



# Forced convection air cooling of cylindrical lithium-ion batteries used in electric vehicles: The effect of airflow configurations on aerothermal performance

Ferhat Akkuş\*<sup>ID</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering-Architecture, Batman University, 72100, Batman, Türkiye

## Highlights:

- Experimental investigation of the aerothermal behavior of an air-cooled lithium-ion battery module
- Determination of actual cooling performance using heff and Nu<sub>eff</sub>
- The decisive effect of airflow configuration on thermal performance, independent of flow velocity

## Keywords:

- Electric vehicles
- Lithium-ion batteries
- Battery thermal management systems
- Air-cooling
- Thermal performance

## Article Info:

Research Article

Received: 23.12.2025

Accepted: 21.02.2026

## DOI:

10.17341/gazimmfd.1848036

## Correspondence:

Author: Ferhat Akkuş

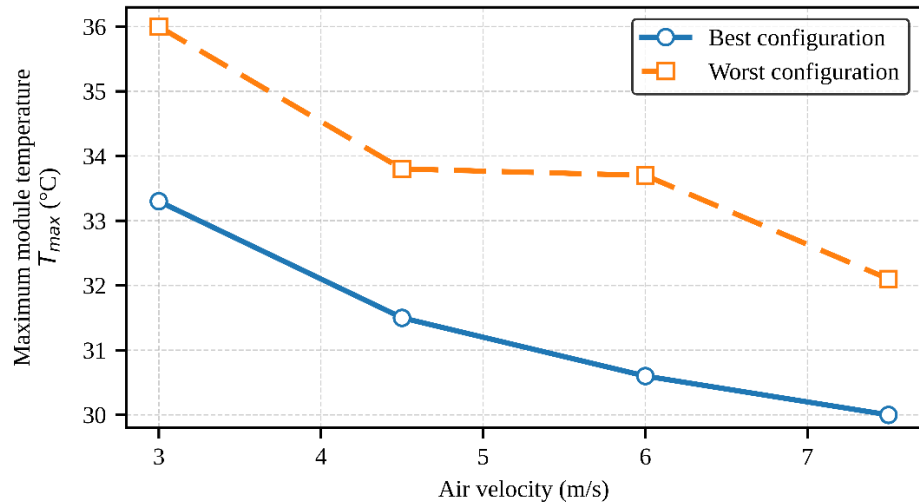
e-mail:

ferhat.akkus@batman.edu.tr

phone: +90 553 879 2884

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, the thermal behavior of a lithium-ion battery module configured as 4S3P, consisting of 12 cylindrical cells of the 18650 type, was experimentally investigated under forced convection air cooling conditions. The maximum temperature changes of the battery module were compared under different air flow rates and inlet-outlet configurations. Figure A represents a graphical summary of this study, comprehensively presenting the effect of air flow rate and configuration on the maximum temperature in an air-cooled lithium-ion battery module. The graphical summary shows that increasing the airflow velocity reduces the maximum battery temperature; however, cooling gains become limited at high velocities, and airflow regulation plays a decisive role in thermal performance.



**Figure A.** Effect of airflow velocity on the maximum temperature of the air-cooled lithium-ion battery module for the best and worst configurations

**Purpose:** The objective of this study is to investigate the thermal behavior of an 18650 cylindrical lithium-ion battery module with a 4S3P configuration under forced convection air cooling conditions and to reveal the effects of different airflow configurations and fan speeds on cooling performance.

**Theory and Methods:** Within the scope of this study, a battery cooling system was designed and manufactured within an adiabatic conditioning unit. The battery module was tested under constant discharge current conditions with different air inlet-outlet configurations and fan speeds. Cell surface temperatures were measured over time, and the data obtained were evaluated within the framework of forced convection and fundamental heat transfer principles.

**Results:** Forced air cooling has been shown to reduce the maximum temperature of the battery module and improve temperature distribution. Significant reductions in maximum cell temperature and inter-cell temperature differences have been achieved with appropriate airflow configurations and fan speeds.

**Conclusion:** Air-cooled battery thermal management systems demonstrate that airflow regulation and fan speed are decisive factors in cooling performance. The findings contribute to the design process for maintaining electric vehicle battery modules within their safe operating temperature range.



## Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik tip lityum-iyon bataryaların zorlanmış konveksiyonlu hava soğutması: Hava akış konfigürasyonlarının aero-termal performansa etkisi

Ferhat Akkuş\*<sup>ID</sup>

Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Hava soğutmalı bir lityum iyon batarya modülünün aerothermal davranışının deneysel olarak incelenmesi
- Gerçek soğutma performansının etkin ve Nüetkin ile belirlenmesi
- Hava akış konfigürasyonunun, akış hızından bağımsız olarak termal performansı üzerindeki belirleyici etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.12.2025

Kabul: 21.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1848036

### Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araçlar,  
lityum iyon bataryalar,  
batarya termal yönetim  
sistemleri,  
hava soğutma,  
termal performans

### ÖZ

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi, batarya termal yönetim sistemlerinin (BTMS) etkinliğine bağlıdır. Özellikle hava soğutmalı BTMS'lerde soğutma performansı; hava akış hızı/debisi, giriş-çıkış konfigürasyonu ve modül içi akış dağılımı gibi aero-termal parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu çalışmada, silindirik tip lityum-iyon batarya hücrelerinden bir batarya modülü oluşturularak zorlanmış hava soğutma koşulları altındaki termal performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, çeşitli giriş-çıkış konfigürasyonları ve farklı hava akış hızları (3–7,5 m/s) altında gerçekleştirilmiştir. Batarya modülünde üretilen ısı, sabit deşarj akımı altında belirlenmiş ve kararlı rejimde ölçülen hücre yüzey sıcaklıkları kullanılarak etkin ısı transfer katsayısı ( $h_{etkin}$ ) hesaplanmıştır. Elde edilen  $h_{etkin}$  değerleri aracılığıyla batarya modülünün konvektif ısı transfer davranışını temsil eden etkin Nusselt sayısı ( $Nu_{etkin}$ ) hesaplanmıştır. Sonuçlar, hava akış hızının artmasıyla birlikte ısı transfer performansının genel olarak iyileştiğini göstermiştir. Bununla birlikte, hava akış konfigürasyonunun termal performans üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Özellikle çoklu giriş-çıkış ve karşılıklı akış düzenine sahip konfigürasyonlarda, daha homojen akış dağılımı sağlanması sayesinde daha yüksek  $h_{etkin}$  ve  $Nu_{etkin}$  değerleri elde edilmiştir. Buna karşılık, tek yönlü akış konfigürasyonlarında yerel akış düzensizliklerinden kaynaklı olarak performansın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, batarya termal yönetim sistemlerinin tasarımında akış konfigürasyonunun önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

