılmasıyla sistemin soğutma karakteristiği daha kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

Üçgen, içbükey ve dışbükey dizilime sahip batarya paketlerine yönelik yapılan sayısal ve deneysel analizlerin ardından, çalışmanın bir sonraki aşamasında köşeli dizilime sahip batarya paketine geçilmiştir. Bu konfigürasyonda hücre yerleşimi ve

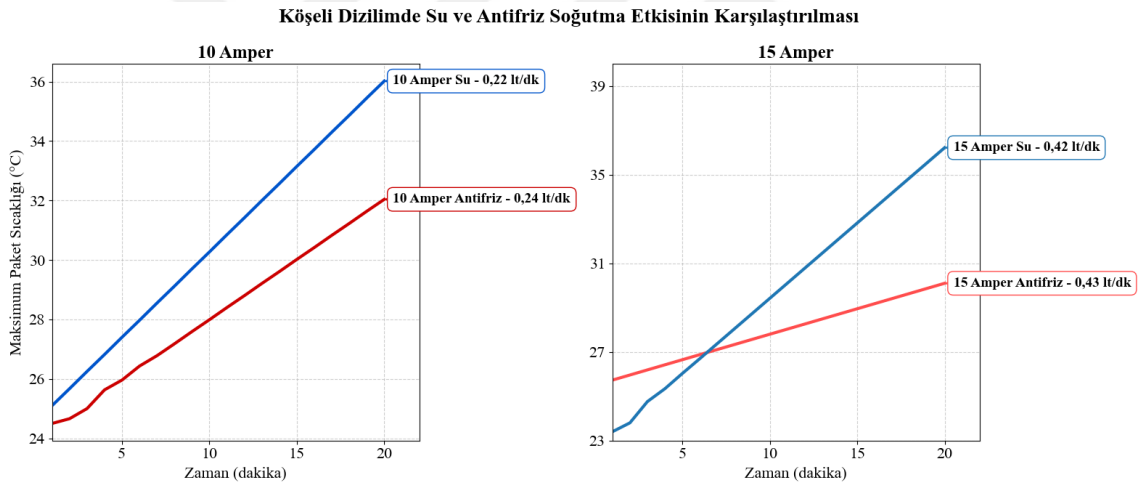
soğutma kanalları düzeni belirgin biçimde farklılık gösterdiğinden, geometrik değişikliklerin sıvı soğutma performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Köşeli yapı ile birlikte soğutucu akışkanın hücre yüzeylerine teması, akışın yönlenmesi ve genel sıvı sirkülasyonu yeniden değerlendirilmiş; aynı deşarj akımı ve debi parametreleri korunarak üçgen, içbükey ve dışbükey dizilimlerle karşılaştırmalı analiz yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Köşeli dizilime sahip batarya paketine ait 1, 2 ve 3 sıvı soğutma kanallı sistemler ayrı ayrı modellenmiş ve her bir düzenlemenin termal performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 10 amperlik deşarj akımı altında yürütülmüş olup, tüm konfigürasyonlar için farklı debi değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya hücreleri arasına simetrik şekilde yerleştirilen sıvı soğutma kanalları sayesinde ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, köşeli dizilime sahip batarya paketinde farklı kanal sayısı ve akışkan debilerine bağlı sıcaklık dağılımlarını yansıtmaktadır.



Şekil 4.45. 1 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.45'te, köşeli dizilim geometrisine sahip tek borulu batarya modülünde farklı debilerde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) su ve antifrizin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı sayısal analiz sonuçları gösterilmektedir. Görselde üst sıra suyun, alt sıra antifrizin soğutucu akışkan olduğu görülmekte olup, düşük debi değerlerinde (0,188 lt/dk) her iki soğutucu akışkanla da batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkı daha

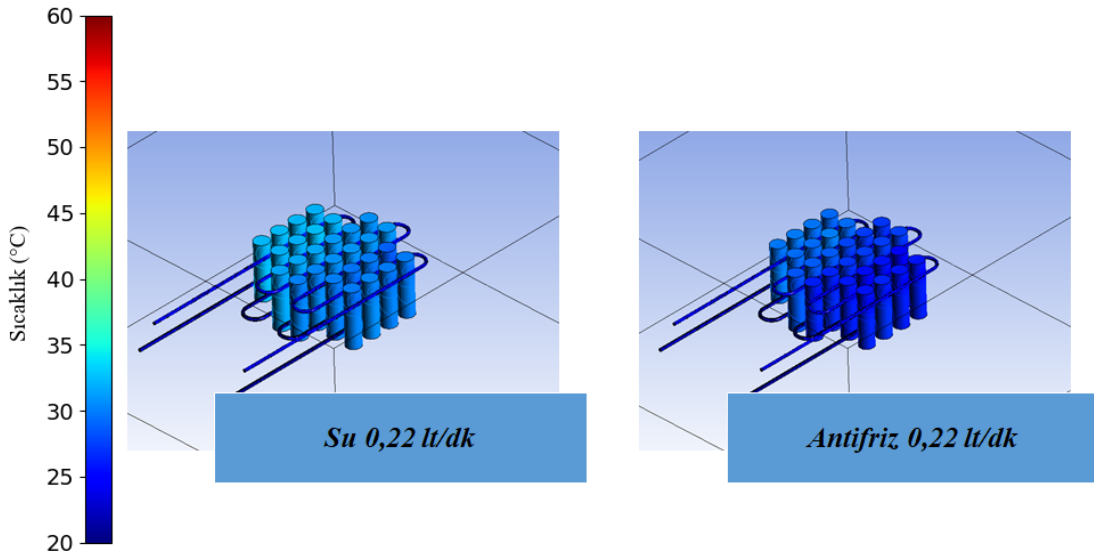
belirgin olup, su kullanımında maksimum sıcaklık değerleri antifriz kullanımına kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Debinin artırılmasıyla birlikte (0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) soğutma performansında belirgin bir artış sağlanmış, batarya yüzey sıcaklıkları düşmüş ve hücreler arasındaki sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmiştir. Antifriz kullanımı, bütün debi değerlerinde ve özellikle yüksek debilerde suya göre daha düşük maksimum sıcaklık değerleri sağlamıştır. Bu durum, antifrizin daha yüksek ısı taşıma kapasitesine sahip olması ve viskozitesinin akış rejimini etkileyerek ısı transferini artırmasından kaynaklanmaktadır. Tek borulu düzenekte düşük ve orta debi değerlerinde akışkan dağılımının homojen olmaması, hücreler arası sıcaklık farkını artırmış ve soğutma performansını sınırlamıştır. Bu nedenle, daha dengeli akış ve homojen sıcaklık dağılımı sağlamak amacıyla iki borulu düzeneğe geçilmiştir. İki borulu düzenekte deney düzeneği hazırlanmış ve farklı akım yüklerinde (10 Amper ve 15 Amper) için deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.46. 2 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı akımlarda soğutma deneysel sonuçları