## Forced convection air cooling of cylindrical lithium-ion batteries used in electric vehicles: The effect of airflow configurations on aerothermal performance

### HIGHLIGHTS

- Experimental investigation of the aerothermal behavior of an air-cooled lithium-ion battery module
- Determination of actual cooling performance using  $h_{eff}$  and  $Nu_{eff}$
- The decisive effect of airflow configuration on thermal performance, independent of flow velocity

### Article Info

Research Article

Received: 23.12.2025

Accepted: 21.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1848036

### Keywords:

Electric vehicles,  
lithium-ion batteries,  
battery thermal management  
systems, air cooling,  
thermal performance

### ABSTRACT

The safe, efficient, and long-lasting operation of lithium-ion batteries used in electric vehicles depends on the effectiveness of battery thermal management systems (BTMS). In particular, the cooling performance of air-cooled BMSs is significantly influenced by aero-thermal parameters such as airflow velocity/flow rate, inlet-outlet configuration, and internal flow distribution within the module. In this study, a battery module was constructed using cylindrical lithium-ion battery cells, and its thermal performance under forced air cooling conditions was experimentally investigated. The experiments were conducted under various inlet-outlet configurations and different airflow velocities (3–7.5 m/s). The heat generated in the battery module was determined under a constant discharge current, and the effective heat transfer coefficient ( $h_{effective}$ ) was calculated using cell surface temperatures measured in steady-state conditions. The effective Nusselt number ( $Nu_{effective}$ ), which represents the convective heat transfer behavior of the battery module, was calculated using the obtained  $h_{etkin}$  values. The results showed that heat transfer performance generally improved as the airflow velocity increased. However, it was determined that the effect of the airflow configuration on thermal performance is more pronounced. In particular, configurations with multiple inlet-outlet and counter-flow arrangements yielded higher  $h_{etkin}$  and  $Nu_{etkin}$  values due to a more homogeneous flow distribution. In contrast, it was observed that performance remained limited in unidirectional flow configurations due to local flow irregularities. The findings indicate that flow configuration is a critical parameter in the design of battery thermal management systems.

## 1. Giriş (Introduction)

Nüfusun artması, sanayileşme ve ulaşım sektörünün hızla büyümesiyle birlikte küresel ölçekte enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Bu talebin karşılanmasında kömür, doğalgaz ve petrol türevi fosil kökenli yakıtların kısıtlı rezervlerinin çevreye verdikleri olumsuz etkilerin artması toplumları sürdürülebilir enerji politikalarına yönelmek zorunda bırakmıştır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimde; enerji güvenliği, iklim değişikliği ile mücadele ve karbon salınımının azaltılması oldukça önemlidir. Bu yönelimin en çok hissedildiği alanlardan biri olan ulaşım sektöründe, içten yanmalı geleneksel motorlu araçların çevreye verdikleri zararlar ve karbon emisyonları; çevre dostu ve sürdürülebilir kaynakların kullanıldığı elektrikli araçlara yönelime neden olmaktadır [1-4]

Yüksek enerji verimliliği, düşük karbon emisyonları ve sürdürülebilir ulaşım potansiyeli açısından modern ulaşım teknolojilerinin merkezinde yer alan elektrikli araçlar, çalışma prensiplerine göre tam elektrikli (BEV), hibrit elektrikli (HEV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Tam elektrikli araçlar sadece elektrik motoru bulundurmaları sebebiyle enerji tamamen bataryalarda depolanmakta ve araç sıfır emisyonla çalışmaktadır. Hibrit elektrikli araçlarda içten yanmalı motor ve elektrik motorunu birlikte kullanılmakta ve frenleme enerjisini geri kazanmaktadır. Bu sayede hem yakıt tüketimi hem de karbon emisyonları azaltılmaktadır. Fişli hibrit elektrikli araçlar ise hem içten yanmalı motor hem de harici olarak şarj edilebilen bir elektrik motoru bulundurmaktadır. Bu sayede esnek kullanım ve daha geniş bir menzile sahiptir. Bu sınıflandırmayla birlikte elektrikli araç teknolojilerinin çeşitliliği ortaya koyulmakta ve ulaşım sektöründe fosil yakıtlara olan bağlılığın azaltılması açısından oldukça önemlidir [5-8].

Elektrikli araç teknolojisinde enerjinin depolanması ve kullanılmasında en önemli bileşeni bataryalar oluşturmaktadır. Bu bataryalar içerisinde yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, düşük kendi kendine deşarj oranı ve hafıza etkisi olmaması gibi avantajları bulunan lityum iyon bataryalar (LiB) elektrikli araç teknolojisinde ön plana çıkmaktadır [9, 10].

LiB kese, prizmatik ve silindirik olmak üzere üç farklı tipteki tasarımlarla üretilmektedir. Kese tip hücrelerin elektrik direnci düşük, yapısının hafif ve güvenlik bakımından kullanımı avantajlı olmasına rağmen yüksek akım şartlarında batarya merkezi ve yüzeyi arasında meydana gelen sıcaklık farkları kullanımını zorlaştırmaktadır. Prizmatik tip hücreler geniş elektrot kullanım aralığı sayesinde yüksek kapasite ihtiyacı olan uygulamalarda sıklıkla tercih edilmekte ve termal yönetim açısından geniş soğutma yüzeyi gibi avantajlara sahiptir. Silindirik tip hücreler ise kompakt tasarım, yüksek enerji ve güç yoğunluklarına sahip olmaları sayesinde mekanik dayanıklılık gerektiren sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [11-13].

LiB anot, katot, ayırıcı ve elektrolit olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Katot  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  gibi lityum metal oksitlerden, anot ise grafitten yapılmaktadır. Anot ve katot arasında yer alarak kısa devreyi önleyen ayırıcı iyonların hareketini sağlamaktadır. Lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareketini sağlayan elektrolitler ise bataryanın enerji depolama ve iletim süreçlerinde yer almaktadır [14, 15]. LiB elektrotlar arasındaki lityum iyonunun hareketi ile harici devrede gerçekleşen elektron akışına dayanan bir çalışma prensibine sahiptir. Bu süreçte, şarj/deşarj döngüsünde indirgeme-oksidasyon (redoks) reaksiyonları oluşmaktadır. Şarj işleminde katotta oksidasyon meydana gelir ve elektronlar katottan ayrılarak harici devre üzerinden anoda yönlendirilir. Eş zamanlı olarak katotta oluşan lityum iyonları,

elektrolit ve ayırıcı aracılığıyla anoda doğru hareket eder. Çok sayıda mikro gözenek içeren anot lityum iyonlarının depolanmasını sağlar. Lityum iyonlarının anotta toplanması, bataryanın kimyasal olarak enerji depolanması anlamına gelir. Deşarj işleminde ise bu mekanizmanın tersi gerçekleşmektedir [16-18].

LiB şarj/deşarj hızını belirleyen C oranı, batarya sıcaklığını etkileyen bir parametredir. Elektrikli araçlardaki ani hızlanma, rejeneratif frenleme ve iklimlendirme gibi yüksek güç gerektiren durumlarda batarya yükünün artması C oranının yükselmesine neden olmaktadır. Bu yükseliş bataryanın performansını, ömrünü ve güvenliğini etkilemekte olup bataryanın sıcaklığını artırmaktadır. Sıcaklığın aşırı yükselmesi bataryalarda termal yönetim sistemi tasarımı gerektirmektedir. LiB  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  ile  $50\text{ }^\circ\text{C}$  arasında çalışabilse de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ile  $40\text{ }^\circ\text{C}$  aralığı optimum çalışma sıcaklık aralığıdır. Batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkının  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ' den fazla olmaması gerekmektedir. Ayrıca, çevresel sıcaklıklar da batarya performansını doğrudan etkileyerek verimliliğini ve güvenliğini belirler. Optimum çalışma sıcaklığı aralığının dışında kalan LiB' in termal performansı olumsuz etkilenmekte olup aşırı yüksek ve düşük sıcaklıklar güvenlik risklerini artırabilir. Örneğin çalışma sıcaklığının  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ' den  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye düşmesi, bataryanın deşarj kapasitesinde belirgin bir düşüşe neden olmakta olup artan C oranları ve düşük çevre sıcaklığını batarya performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu sebeple LiB optimum koşullarda çalışması hem C oranı kontrolü hem de efektif bir termal yönetim sistemi ile sağlanabilir [19-21].

Optimum çalışma sıcaklığı aralığında çalışan bir bataryanın sıcaklığının ani ve kontrolsüz olarak artması ve üretilen ısıнын vaktinde uzaklaştırılamaması termal kaçaklara neden olmaktadır. Termal kaçaklar genellikle hücre düzeyinde başlayan iç kısa devre, aşırı şarj/deşarj, mekanik hasar, üretim kusurları veya ayırıcı erimesi gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır. Hücre içinde bulunan katı elektrolit ara fazı (SEI) tabakasının bozulması, elektrolit ayrışması ve katot/ana madde reaksiyonları gibi ekzotermik kimyasal tepkimeler bataryaların ısı üretmesine neden olmaktadır. Bu üretilen ısıнын hızlıca uzaklaştırılamaması durumunda hücre sıcaklığı ve basıncı artar. İletim, taşınım ve ışıınım gibi ısı transferi mekanizmaları yoluyla hücrelerden komşu hücrelere ve modül seviyesinde ısı transferi gerçekleşerek zincirleme termal kaçak oluşmaktadır. Termal kaçaklar; zararlı gaz salınımı, duman, yangın ve patlama gibi oldukça ciddi güvenlik problemlerine neden olabilmektedir. Bu problemlerin önlenmesi ve bataryaların güvenli şekilde çalışması amacıyla Batarya Termal Yönetim Sistemler (BTMS –Battery Thermal Management Systems) oldukça önemlidir. LiB aşırı ısınmasını önlemek, hücreler arası sıcaklık farkını en aza indirmek ve termal kaçak riskini azaltmak amacıyla sıcaklıkların kontrol altında tutularak optimum çalışma sıcaklığı aralığında kalması için BTMS tasarlanmaktadır. Bu sistemler, aktif ve pasif yöntemler, ısıtma mekanizmaları ve termal izolasyon teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Bu nedenle BTMS, elektrikli araçlarda güvenlik ve performans açısından zorunlu bir tasarım bileşeni olarak görülmektedir [22, 23].

LiB güvenli, yüksek performanslı ve uzun çevrim ömründe çalışabilmesi BTMS teknikleri kullanılarak optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutulmasına direkt olarak bağlıdır. BTMS, pasif, aktif ve hibrit yöntemler kullanılmakta olup her bir yöntemin maliyet, performans ve yapısal karmaşıklık bakımından çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Pasif BTMS faz değişim malzemeleri, doğal taşınım temelli hava soğutma veya yüksek performanslı çalışabilen yapısal sistemler kullanılarak bataryaların optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutulması sağlanır. Pasif BTMS düşük maliyet ve tasarım basitliğine sahip olsa da yüksek ısı üretiminin görüldüğü uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Aktif BTMS zorlanmış taşınım temelli hava soğutma, sıvı soğutma veya ısıtma