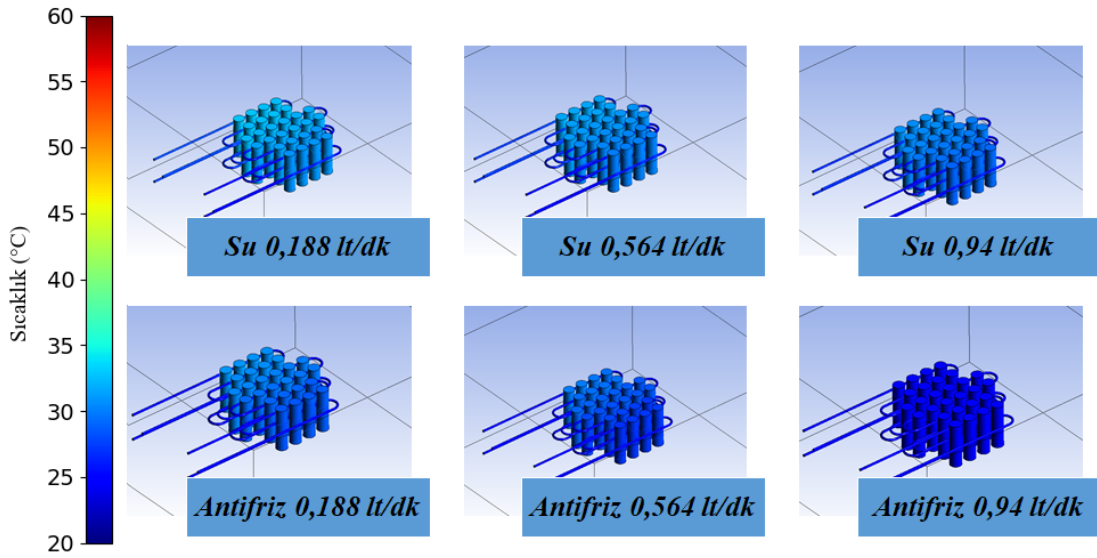
Şekil 4.46’da, köşeli dizilime sahip batarya paketi için 10 ve 15 amperlik sabit deşarj akımları altında, su ve antifriz akışkanlarının farklı debilerdeki soğutma etkileri zamana bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Sol grafikte (10 Amper), 0,22 lt/dk debili su ve 0,24 lt/dk debili antifriz senaryoları yer almaktadır. Su kullanılan durumda, başlangıç sıcaklığı 25,1 °C’den başlayarak 20. dakikada 36 °C’ye yükselmiş ve sıcaklık artışı yaklaşık 10,9 °C olarak ölçülmüştür. Antifriz senaryosunda ise sıcaklık 24,5 °C’den başlayıp 32 °C’ye çıkmış, sıcaklık artışı yaklaşık 7,5 °C olmuştur. Sağ grafikte (15 Amper) ise 0,42 lt/dk debili su ve 0,43 lt/dk debili antifriz akışkanlarının etkileri

gösterilmiştir. Su senaryosunda sıcaklık 23,4 °C'den başlayarak 36,2 °C'ye ulaşmış, sıcaklık farkı yaklaşık 12,8 °C olurken; antifriz senaryosunda 25,7 °C'den başlayıp 30,1 °C'ye yükselmiş ve sıcaklık artışı yaklaşık 4,4 °C olarak ölçülmüştür. Bu veriler, her iki akım seviyesi altında antifrizin, suya kıyasla daha düşük maksimum sıcaklıklar ve sıcaklık artışları sağladığını göstermektedir. Ayrıca, antifrizin daha yüksek ısı taşıma kapasitesi ve termal kararlılığı, batarya paketlerinin daha etkin soğutulmasını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, dışbükey dizilimde, antifriz kullanımı hem 10 hem de 15 amperde benzer debilerde suya göre daha üstün bir termal yönetim performansı sunmaktadır.



Şekil 4.47. 2 borulu dışbükey dizilimde su ve antifriz için aynı debide sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.47’de, iki borulu soğutma düzeni için 10 amper deşarj akımında deneysel olarak belirlenen debi değerleri kullanılarak elde edilen sayısal sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Deneysel koşullarda su için 0,22 lt/dk ve antifriz için 0,24 lt/dk debi değerleri ölçülmüş olup, bu çalışmada deneysel analizin doğrulamasının yapılabilmesi amacıyla yalnızca 0,22 lt/dk debi değerinde iki farklı akışkan için analizler yapılmıştır. Mini çaplı boruların kullanıldığı (iç çap 2 mm, dış çap 3 mm) düzenekte akışkan debisinin hassas bir şekilde ayarlanması oldukça güç olduğundan, deneysel ve sayısal koşullar arasındaki uyumu korumak için sabit debi değeri (22 lt/dk) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, antifriz kullanılması durumunda batarya yüzey sıcaklıklarının suya kıyasla daha düşük olduğu ve sıcaklık dağılımının daha homojen gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.48. 3 borulu köşeli dizilimde su ve antifriz için farklı debilerde sayısal analiz sonuçları

Şekil 4.48’de, köşeli dizilime sahip batarya modülünde üç borulu soğutma düzeni için su ve antifriz kullanılarak farklı debi değerlerinde (0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları gösterilmektedir. Düşük debi değerinde (0,188 lt/dk) hem su hem de antifriz için batarya yüzey sıcaklıkları diğer debi değerlerine göre daha yüksek olmakta antifriz kullanımı suya kıyasla daha düşük maksimum sıcaklık değerleri sağlamıştır. Debinin artması durumunda (0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk) modül sıcaklığı belirgin bir düşüş göstermiş ve soğutma performansı iyileşmiştir. Özellikle 0,94 lt/dk debide antifriz kullanımıyla oldukça homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Üç borulu düzenek, tek ve iki borulu düzeneklere kıyasla akışkanın batarya yüzeyine daha dengeli dağılmasını sağlayarak hücreler arası homojenliği artırmış ve genel termal yönetim performansını artırmıştır.

Yapılan deneysel ve sayısal analizler sonucunda, sıvı soğutmalı BTMS’ de kullanılan dört farklı hücre dizilim geometrisi (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) için su ve antifrizden oluşan iki farklı soğutucu akışkanın performansı detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 2 mm çapındaki mini borulu düzeneklerin debi ayarının yüksek hassasiyet gerektirmesinden dolayı, her iki akışkan için de aynı debi değerlerinde uygulama yapılamamıştır. Bu nedenle, akışkanların termal performansının karşılaştırılabilmesi amacıyla sayısal analizlerde, iki akışkan için de aynı debi değerlerinde analizler yapılarak daha geniş kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, deneysel çalışmalardan farklı olarak diğer

dizilimlerde 0,188 lt/dk, 0,564 lt/dk ve 0,94 lt/dk olmak üzere üç farklı giriş debisinde çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmanın yapılmasının amacı, değişken boru sayılarının bulunduğu farklı hücre dizilim geometrilerinin batarya modülü içerisindeki sıcaklık dağılımı, maksimum sıcaklık değeri ve sıcaklık farkı üzerindeki etkilerini belirleyerek, daha etkin ve verimli bir termal yönetim stratejisi geliştirmektir.

Üçgen dizilim geometrisine sahip batarya hücreleri, eşkenar üçgen formunda yerleştirilerek kompakt bir modül yapısı oluşturulmuştur. Bu yerleşim geometrisi ile soğutma kanallarının hücreler arasına simetrik şekilde konumlandırılmasını ve akışkanın hücre yüzeylerine daha dengeli temas etmesini sağlamaktadır. Tek kanallı sıvı soğutma düzeneğinde, akışkanın girişten çıkışa doğru tek bir hat üzerinden ilerlemesi, batarya hücresinin alt ve üst bölgelerinde soğutma dengesizliğine yol açabilmektedir. Bu durumda düşük debilerde sıcaklık farkı 8–12 °C civarında kalmaktadır. Debinin artırılmasıyla akışkanın hücre yüzeylerinde daha hızlı ısıyı alması sayesinde fark 2,5–3 °C'ye kadar düşer. İki kanallı sistemde hem alt hem üst bölgelere eş zamanlı dağılan akışkan için soğutma daha homojen hale gelmiştir. Orta debi değerlerinde bile sıcaklık farkı 2,5 – 3 °C seviyesine düşmektedir. Üç kanallı sistemde ise akışkan üç farklı bölgeden hücrelere ulaştığı için akış alanı en geniş halini almıştır. Bu yapı, bütün debi değerlerinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlasa da yüksek debilerde sıcaklık farkını 1–1,5 °C seviyesine kadar düşürmüştür. Bu sayede yüksek enerji yoğunluklu paketlerde etkili bir çözüm sunması beklenmektedir.

İçbükey dizilim geometrisine sahip batarya hücreleri, içe doğru kavisli bir yüzey üzerinde ve merkezi akışkan girişine göre simetrik yerleştirilmiştir. Bu yerleşim geometrisi ile soğutma kanallarının merkezden kenarlara eşit uzaklıkta konumlanmasına olanak tanır ve akışkanın hücre yüzeylerine daha etkili temas etmesi sağlanmaktadır. Tek kanallı sistemde dahi akışkan dağılımı diğer dizilimlere göre oldukça homojendir; düşük debilerde sıcaklık farkı 3–4 °C civarına kadar düşmüştür. İki kanallı yapıda, akışkanın alt ve üstte iki simetrik noktadan hücre yüzeylerine ulaşması, orta debi değerlerinde sıcaklık farkını 1,5–2 °C seviyelerine düşürmüştür. Üç kanallı sistemde ise akışkanın üç farklı noktadan batarya yüzeylerine teması sayesinde izotermal bir sıcaklık profili oluşturmuştur. Bu senaryoda yüksek debilerde sıcaklık farkı 1 °C'nin altına inebilir. Hem hidrodinamik verimlilik hem de ısı homojenlik açısından, sıvı soğutmalı sistemlerde içbükey dizilim en yüksek performansı sunar.

Dışbükey dizilim geometrisine sahip batarya hücreleri dışa doğru kavisli bir hat üzerinde yerleştirilmiş olup, soğutma kanalları hücre yüzeylerine paralel şekilde

uzanmaktadır. Bu yerleşim geometrisi ile dış yüzeylerdeki akış alanı genişletilirken merkez bölgelerde daha dar geçitler bulunmaktadır. Tek kanallı soğutma sisteminde akışkan, dizilimin dış bölgelerinde etkin soğutma sağlarken, merkez bölgelerinde durgun akış alanları oluşturur; düşük debilerde sıcaklık farkı 5–6 °C seviyesindedir. İki kanallı sistemde akışkan hem üst hem alt yüzeylere yönlendirilerek merkez bölgelerdeki soğutma yetersizliği azaltılarak tek kanallı sisteme göre daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve orta debi değerlerinde fark 2–3 °C seviyelerine düşmüştür. Üç kanallı sistemde ise akışkanın tüm yüzeylere dengeli dağılması sağlanmış; yüksek debilerde sıcaklık farkı 1,5–1,8 °C civarında gerçekleşmiştir. Dışbükey yapı, içbükey yapıya göre biraz daha az verimli olsa da çok kanallı sıvı soğutma ile tatmin edici sonuçlar verir.

Köşeli dizilim geometrisine sahip batarya hücreleri dikdörtgen formda sıkı bir paket halinde yerleştirilmiştir. Bu yapı, kompakt bir görünüm sağlasa da özellikle iç köşe bölgelerde akışkan hızının düşmesine ve durgun alanların oluşmasına neden olur. Tek kanallı sistemde bu durum belirginleşir; düşük debilerde sıcaklık farkı 8–10 °C seviyesinde kalmaktadır. İki kanallı yapıda alt ve üstten gelen akış, kenar bölgelerde verim sağlasa da iç bölgelerde homojenlik sınırlıdır; orta debi değerlerinde fark 3,5–5 °C aralığında olur. Üç kanallı sistemde ise, akışkanın üç noktadan dağıtılmasıyla iç bölgelerdeki durgunluk kısmen azaltılır; yüksek debilerde sıcaklık farkı 2,5–3 °C'ye kadar düşmektedir. Ancak geometrik dezavantajları nedeniyle köşeli dizilim, sıvı soğutmalı sistemlerde diğer dizilimlerin gerisinde kalmıştır.

Sıvı soğutma analizleri sonucunda, içbükey dizilimin en yüksek ısı homojenliği ve en düşük sıcaklık farkını sağladığı belirlenmiştir. Üç kanallı içbükey sistem, yüksek debilerde neredeyse izotermal bir sıcaklık dağılımı oluşturmuş ve termal yönetim açısından en verimli çözümü sunmuştur. Üçgen dizilim, yüksek kanallı yapılarda iyi performans göstererek içbükeye yakın sonuçlar üretmiştir. Dışbükey dizilim, çok kanallı sistemlerde belirli bir verimliliğe ulaşmış ancak geometrik yapısı nedeniyle orta seviyede kalmıştır. Köşeli dizilim ise her durumda en düşük performansı sergilemiş, özellikle tek kanallı sistemde yüksek sıcaklık farkları gözlenmiştir. Boru/kanal sayısının artırılması, tüm dizilimlerde soğutma performansını anlamlı derecede iyileştirmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlara yönelik batarya paketlerinde kullanılan farklı soğutma stratejilerinin (hava, ısı borulu ve sıvı temelli) ve geometrik dizilimlerin (üçgen, içbükey, dışbükey ve köşeli) batarya sistemlerinin termal performansı üzerindeki etkileri, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. 4 seri ve 7 paralel hücreden oluşan, toplam 28 adet 18650 tipi lityum-iyon hücre içeren batarya paketleri, farklı soğutma sistemleri altında test edilerek optimum çalışma sıcaklığı (20–40 °C) ve hücreler arası sıcaklık farkı (<5 °C) kriterlerinin sağlanmasına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir.