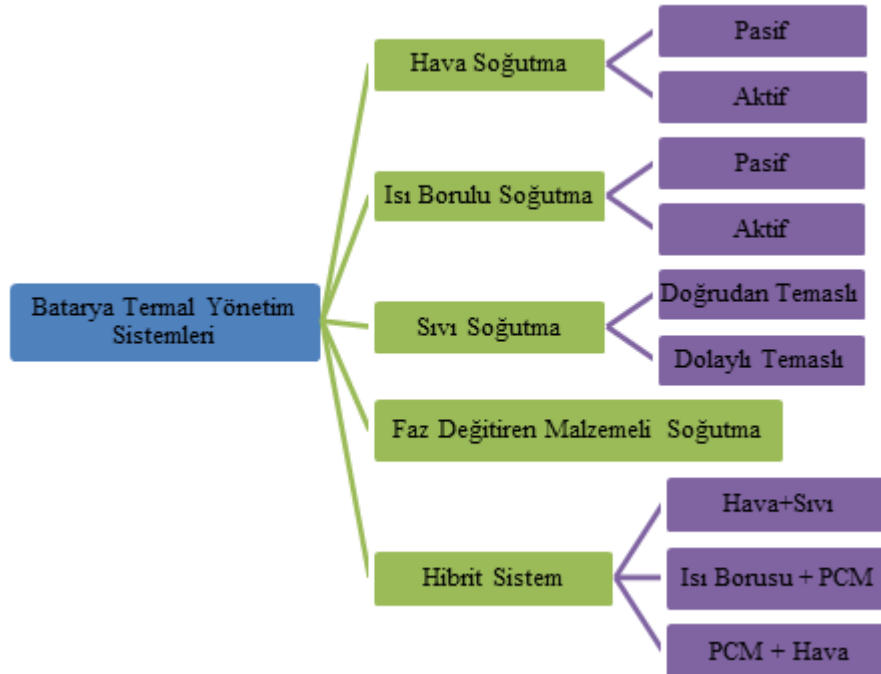
mekanizmaları gibi harici enerji kaynağı ve bileşenleri kullanılarak sıcaklık kontrol altına alınır. Pasif sistemlere göre daha etkili termal yönetim sunmasına rağmen maliyet, enerji tüketimi ve tasarım karmaşıklığı gibi dezavantajları bulunmaktadır [24]. Hibrit BTMS ise pasif-aktif, pasif-pasif veya aktif-aktif yöntemlerin bir arada kullanılarak enerji verimliliği ve yüksek performans sağlayabilmektedir. Örneğin, hava soğutma ve sıvı soğutmanın veya faz değiştiren malzeme ile sıvı soğutmanın birlikte kullanılması batarya sıcaklığının daha homojen ve kararlı bir şekilde kontrol edilmesini sağlayabilir [25]

BTMS kapsamında kullanılan soğutma yöntemleri hava soğutma, ısı borulu soğutma, faz değiştiren malzemeli soğutma ve sıvı soğutma yöntemleri (Şekil 1) kullanılmaktadır. Hava soğutma yöntemleri; tasarımı basit, maliyeti düşük, hafif ve bakım kolaylığı avantajlarına sahip olup BTMS oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal taşınım pasif BTMS’ de kullanılırken, fan, kompresör gibi destekli zorlanmış taşınım aktif BTMS’ de kullanılmaktadır. Hızlı şarj/deşarj veya yüksek güç isteyen durumlarda hava soğutma yetersiz kalabilmektedir [26, 27]. Isı borulu soğutma yöntemlerinde yüksek termal iletkenlik ve düşük ağırlığa sahip ısı borularının kullanımıyla üretilen ısınnın hızlı ve eşit dağıtılması amaçlanmaktadır. Tek başına ya da diğer soğutma yöntemleri ile birlikte hibrit olarak kullanılabilen ısı boruları yüksek verimlilik ve tasarım esnekliği sayesinde bataryalarda meydana gelen sıcaklık dengesizliklerini azaltabilmektedir [28, 29]. Sıvı soğutma yöntemlerinde kullanılan soğutucu akışkanın ısı transfer katsayısının yüksek olması sebebiyle yüksek güç yoğunluklarında bile kararlı batarya sıcaklığı sağlamaktadır. Suyun donma riski ve termal performansının düşük olması sebebiyle ağırlıklı olarak su-glikol karışımları tercih edilmektedir. Sıvı soğutma yöntemleri pompa, sıvı taşıma ve sıvı haznesi gibi ek ekipman gerektirdiğinden dolayı ağırlık ve maliyet bakımından dezavantajlıdır [30, 31]. Faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı soğutma yöntemlerinde çevre dostu faz değiştiren malzemelerin yüksek gizli ısı, soğuk depolama kapasitesi ve iyi termal depolanabilirlik sayesinde enerji depolama ve sıcaklık kontrolü çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. parafin, yağ asitleri, esterler

ve poliollerin faz değiştiren malzeme olarak kullanıldığı sistemlerde faz değişimi sırasında hacmin değişmesi sızıntılara neden olmakta ve çoğu malzemelerin düşük termal iletkenlikleri gibi dezavantajlara sahiptir [32, 33].

LiB için soğutma sistemleri kullanım amaçları ve çalışma prensiplerine göre farklı avantajlar sunsa da; ek ekipman gereksinimi, maliyet, ağırlık artışı ve tasarım karmaşıklığı bazı sistemlerde önemli sınırlamalar oluşturmaktadır. Bu yöntemler karşılaştırıldığında, düşük maliyet, basit tasarım ve bakım kolaylığı gibi sebeplerle hava soğutmalı termal yönetim sistemleri, özellikle elektrikli araç batarya paketlerinde tercih edilmekte olup bu yöntemin termal performansını inceleyen literatür çalışmaları değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda literatürde, hava soğutmalı BTMS hava akış hızı, giriş-çıkış düzeni ve hücre dizilim geometrisinin soğutma performansı üzerindeki etkileri, deneysel ve sayısal çalışmalarla incelenmiştir.

Mustafa [34], 12 hücreden oluşan prizmatik tip LiB modülünde zorlanmış hava soğutmalı BTMS’ de hava giriş-çıkış boyutlarının, konumlarının ve hücreler arası mesafenin soğutma performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, batarya modülü için farklı geometrik ve akış parametreleri değerlendirilmiş; maksimum ve ortalama hücre sıcaklığı, ısı transfer katsayısı ve basınç kaybı gibi büyüklükler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, hava giriş-çıkış açıklıklarının büyütülmesi ve hücreler arası mesafenin artırılmasının batarya sıcaklıklarını düşürdüğünü, ancak bu durumun akış karakteristiklerini ve basınç kaybını da önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Kök ve Alkaya [35], kese tip LiB hücrelerinde farklı soğutma uygulamalarını sayısal olarak inceleyerekdeşarj oranına bağlı termal davranışın değiştiğini ve uygun soğutma stratejilerinin sıcaklık kontrolünde belirleyici olduğunu göstermiştir. Uzal vd. [36], hava giriş konumu ve hızının batarya sıcaklıkları üzerindeki etkisini inceleyerek belirli hız değerlerinden sonra sıcaklık düşüş eğiliminin zayıflayabildiğini ve akış yönlendirme stratejisinin önemini vurgulamıştır. Özbektaş vd. [37], zorlanmış hava soğutma esaslı bir silindirik batarya hücresi için ısı dağılımını sayısal olarak analiz ederek zorlanmış taşınım koşullarının hücre sıcaklığını kontrol



Şekil 1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems)

etmede kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Zhang vd. [38], 21700 tipi silindirik hücrelerden oluşan 4×9 dizilime sahip bir LiB modülünde hava soğutmalı BTMS tasarımında hava akış deseninin ve çıkış konumunun termal performans üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, batarya modülü için farklı BTMS akış konfigürasyonları (U-tipi, Z-tipi ve Hook-tipi) değerlendirilmiş; ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı temel performans kriterleri sayısal olarak ele alınmıştır. CFD analizleri, çıkış açıklığının giriş bölgesine doğru kaydırılmasının, artan hava akış hızlarıyla birlikte batarya modülünde daha düşük sıcaklık seviyeleri ve daha iyi sıcaklık homojenliği sağladığını göstermiştir. Ayrıca, çıkış konumu ile hava hızı arasında kurulan polinomsal uyum fonksiyonları yardımıyla, belirli çalışma koşulları için optimum akış düzeninin öngörülebileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, hava soğutmalı BTMS tasarımında akış yönlendirme ve geometrik düzenlemenin, yalnızca hava hızının artırılmasına kıyasla daha etkili bir iyileştirme potansiyeli sunduğunu göstermektedir. Literatürde hava soğutmalı BTMS üzerine gerçekleştirilen çalışmaların incelenmesi Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde, hava soğutmalı BTMS üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda ağırlıklı olarak; hava hızı, giriş-çıkış konumu veya hücre dizilimi gibi parametrelerin sınırlı kombinasyonlarla ele alındığı ve çoğunlukla sayısal yaklaşımların tercih edilmektedir. Çoklu giriş-çıkış konfigürasyonları ile farklı hava çıkış yönlerinin deneysel olarak sistematik biçimde incelendiği çalışmaların literatürde sınırlı olması, batarya modülü içerisindeki hava akışı yönlendirmesinin ve akış dağılımının aero-termal performans üzerindeki etkilerinin deneysel olarak daha ayrıntılı incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, zorlanmış hava soğutmalı BTMS’lerde hava akış hızının termal performansı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça göstermekte olmasına rağmen, belirli bir hacim içerisinde yerleştirilen silindirik tip LiB hücrelerinden oluşan modüllerde, farklı hava giriş-çıkış konfigürasyonlarının ve hücreler arası kanal geometrilerinin zorlanmış taşınım şartlarındaki etkilerini deneysel olarak karşılaştırmalı olarak ele alan çalışmalar sınırlıdır. Bu bağlamda, mevcut çalışmada hava akış hızına ek olarak, akışın modül içerisindeki yönlendirilme stratejisinin termal performans üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmiştir.

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan silindirik tip LiB hücrelerinden oluşturulan modülün, hava soğutmalı BTMS aracılığıyla optimum çalışma sıcaklığı aralığında (20 °C – 40 °C) tutulması; sistem güvenliği, enerji verimliliği ve çevrim ömrü açısından oldukça önemlidir. Hava soğutmalı BTMS’nin soğutma etkinliği; hücre dizilim geometrisi, hücreler arası hava akış kanalı boyutları, hava giriş-çıkış açıklıklarının konumları ile hava akış hızı/debisi gibi akışa bağlı parametrelerle doğrudan alakalıdır. Bu

parametreler, modül içerisindeki hava akışının dağılımını belirleyerek hücre yüzeylerinde gerçekleşen ısı transfer mekanizmalarını önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, maksimum hücre sıcaklığının azaltılması ve hücreler arası sıcaklık dağılımının homojen hâle getirilmesi, hava soğutmalı BTMS tasarımının temel hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışma, literatürde ağırlıklı olarak sayısal analizlere dayanan hava soğutmalı BTMS araştırmalarından farklı olarak, zorlanmış konveksiyon koşulları altında çalışan 4 seri 3 paralel (4S3P) dizilim konfigürasyonuna sahip 18650 tipi silindirik LiB modülünün aero-termal davranışını deneysel olarak incelemeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda, farklı hava giriş-çıkış konfigürasyonları, giriş-çıkış sayıları ve fan hızları sistematik bir deney matrisi içerisinde beraber ele alınmış; maksimum hücre sıcaklığı, hücreler arası sıcaklık farkı ve deneysel olarak belirlenen etkin ısı transfer katsayısı gibi batarya güvenliği, termal homojenlik ve sistem verimliliği açısından kritik performans ölçütleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel yeniliği, belirli bir hacim içerisinde konumlandırılan silindirik hücrelerden oluşan bir batarya modülünde, farklı hava giriş-çıkış düzenlemeleri ve hava akışı yönlendirme stratejilerinin zorlanmış hava soğutma performansı üzerindeki etkilerini deneysel ve sistematik bir çerçevede ortaya koymasındır. Bu yönüyle çalışma, hava soğutmalı BTMS tasarımında fan kapasitesi ve hava hızı gibi küresel parametrelerin yanı sıra, hava akışının modül içerisindeki yönlendirilme biçiminin de belirleyici bir tasarım parametresi olduğunu deneysel olarak göstererek literatüre özgün ve tamamlayıcı bir katkı sunmaktadır.