Hava soğutmalı sistemlerde fan konumu, hızları, çıkış konfigürasyonları ve çıkış fanı kullanımı gibi parametrelerin etkisi, ısı borulu sistemlerde farklı boru sayıları ve hava akış hızının performansa katkısı değerlendirilmiştir. Sıvı soğutmalı sistemlerde ise su ve antifriz gibi farklı akışkanların çeşitli debi koşullarındaki soğutma etkinlikleri incelenmiş ve deneysel veriler ışığında doğrulanan sayısal analizlerle sistem davranışı derinlemesine analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her bir dizilim geometrisi ve soğutma yaklaşımı için ayrı ayrı değerlendirilmiş; BTMS tasarımı ve optimizasyonuna yönelik önemli çıkarımlar yapılmıştır. Bu bölümde, yürütülen analizler sonucunda elde edilen temel bulgulara ve tasarım önerilerine yer verilmektedir.

Batarya modüllerinde tercih edilen geometrik dizilim, soğutma sistemlerinin etkinliği üzerinde doğrudan etkili olup, hücreler arası akış alanını, sıcaklık dağılımını ve yerleşim yoğunluğunu belirlemektedir. Bu kapsamda incelenen dört farklı dizilimden her biri, kendine özgü termal karakteristikler sergilemiştir. Üçgen dizilim, kompakt yapısı sayesinde alan verimliliği sağlamasına karşın, hücreler arasındaki dar boşluklar nedeniyle hava ve sıvı akışının sınırlı kaldığı, bu nedenle de özellikle merkezdeki hücrelerin daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı gözlemlenmiştir. İçbükey dizilim, akışkanın merkez bölgede yoğunlaştığı bir yapı sunarak, kenarlardaki hücrelerin daha etkin soğutulmasına olanak tanımıştır. Ancak bu yapı, merkezi hücrelerde sıcaklık birikimine neden olmuş ve soğutma dengesizliği açısından sınırlayıcı bir etki yaratmıştır. Dışbükey dizilim, hücrelerin dışa doğru kavisli bir hat izlediği ve akışkanın geniş yüzeye homojen biçimde yayılmasına olanak tanıyan bir yapı olarak öne çıkmıştır. Özellikle sıvı soğutmalı

sistemlerde, bu dizilim sayesinde sıcaklık farkları minimum seviyelere indirilebilmiştir. Köşeli dizilim, düzenli modüler yapısı sayesinde hem hava hem de sıvı soğutmalı sistemlerde fan ve akışkan giriş/çıkış konumlandırmasında esneklik sağlamış, bu sayede kontrol edilebilir ve dengeli bir soğutma elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımı yönünden dışbükeye yakın performans sergilemiştir. Yapılan analizlerde, farklı geometrik dizilimlerin sıcaklık farklarını azaltmada ve maksimum sıcaklık seviyelerini kontrol altında tutmada daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ısıyı dışa doğru yayma eğilimi, bu iki dizilimi öne çıkaran temel etkenlerden biri olmuştur.

5.1 Hava Soğutma Sonuçları

Dizilim geometrilerinin termal performans üzerindeki belirleyici etkilerinin ardından, bu yapıların her biri altında uygulanan farklı soğutma yöntemlerinin sistem davranışına katkısı detaylı şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, özellikle düşük maliyetli, yapısal olarak sade ve bakım açısından avantajlı bir yöntem olan hava soğutmalı sistemler ele alınmıştır. Fan destekli zorlanmış konveksiyon prensibine dayanan bu sistemlerde, fan yerleşimi, giriş-çıkış konfigürasyonları, fan hızı ve çıkış fanı kullanımı gibi parametrelerin batarya hücreleri üzerindeki soğutma etkinliğine etkisi araştırılmıştır. Hava soğutmalı senaryolar, farklı dizilimlerle birlikte değerlendirilerek, hücreler arası sıcaklık farkı ve maksimum sıcaklık kontrolü açısından performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Aşağıda, bu sistemlere ilişkin bulgular ve tasarımsal çıkarımlar ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

- Bu çalışmada, elektrikli araç batarya paketlerinin termal yönetiminde zorlanmış hava soğutmanın etkin bir çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yüksek akım değerlerinde (≥ 10 A) ile fan hızı ve giriş-çıkış konfigürasyonlarının optimizasyonu kritik önem taşımaktadır.
- Üçgen dizilime sahip batarya paketinde 10 A akım altında yapılan deneysel ve sayısal analizler yüksek uyum göstermiş, sapma oranları %0,91–%1,41 aralığında bulunmuştur. Bu durum modelin hem doğal hem de zorlanmış taşınım koşullarında güvenilir tahminler yapabildiğini kanıtlamıştır.
- Doğal taşınımında, çift giriş-çıkış konfigürasyonu tek giriş-çıkışa kıyasla daha düşük sıcaklık sağlamış; zorlanmış taşınımında fan hızının artırılması ile maksimum sıcaklık değerleri anlamlı şekilde azalmıştır.

- Üçgen dizilimde elde edilen model doğruluğu, aynı çözüm metodolojisinin içbükey, dışbükey ve köşeli dizilimlerde de güvenilir sonuçlar vereceğini desteklemektedir.
- Farklı dizilimlerde yapılan analizlerde maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliği açısından dışbükey > köşeli > içbükey sıralaması elde edilmiştir.
- Fan konfigürasyonları incelendiğinde, çıkış fanının devreye alınması sıcaklık birikimini azaltmış ve hücreler arası sıcaklık farklarını düşürerek homojenliği artırmıştır. Çıkış fanı kullanımı ile hücreler arası sıcaklık farkı ortalama 3,8 °C'den 1,5 °C'ye düşmüştür. Ancak çıkış fan hızının aşırı yükseltilmesi, içerideki havanın süpürülmesine bağlı olarak paket sıcaklığını anlamlı düzeyde düşürmemiştir.
- 10 A akım altında farklı fan hızlarında (4 m/s, 6 m/s, 8 m/s) yapılan deneylerde, fan hızının artmasıyla sıcaklıklar belirgin şekilde düşmüştür. Düşük fan hızında (4 m/s) dışbükey dizilim 37,4 °C ile en düşük sıcaklığı sağlamış; yüksek fan hızında (8 m/s) ise 28,93 °C ile yine en iyi performansı göstermiştir.
- Çıkış fan hızının etkileri incelendiğinde, dışbükey dizilimde giriş hızı 8 m/s ve çıkış hızı 4 m/s koşullarında 25,40 °C ile en düşük maksimum sıcaklığa ulaşılmış ve bu konfigürasyon optimum çözüm olarak belirlenmiştir.
- Yüksek çıkış fan hızlarının (7 m/s) sıcaklık düşüşü açısından ek bir avantaj sağlamadığı, buna karşın enerji tüketimini artırabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle optimum fan hızı seçiminde hem soğutma performansı hem de enerji verimliliği dikkate alınmalıdır.
- Elde edilen bulgular, batarya paketinde hücre dizilimi ve fan konfigürasyonunun termal performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiş; çalışma, gelecekteki BTMS tasarımlarına yönelik uygulanabilir tasarım kriterleri sunmuştur.