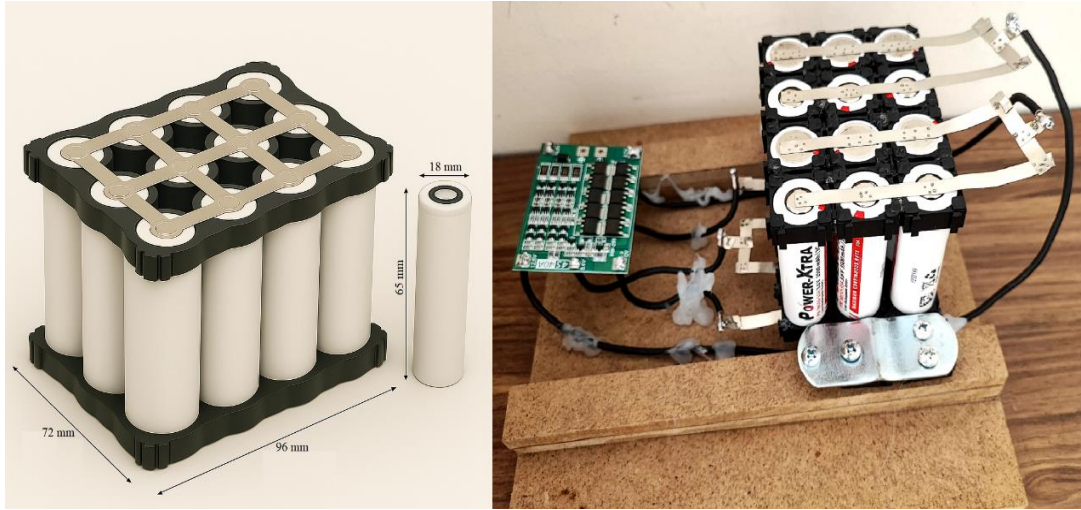
## 2. Materyal ve Metot (Materials and Methods)

Bu çalışmada, 4S3P konfigürasyona sahip 18650 silindirik tip LiB hücrelerinden oluşan bir batarya modülünün, zorlanmış konveksiyonlu hava soğutma BTMS koşulları altındaki aero-termal performansını deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, termal izolasyonlu bir şartlandırma ünitesi, batarya modül platformu ve hava giriş-çıkış açıklıklarından oluşan özel bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Çalışma kapsamında; hücreler arası hava akış kanalı genişliği ve fan hızı seviyeleri sistematik olarak değiştirilmiş ve soğutma etkinliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel analizlerde, modül etrafındaki akış dağılımını etkileyen geometrik unsurlar ile hava akışına bağlı ısı transfer mekanizmaları temel akışkanlar mekaniği ve ısı transferi prensipleri çerçevesinde ele alınmış; elde edilen sonuçlar metodolojik bir bütünlük içerisinde sunulmuştur.

Araştırmada kullanılan batarya modülü toplamda 12 adet LiB hücresinden oluşmakta olup, her bir hücrenin çapı 18 mm ve uzunluğu 65 mm’dir. Şekil 2’de modülün ve hücrelerin üç boyutlu şematik

**Tablo 1.** Hava soğutmalı BTMS üzerine literatürde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmaların karşılaştırılması  
(Comparison of experimental and numerical studies in the literature on air-cooled BTMS)

| Yazar (Yıl)       | Hücre Tipi | Hava Hızı (m/s) | İncelenen Parametreler            | Temel Bulgular                                                                           |
|-------------------|------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mustafa [34]      | Prizmatik  | 2–6             | Giriş-çıkış boyutu, hücre aralığı | Geniş giriş-çıkış açıklıkları T <sub>max</sub> ’ı düşürmüş, ancak basınç kaybı artmıştır |
| Kök & Alkaya [35] | Kese tip   | 1–5             | Deşarj oranı, hava hızı           | Yüksek deşarj oranlarında hava soğutmanın sınırlı kaldığı gösterilmiştir                 |
| Uzal vd [36]      | Silindirik | 2–8             | Giriş konumu, hava yönü           | Belirli hızdan sonra sıcaklık düşüşü doygunluğa ulaşmıştır                               |
| Özbektaş vd [37]  | Silindirik | 3–7             | Zorlanmış taşınım                 | Hava hızının hücre yüzey sıcaklığını belirgin şekilde etkilediği gösterilmiştir          |
| Zhang vd [38]     | Silindirik | 2–6             | U, Z ve Hook akış tipleri         | Çıkış konumunun sıcaklık homojenliği üzerinde kritik rol oynadığı gösterilmiştir         |



Şekil 2. 4S3P batarya modülü ve hücre teknik görseli (4S3P battery module and cell technical image)

modellemesi ve deneysel yerleşimi sunulmaktadır. Hücreler, yapısal stabiliteyi sağlamak amacıyla üst ve alt kısımlarda hücre tutucu braketter ile sabitlenmiştir. Modülde hücre merkezleri arası mesafe 21 mm olup, hava akışının hücre yüzeyleri boyunca daha etkin yönlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Modülde hücreler arası elektriksel bağlantılar, nikel şeritler ve kablolar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşırı akım, aşırı gerilim, aşırı ısınma ve hücreler arasındaki dengesizliğin önlenmesi amacıyla batarya modülüne akım koruma kartı entegre edilmiştir. Bu kart, seri-paralel hücre gruplarının güvenli şarj/deşarj aralığında çalışmasını ve hücre dengelenmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, her birinin nominal kapasitesi 3,5 Ah ve nominal gerilimi 3,7 V olan 18650 tipi LiB hücreleri kullanılmıştır. 4 seri 3 paralel (4S3P) konfigürasyonda toplam 12 hücrenin bağlanmasıyla oluşturulan batarya modülünün nominal gerilimi 14,8 V, toplam nominal kapasitesi ise paralel bağlantı sayısı dikkate alındığında 10,5 Ah olarak belirlenmiştir. Hücre ve modüle ait teknik özellikler üretici teknik kataloğundan alınarak Tablo 2’de sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda uygulanandeşarj akımlarının C oranı, modül bazında tanımlanmış ve uygulanan akımın modül nominal kapasitesine oranı esas alınarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda, çalışmada 1, 3, 5, 7 ve 10 A sabitdeşarj akımlarına karşılık gelen C oranları sırasıyla 0,10 C, 0,29 C, 0,48 C, 0,67 C ve 0,95 C ( $\approx 1$  C) olarak belirlenmiştir. Özellikle 10 Adeşarj akımı, literatürde batarya termal davranışının ve BTMS performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yaklaşık 1 C çalışma şartlarını temsil etmekte olup, bu yaklaşım deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılabilirliğini ve çalışmanın tekrarlanabilirliğini sağlamaktadır.