5.2 Isı Borulu Soğutma Sonuçları

Bu çalışmada analiz edilen bir diğer yöntem olan ısı borulu soğutma sistemleri incelenmiştir. Bu yöntemde, batarya hücrelerinden açığa çıkan ısınnın daha serin bölgelere etkin biçimde aktarılması amacıyla ısı boruları kullanılmış ve sistem, fan destekli zorlanmış konveksiyon ile aktif olarak çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Böylece, yalnızca iletim ve buharlaşma/kondensasyon mekanizmalarına dayanan klasik pasif

sistemlerden farklı olarak, hava debisinin kontrolü ile soğutma etkinliği artırılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde, farklı boru sayıları ve hava hızları kullanılarak ısı transfer performansı değerlendirilmiş; maksimum sıcaklık, sıcaklık dağılımı ve hücreler arası sıcaklık farkları açısından sistemin başarımı detaylı şekilde ortaya konmuştur. Fan hızları 5 m/s, 10 m/s ve 20 m/s olarak belirlenmiş; sıcaklık farkları ve hava akış dağılımları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda:

- İçbükey dizilim, tüm boru sayılarında en yüksek soğutma performansını göstermiştir.
- Üç borulu sistemde 20 m/s hızda sıcaklık farkı 1 °C'nin altına düşmüş, izotermal bir ortam sağlanmıştır.
- Üçgen dizilim, içbükey dizilime göre biraz daha düşük performans sergilese de üç borulu yapıda 20 m/s hızda 1.5 °C sıcaklık farkı ile başarılı sonuçlar vermiştir.
- Dışbükey dizilim, tek borulu yapıda iç bölgelerde durgun hava alanları oluşturmaya rağmen, boru sayısı artırıldığında 20 m/s hızda sıcaklık farkı 1.8 °C seviyesine gerilemiştir.
- Köşeli dizilim, tüm senaryolarda en düşük performansa sahip olmuştur. Tek borulu sistemde 5 m/s hızda sıcaklık farkı 9–10 °C, üç borulu sistemde 20 m/s hızda 3 °C seviyelerinde kalmıştır.
- Boru sayısının artırılması, tüm dizilimlerde performansı belirgin şekilde iyileştirmiş; özellikle düşük hızlarda sıcaklık farkını %40'a varan oranlarda azaltmıştır.

Genel olarak, içbükey dizilim + üç borulu yapı kombinasyonu, hem ısı dağılımındaki homojenlik hem de düşük sıcaklık farkı açısından en uygun çözüm olarak öne çıkmıştır. Bu sonuç, yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya paketlerinde termal dengenin korunması ve sistem güvenliğinin artırılması için önemli bir tasarım kriteri olarak değerlendirilebilir.

5.3 Sıvı Soğutma Sonuçları

Bu yöntemde, batarya hücrelerinden açığa çıkan ısıya daha serin bölgelere etkin biçimde aktarılması amacıyla bakırdan imal edilmiş mini kanallı borular kullanılmıştır. Sistem, farklı akışkanların (su ve antifriz) farklı debilerde dolaşımı ile aktif olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, iletim ve taşınım ile birlikte akışkan debisinin

kontrolü sayesinde ısı transfer etkinliği artırılmıştır. Gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizlerde, farklı boru sayıları ve akışkan debileri kullanılarak ısı transfer performansı değerlendirilmiş; maksimum sıcaklık, sıcaklık dağılımı ve hücreler arası sıcaklık farkları açısından sistemin başarımı ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Soğutma akışkanlarının farklı debilerde akış koşulları oluşturularak sıcaklık farkları ve akış dağılımları karşılaştırılmıştır.

- Sıvı soğutma çalışmalarında termal yönetim performansı bakımından dizilimler içbükey > üçgen > dışbükey > köşeli şeklinde sıralanmış, içbükey dizilim özellikle çok kanallı yapılarda akışkanın hücre yüzeylerine homojen dağılmasını sağlayarak en düşük sıcaklık farkını elde etmiştir.
- Antifrizin termofiziksel özellikleri sayesinde ısı transferi daha verimli gerçekleşmiş ve suya kıyasla tüm debi değerlerinde daha düşük maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı sağlamıştır.
- İki akışkan için de debi arttıkça tüm dizilimlerde sıcaklık farkı belirgin şekilde azalmış, en yüksek iyileşme düşük debiden orta debiye geçişte gözlenmiştir. Yüksek debide de iyileşme devam etmiş ancak artış oranı azalmıştır.
- Üçgen dizilime sahip batarya paketinde kompakt yapı sayesinde akışkan hücreler arasında simetrik dağılmış, tek kanallı sistemde düşük debide sıcaklık farkı 5–6 °C iken, üç kanallı sistemde yüksek debide 1–1,5 °C'ye kadar düşmüştür.
- İçbükey dizilime sahip batarya paketinde merkezi girişten kenarlara yönelen akış, tek kanallı sistemde dahi düşük debide sıcaklık farkını 3–4 °C seviyesine, üç kanallı sistemde yüksek debide ise 1,5 °C'nin altına indirmiştir.
- Dışbükey dizilime sahip batarya paketinde dış yüzeylerde iyi soğutma sağlanırken merkez bölgelerde durgun akış alanları oluşmuş, çok kanallı sistemde bu dezavantaj büyük ölçüde giderilmiş ve yüksek debide sıcaklık farkı 1,5–1,8 °C seviyelerine gerilemiştir.
- Köşeli dizilime sahip batarya paketinde iç köşe bölgelerde akış hızı düşük kalmış, tek kanallı sistemde düşük debide sıcaklık farkı 8–10 °C seviyesindeyken üç kanallı sistemde yüksek debide bu değer 2,5–3 °C'ye düşmüştür.
- Kanal sayısının artırılması tüm dizilimlerde sıcaklık farkını azaltmış ve ısı homojenliği iyileştirmiş, en fazla iyileşme tek kanaldan iki kanala geçişte elde edilmiştir.

5.4 Öneriler

- ✓ Batarya hücrelerinin gerçek çalışma koşullarındaki değişken ısı üretimi ve dinamik akım yüklemeleri dikkate alınarak, daha karmaşık ve gerçekçi ısı kaynak modelleri geliştirilebilir.
- ✓ Farklı fan tiplerinin (örneğin santrifüj, kanatlı tip) ve değişken hız kontrol algoritmalarının termal yönetim performansına etkileri incelenebilir. Fanların enerji tüketimi ve soğutma etkinliği açısından karşılaştırılması, optimum kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.
- ✓ Çıkış ve giriş fanlarının enerji tüketimi ile soğutma performansı arasındaki dengeyi sağlayacak çok kriterli optimizasyon yöntemleri (ör. genetik algoritma, çok amaçlı optimizasyon) uygulanabilir.
- ✓ Hava soğutma sistemlerinin, sıvı soğutma ve ısı borulu sistemlerle hibrit kombinasyonları araştırılarak farklı soğutma teknolojilerinin performans ve verimlilik karşılaştırmaları yapılabilir.
- ✓ Yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı adaptif kontrol sistemleri geliştirilerek, gerçek zamanlı sıcaklık izleme ve fan/ısı borusu/pompa performans optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Böylece enerji verimliliği artırılırken, hücre güvenliği de en üst seviyeye çıkarılabilir.
- ✓ Kritik bölgelerde termal homojenliği artırmak amacıyla alternatif ısı yayılım elemanlarının entegrasyonu ve performans etkileri araştırılabilir.
- ✓ Debi kontrolü ve değişken hızlı pompa sistemleri ile enerji tüketimi-soğutma performansı optimizasyonu yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akinlabi, A. A. H., & Solyali, D. (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109815. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109815>
- Akkuş, F., & Işık, M. Z. (2023). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Bataryaların Hava, Sıvı Ve Isı Borulu Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 13(2), 36-54. <https://doi.org/10.55024/buyasambid.1339607>
- Alihosseini, A., & Shafae, M. (2021). Experimental study and numerical simulation of a Lithium-ion battery thermal management system using a heat pipe. *Journal of Energy Storage*, 39, 102616. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102616>
- Alkan, Ö., & Albayrak, Ö. K. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 162, 712-726. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.062>
- Alrwashdeh, S. S. (2022). Energy sources assessment in Jordan. *Results in Engineering*, 13, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100329>
- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2019). A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 187, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.063>
- An, Z., Shah, K., Jia, L., & Ma, Y. (2019). A parametric study for optimization of minichannel based battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 154, 593-601. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.088>
- Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Angin, D. (2005). ASPİR (*Charthamus tinctorius* L.) Tohumu Pres Küspesinin Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Değerlendirilmesi.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Li, Y., Feng, Z., & Li, Y. (2019). Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 3682-3689. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.891>
- Baran, V., Mühlbauer, M. J., Schulz, M., Pfanzt, J., & Senyshyn, A. (2019). In operando studies of rotating prismatic Li-ion batteries using monochromatic wide-angle

- neutron diffraction. *Journal of Energy Storage*, 24, 100772. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100772>
- Buchmann, I. (2011). *Batteries in a portable world: A handbook on rechargeable batteries for non-engineers* (3. ed). Cadex Electronics.
- Bulut, E. (2022). ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN OPTİMUM TASARIMI.
- Cen, J., Li, Z., & Jiang, F. (2018). Experimental investigation on using the electric vehicle air conditioning system for lithium-ion battery thermal management. *Energy for Sustainable Development*, 45, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.005>
- Chen, K., Li, Z., Chen, Y., Long, S., Hou, J., Song, M., & Wang, S. (2017). Design of Parallel Air-Cooled Battery Thermal Management System through Numerical Study. *Energies*, 10(10), 1677. <https://doi.org/10.3390/en10101677>
- Choudhari, V. G., Dhoble, D. A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 32, 101729. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729>
- Conte, F. V. (2006). Battery and battery management for hybrid electric vehicles: A review. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 123(10), 424-431. <https://doi.org/10.1007/s00502-006-0383-6>
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (Ninth edition). McGraw-Hill Education.
- Emadi, M. E., Yimin Gao, ., Sebastien E. Gay, ., Ali. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Third Edition* (1. Baskı). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>
- Etacheri, V., Marom, R., Elazari, R., Salitra, G., & Aurbach, D. (2011). Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: A review. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3243. <https://doi.org/10.1039/c1ee01598b>
- Fan, L., Khodadadi, J. M., & Pesaran, A. A. (2013). A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.050>
- Farret, F. A., & Simões, M. G. (2005). *Integration of Alternative Sources of Energy*. Front Matter. (2021). *İçinde Uncertainties in Modern Power Systems* (s. iii). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820491-7.01001-X>
- Giuliano, M. R., Prasad, A. K., & Advani, S. G. (2012). Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium–titanate batteries. *Journal of Power Sources*, 216, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.074>

- Hai, T., Abidi, A., Abed, A. M., Zhou, J., Malekshah, E. H., & Aybar, H. Ş. (2022). Three-dimensional numerical study of the effect of an air-cooled system on thermal management of a cylindrical lithium-ion battery pack with two different arrangements of battery cells. *Journal of Power Sources*, 550, 232117. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232117>
- Han, X., Ouyang, M., Lu, L., & Li, J. (2014). A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*, 268, 658-669. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.111>
- Herzog, A. V., Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2001). RENEWABLE ENERGY SOURCES.
- Huang, Y., Lu, Y., Huang, R., Chen, J., Chen, F., Liu, Z., Yu, X., & Roskilly, A. P. (2017). Study on the thermal interaction and heat dissipation of cylindrical Lithium-Ion Battery cells. *Energy Procedia*, 142, 4029-4036. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.321>
- Huang, Y., Mei, P., Lu, Y., Huang, R., Yu, X., Chen, Z., & Roskilly, A. P. (2019). A novel approach for Lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113623. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.033>
- Jahanbakhshi, A., Nadooshan, A. A., & Bayareh, M. (2022). Cooling of a lithium-ion battery using microchannel heatsink with wavy microtubes in the presence of nanofluid. *Journal of Energy Storage*, 49, 104128. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104128>
- Jang, D. S., Yun, S., Hong, S. H., Cho, W., & Kim, Y. (2022). Performance characteristics of a novel heat pipe-assisted liquid cooling system for the thermal management of lithium-ion batteries. *Energy Conversion and Management*, 251, 115001. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115001>
- Jones, N. (2024). The new car batteries that could power the electric vehicle revolution. *Nature*, 626(7998), 248-251. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00325-z>
- Kalkan, O. (2021). Elektrikli Araç Bataryalarının Farklı Metodlarla Soğutulmasının Deneysel ve Sayısal Analizi.
- Karatepe, Y., Neşe, S. V., Keçebaş, A., & Yumurtacı, M. (2012). The levels of awareness about the renewable energy sources of university students in Turkey. *Renewable Energy*, 44, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.099>
- Kartal, M. T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.022>
- Kim, K. M., Kim, S. H., Lim, S. T., Kim, T., Jerng, D.-W., & Ahn, H. S. (2023). Geometrical effect of natural convection in an air channel with a cavity at the

- turning section on thermal behavior and heat removal performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 203, 123792. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123792>
- Koyama, R., Arai, Y., Yamauchi, Y., Takeya, S., Endo, F., Hotta, A., & Ohmura, R. (2019). Thermophysical properties of trimethylolethane (TME) hydrate as phase change material for cooling lithium-ion battery in electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 427, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.055>
- Kshetrimayum, K. S., Yoon, Y.-G., Gye, H.-R., & Lee, C.-J. (2019). Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113797. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113797>
- Lahnaoui, A., Wulf, C., Heinrichs, H., & Dalmazzone, D. (2018). Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. *Applied Energy*, 223, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.099>
- Li, W., Chen, S., Peng, X., Xiao, M., Gao, L., Garg, A., & Bao, N. (2019). A Comprehensive Approach for the Clustering of Similar-Performance Cells for the Design of a Lithium-Ion Battery Module for Electric Vehicles. *Engineering*, 5(4), 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.005>
- Li, X., Wang, Z., & Zhang, L. (2019). Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy*, 174, 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.147>
- Li, Y., Chen, M., Bai, F., Song, W., & Feng, Z. (2019). Thermal equilibrium characteristic of large-size lithium-ion pouch battery: Resting time between charge and discharge. *Energy Procedia*, 158, 2623-2630. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.013>
- Li, Z., Huang, J., Yann Liaw, B., Metzler, V., & Zhang, J. (2014). A review of lithium deposition in lithium-ion and lithium metal secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 254, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.099>
- Ling, Z., Zhang, Z., Shi, G., Fang, X., Wang, L., Gao, X., Fang, Y., Xu, T., Wang, S., & Liu, X. (2014). Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 427-438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.017>
- Lisbona, D., & Snee, T. (2011). A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.06.022>
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>