Çalışmada LiB modülü 200 x 200 mm ebatlarındaki test platformu üzerine yerleştirilerek hava akışının modül boyunca doğrusal olarak ilerlemesi amaçlanmış, 400 x 400 x 200 mm boyutlarında termal izolasyonlu şartlandırma ünitesi içerisinde deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Zorlanmış hava konveksiyonu için giriş tarafından 54 mm çapında hava giriş kanalı ve çıkış tarafından ise 74 mm çapında bir hava çıkış kanalı yapılandırılmıştır. Hava akışının gerçekleştirilmesi amacıyla eksenel fan yardımıyla oluşturulmuş ve fan hızı farklı seviyelerde ayarlanarak testler tekrarlanmıştır. Deneyler  $25 \pm 1$  °C sabit ortam sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Batarya modülünde yer alan hücrelerin sıcaklıklarını gözlemlemek amacıyla farklı konumlara termokupl sıcaklık sensörleri yerleştirilmiş ve zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri kayıt altına alınmıştır.

Tablo 2. Batarya hücresi ve modül teknik özellikleri (Battery cell and module technical specifications)

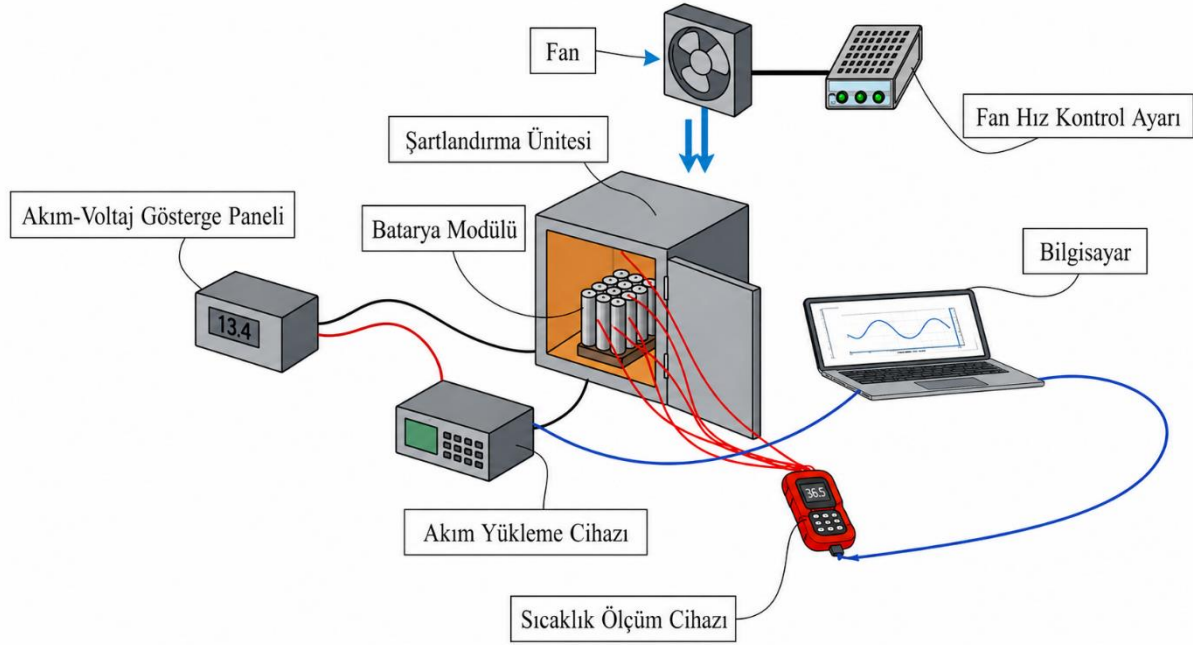
| Özellik                       | Değer                                 |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Nominal hücre gerilimi        | 3,7 V                                 |
| Hücre kapasitesi              | 3,5 Ah                                |
| Hücre iç direnci              | 0,04 $\Omega$                         |
| Hücrenin nominal enerjisi     | 12,95 Wh                              |
| Hücre maksimum kesme gerilimi | 4,2 V                                 |
| Hücre minimum kesme gerilimi  | 2,5 V                                 |
| Hücre ağırlığı                | 0,046 kg                              |
| Hücre boyutları               | $\varnothing 18$ mm x 65 mm           |
| Hücre hacmi                   | $1,65 \times 10^{-5}$ m <sup>3</sup>  |
| Hücre yüzey alanı             | $4,185 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> |
| Toplam hücre sayısı           | 12                                    |
| Seri bağlantı sayısı          | 4                                     |
| Paralel bağlantı sayısı       | 3                                     |
| Modül nominal gerilimi        | 14,8 V                                |
| Modül kapasitesi              | 10,5 Ah                               |
| Modül enerjisi                | 155,4 Wh                              |
| Hücre bazlı toplam kütle      | 0,552 kg                              |
| Modül iç direnci              | 0,0533 $\Omega$                       |
| Toplam hücre hacmi            | $1,99 \times 10^{-4}$ m <sup>3</sup>  |

Sensörler aracılığı ile alınan veriler eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmıştır. Batarya modülünün termal davranışını zamana bağlı olarak yüksek doğrulukla izleyebilmek amacıyla, deneylerde toplam 12 adet K-tipi termokupl sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Termokupllar batarya modülünde 7 adet kritik noktalara, 1 adet şartlandırma ünitesi üst kapağına, 1 adet hava giriş açıklığına ve 1 adette hava çıkış açıklığına yerleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ise akım yükleme cihazı üzerinde yer alan sıcaklık sensörü aracılığı ile ölçülmüştür. Batarya modülüne ayarlanabilir akım yükleme cihazı bağlantısı yapılarak akım kontrolü yapılmış ve göstergede yer alan değerlerin doğruluğunu kontrol etmek için akım ve gerilim değerleri gösterge paneli aracılığı ile izlenmiştir. Bu deney düzeneği ile zorlanmış hava konveksiyonu ile batarya modül ve hücrelerinin sıcaklık dağılımı ve soğutma etkinliği ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, analitik hesaplarla birlikte yorumlanarak sistemin aero-termal performansı kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır.