- Liu, J., Yadav, S., Salman, M., Chavan, S., & Kim, S. C. (2024). Review of thermal coupled battery models and parameter identification for lithium-ion battery heat generation in EV battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 218, 124748. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124748>
- Liu, S., Zhang, T., Zhang, C., Yuan, L., Xu, Z., & Jin, L. (2023). Non-uniform heat generation model of pouch lithium-ion battery based on regional heat generation rate. *Journal of Energy Storage*, 63, 107074. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107074>
- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822-827. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.016>
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A., Mathew, M., & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472-481. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029>
- Mastali, M., Foreman, E., Modjtahedi, A., Samadani, E., Amirfazli, A., Farhad, S., Fraser, R. A., & Fowler, M. (2018). Electrochemical-thermal modeling and experimental validation of commercial graphite/LiFePO₄ pouch lithium-ion batteries. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.03.004>
- Michaelides, E. E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2>
- Mohammed, A. H., Esmaeeli, R., Aliniagerdroudbari, H., Alhadri, M., Hashemi, S. R., Nadkarni, G., & Farhad, S. (2019). Dual-purpose cooling plate for thermal management of prismatic lithium-ion batteries during normal operation and thermal runaway. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114106>
- Na, X., Kang, H., Wang, T., & Wang, Y. (2018). Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 143, 257-262. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.080>
- Natkunarah, N., Scharf, M., & Scharf, P. (2015). Scenarios for the Return of Lithium-ion Batteries out of Electric Cars for Recycling. *Procedia CIRP*, 29, 740-745. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.170>
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2016). Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.12.004>

- Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 122, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.010>
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377-382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)
- Rao, Z., Huo, Y., & Liu, X. (2014). Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.03.017>
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>
- Ren, R., Zhao, Y., Diao, Y., & Liang, L. (2023). Experimental study on the bottom liquid cooling thermal management system for lithium-ion battery based on multichannel flat tube. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119636. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119636>
- Ren, R., Zhao, Y., Diao, Y., Liang, L., & Jing, H. (2021). Active air cooling thermal management system based on U-shaped micro heat pipe array for lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 507, 230314. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230314>
- Saçlı, A. (2025). Sürdürülebilir Gelecekte Yenilenebilir Enerjinin Rolü.
- Singh, L. K., Mishra, G., Sharma, A. K., & Gupta, A. K. (2021). A numerical study on thermal management of a lithium-ion battery module via forced-convective air cooling. *International Journal of Refrigeration*, 131, 218-234. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.031>
- Smith, J., Singh, R., Hinterberger, M., & Mochizuki, M. (2018). Battery thermal management system for electric vehicle using heat pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, 134, 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.022>
- Statistical Review of World Energy 2022. (2022).
- Sun, J., Li, J., Zhou, T., Yang, K., Wei, S., Tang, N., Dang, N., Li, H., Qiu, X., & Chen, L. (2016). Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. *Nano Energy*, 27, 313-319. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031>
- Şenel, M. C. (t.y.). DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE RÜZGÂR ENERJİSİ DURUMU- GENEL DEĞERLENDİRME.
- Tan, X., Lyu, P., Fan, Y., Rao, J., & Ouyang, K. (2021). Numerical investigation of the direct liquid cooling of a fast-charging lithium-ion battery pack in

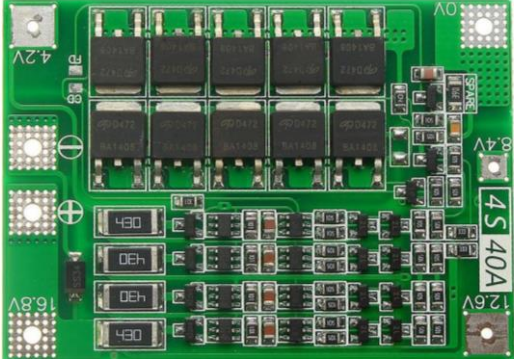
- hydrofluoroether. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117279. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117279>
- Tete, P. R., Gupta, M. M., & Joshi, S. S. (2022). Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct. *Journal of Energy Storage*, 48, 104041. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104041>
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J.-Y., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>
- Tran, N. T., Farrell, T., Vilathgamuwa, M., Choi, S. S., & Li, Y. (2019). A Computationally Efficient Coupled Electrochemical-Thermal Model for Large Format Cylindrical Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(13), A3059-A3071. <https://doi.org/10.1149/2.1241913jes>
- Tran, T.-H., Harmand, S., & Sahut, B. (2014). Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 265, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.130>
- Wang, F., Meng, Q., Zhao, J., Wang, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2024). The Turbulent Schmidt Number for Transient Contaminant Dispersion in a Large Ventilated Room Using a Realizable k- ϵ Model. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 20(4), 829-846. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.026917>
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- Wei, Y., & Agelin-Chaab, M. (2019). Development and experimental analysis of a hybrid cooling concept for electric vehicle battery packs. *Journal of Energy Storage*, 25, 100906. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100906>
- Wu, C., Wu, L., Qiu, C., Yang, J., Yuan, X., Cai, Y., & Shi, H. (2023). Experimental and numerical studies on lithium-ion battery heat generation behaviors. *Energy Reports*, 9, 5064-5074. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.021>
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- Wu, W., Wu, W., & Wang, S. (2018). Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 967-977. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.062>

- Xie, Y., He, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., Liu, B., & Sun, Y. (2020). An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114455. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114455>
- Xu, J., Chen, Z., Qin, J., & Minqiang, P. (2022). A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs. *Applied Thermal Engineering*, 203, 117871. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117871>
- Xu, J., Lan, C., Qiao, Y., & Ma, Y. (2017). Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Applied Thermal Engineering*, 110, 883-890. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.151>
- Xu, X., Li, W., Xu, B., & Qin, J. (2019). Numerical study on a water cooling system for prismatic LiFePO₄ batteries at abused operating conditions. *Applied Energy*, 250, 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.180>
- Xu, X., Zhang, H., Cao, L., Yi, Z., Li, P., & Guo, H. (2022). Heat generation and surrogate model for large-capacity nickel-rich prismatic lithium-ion battery as against 18650 battery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 77, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104783>
- Yalçinkaya, O., Durmaz, U., Tepe, A. Ü., Uysal, Ü., & Özel, M. B. (2022). Effect of slot-shaped pins on heat transfer performance in the extended jet impingement cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107698. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107698>
- Yang, J., Zhang, H., Xu, Y., & Li, P. (2023). Analysis of heat generation in lithium-ion battery components and voltage rebound based on electrochemical and thermal coupled model. *Journal of Energy Storage*, 72, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108554>
- Yang, W., Zhou, F., Chen, X., Li, K., & Shen, J. (2023). Thermal performance of honeycomb-type cylindrical lithium-ion battery pack with air distribution plate and bionic heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119299. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119299>
- Yang, X.-H., Tan, S.-C., & Liu, J. (2016). Thermal management of Li-ion battery with liquid metal. *Energy Conversion and Management*, 117, 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.054>
- Ye, B., Rubel, M., & Li, H. (2019). Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle. *Applied Sciences*, 9(4), 754. <https://doi.org/10.3390/app9040754>
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., & Tay, A. A. O. (2015). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering*, 86, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.066>

- Ye, Y., Shi, Y., Saw, L. H., & Tay, A. A. O. (2016). Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal management system for fast charging lithium ion battery packs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.052>
- Yu, Q., Abidi, A., Mahmoud, M. Z., Hasani Malekshah, E., & Aybar, H. Ş. (2022). Numerical evaluation of the effect of air inlet and outlet cross-sections of a lithium-ion battery pack in an air-cooled thermal management system. *Journal of Power Sources*, 549, 232067. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232067>
- Zhang, F., Wang, P., & Yi, M. (2021). Design optimization of forced air-cooled lithium-ion battery module based on multi-vents. *Journal of Energy Storage*, 40, 102781. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102781>
- Zhang, Q., Cao, G., & Zhang, X. (2023). Study of wet cooling flat heat pipe for battery thermal management application. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119407. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119407>
- Zhang, W., Qiu, J., Yin, X., & Wang, D. (2020). A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114571>
- Zhang, Y., Wang, H., Li, W., & Li, C. (2019). Quantitative identification of emissions from abused prismatic Ni-rich lithium-ion batteries. *eTransportation*, 2, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100031>
- Zhang, Z., Wang, J., Feng, X., Chang, L., Chen, Y., & Wang, X. (2018). The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 443-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.005>
- Zhou, Z., Lv, Y., Qu, J., Sun, Q., & Grachev, D. (2021). Performance evaluation of hybrid oscillating heat pipe with carbon nanotube nanofluids for electric vehicle battery cooling. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117300. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117300>
- Zhu, W. H., Zhu, Y., & Tatarchuk, B. J. (2014). Self-discharge characteristics and performance degradation of Ni-MH batteries for storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(34), 19789-19798. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.113>

EKLER

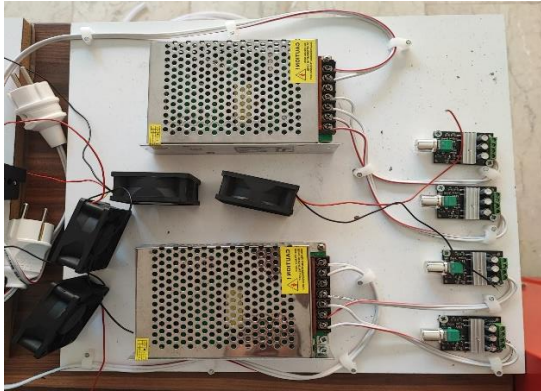
EK-1 Batarya paketinin oluşturulmasında kullanılan malzeme ve ekipmanlar.

Malzeme/Ekipman Görseli	zellikleri
	Power-Xtra 3.7V Li-ion 18650 3500 Mah Lityum İyon şarjlı Pil
	Punta Kaynak Makinesi ve Nikel şerit
	Akım Koruma Kartı
	Elektriksel Bağlantı Kablosu ve Lehim Makinesi

EK-2 Deneylerde kullanılan ortak malzeme ve ekipmanlar.

Malzeme/Ekipman Görseli	Özellikleri
	Akım-Voltaj Gösterge Cihazı
	Çok İşlevli Doğru Akım Elektronik Deşarj Cihazı 200V 40A DLB-1200W
	Batarya Şarj Cihazı Einhell CE-BC 10M Akıllı Dijital Akü Şarj Cihazı 3-200 Ah 12 Volt 10 Amper
	Sıcaklık Ölçer (Datalogger) Sıcaklık ölçüm aralığı -200°C ila +1000°C

EK-3 Hava soğutma deneysel çalışmalarında kullanılan malzeme ve ekipmanlar.

Malzeme/Ekipman Görseli	Özellikleri								
	Hava Soğutma Deneyleri Kullanılan Kare Tip Fanlar <table> <tr> <td>Küçük Fan</td><td>Büyük Fan</td></tr> <tr> <td>60 x 60 x 25 mm</td><td>80 x 80 x 25 mm</td></tr> <tr> <td>12V-DC 0,21A</td><td>12V-DC-0.40A</td></tr> <tr> <td>2,6 Wh</td><td>4,8 Wh</td></tr> </table>	Küçük Fan	Büyük Fan	60 x 60 x 25 mm	80 x 80 x 25 mm	12V-DC 0,21A	12V-DC-0.40A	2,6 Wh	4,8 Wh
Küçük Fan	Büyük Fan								
60 x 60 x 25 mm	80 x 80 x 25 mm								
12V-DC 0,21A	12V-DC-0.40A								
2,6 Wh	4,8 Wh								
	Hava Soğutma Deneyleri Kullanılan Salyangoz Tipi Fan 230 V- AC 170 m3/h 44 Wh								
	Uni-T UT363S Dijital Anemometre (m/s, km/s, ft/dak) Hava hızı ölçüm aralığı: 0,4 ila 30 m/s Ölçüm sapması: $\pm\%$ 5 Örnekleme frekansı: 0.5 s Hava sıcaklığı ölçümü: -10 °C ile 50 °C, 14 °F ile 122 °F								
	Dimmer Devreli Dönüştürücülü Fan Bağlantıları								

EK-4 Isı borulu deneysel çalışmalarında kullanılan malzeme ve ekipmanlar.

Malzeme/Ekipman Görseli	Özellikleri
	Bakır Borular İç çap: 2 mm Dış çap: 3 mm
	Bakır Boru Kesme Cihazı Marka: İzeltaş Ölçü: 1/4"-7/8" Ağırlık: 125 gr
	Setkom SET20/100-2M (100 L, monofaze) Kompresör Çalışma basıncı: 9 bar (130 PSI) Hava üretimi (debi): 262 litre/dk Tank kapasitesi: 100 litre Elektrik motor gücü: 1,5 kW Voltaj: 220-230 V, tek faz (monofaze) Devir hızı (RPM): 1272 devir/dakika Silindir sayısı: 2 adet Ağırlık: yaklaşık 69 kg Boyutlar: 1150 × 510 × 940 mm
	Boru İçine Hava Geçişini Sağlamak İçin Kullanılan Metal İğne

EK-5 Sıvı soğutma deneysel çalışmalarıda kullanılan malzeme ve ekipmanlar.

Malzeme/Ekipman Görseli	Özellikleri
	12 Volt Mini Pompa Gerilim (Volt): 12V DC Max. Akım (Amper): 2.2 A Güç: 26,4Wh
	Dimmer Devreli Dönüştürücülü Pompa Bağlantıları
	Mini Pompa Bakır Boru Bağlantı Elemanları Y Hortum Konnektör Hortum Redüksiyon