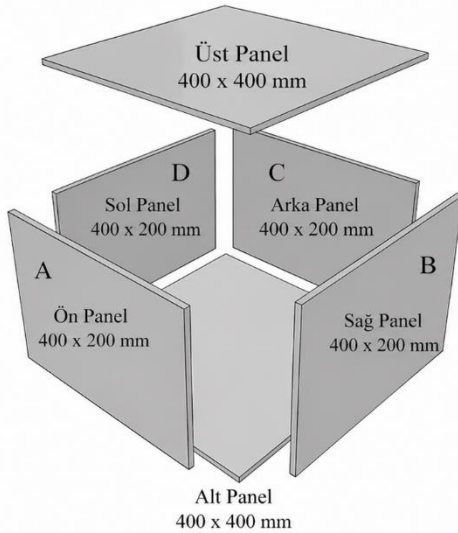
Bu çalışmada batarya modülünün 1, 3, 5, 7 ve 10 Adeşarj akımı seviyelerinde termal davranışını değerlendirmek amacıyla deneysel testlere başlanmıştır. İlk aşamada, bütün akım değerlerinde doğal

konveksiyonun ve hücreler arası ısı iletiminin soğutma performansına etkisini incelemek amacıyla ön testler gerçekleştirilmiştir. 1 – 7 A akım değerleri aralığında toplam ısı üretiminin düşük olması sebebiyle batarya yüzeyindeki sıcaklık artışını dengelemek için doğal konveksiyon yeterli olduğundan zorlanmış akış uygulanmadığı durumlarda da optimum çalışma sıcaklığı limitleri aşılmamıştır. Doğal konveksiyon deneysel çalışma sonucunda, maksimum sıcaklık farkının  $5^{\circ}\text{C}$ ' den az olduğunu ve hücreler arasındaki sıcaklık farkının ise  $2^{\circ}\text{C}$ 'nin altında kaldığı görülmüştür. Elde edilen doğal konveksiyon verilerinin düşük akım şartlarında zorlanmış konveksiyon için çalıştırılan fanın enerji tüketimi açısından ek bir avantaj sağlamadığını, termal performansına bir katkı sunmadığını ve kontrol sistemi açısından gereksiz olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, düşük akım aralığında batarya modülünün pasif termal yönetimi ile optimum sıcaklık aralığında çalışabilmektedir.

Batarya modülünün zorlanmış hava konveksiyonu altında aero-termal davranışını incelenmesinde farklı hava giriş-çıkış konfigürasyonlarında fan hızlarına ait deneysel bir matris oluşturulmuştur. Hava akış yönlerinin tanımlanmasında şartlandırma ünitesinin panel yüzeyleri A, B, C ve D olarak kodlanmış olup alt ve üst panellerde hava akışı bulunmamaktadır. Şekil 4' te deneylerde kullanılan şartlandırma ünitesinin geometrik panel kodlaması ve batarya modülünün şartlandırma ünitesindeki yerleşimi gösterilmektedir. Buna göre, ön panel (A), sağ panel (B), arka panel (C) ve sol panel (D) kodu ile verilmiştir. Ayrıca hava girişi için "g" ve hava çıkışı için "ç" kısaltması kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 4' te verilen karşılıklı 1 giriş ve 1 çıkış için giriş konumu A, çıkış konumu C olarak gösterilmiş ve 1g-A / 1ç-C olarak ifade edilmiştir. 2 giriş veya çıkışlı konfigürasyonlarda ise "2g-(A,B)" gibi kodlamalar kullanılmıştır.



Şekil 3. Zorlanmış konveksiyon batarya soğutma deney düzeneği (Forced convection battery cooling experimental setup)



Şekil 4. Batarya modülünün panel yüzey kodlaması ve örnek deneysel düzeneği (Panel surface coding of the battery module and sample experimental setup)

Zorlanmış taşınım temelli deneysel analizlerde 10 Amper (1 C) sabit deşarj akımında fan hızı, hava giriş-çıkış konfigürasyonları ve giriş-çıkış delik sayıları sistematik olarak değiştirilmiştir. Böylece farklı akış stratejilerinde batarya modülünün ( $T_{max}$ ) ve sıcaklık farkının ( $\Delta T$ ) etkileri karşılıklı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan deney matrisi Tablo 3'te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Çalışmada kullanılan deney matrisi  
(The experimental matrix used in the study)

| Deney No. | Giriş Konfigürasyonu | Çıkış Konfigürasyonu | Fan Hızı (m/s) |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------|
| D1        | 1g-A                 | 1ç-C                 | 3              |
| D2        | 1g-A                 | 1ç-C                 | 4,5            |
| D3        | 1g-A                 | 1ç-C                 | 6              |
| D4        | 1g-A                 | 1ç-C                 | 7,5            |
| D5        | 1g-A                 | 1ç-B                 | 3              |
| D6        | 1g-A                 | 1ç-B                 | 4,5            |
| D7        | 1g-A                 | 1ç-B                 | 6              |
| D8        | 1g-A                 | 1ç-B                 | 7,5            |
| D9        | 1g-A                 | 2ç-(B,D)             | 3              |
| D10       | 1g-A                 | 2ç-(B,D)             | 4,5            |
| D11       | 1g-A                 | 2ç-(B,D)             | 6              |
| D12       | 1g-A                 | 2ç-(B,D)             | 7,5            |
| D13       | 2g-(A,B)             | 1ç-C                 | 3              |
| D14       | 2g-(A,B)             | 1ç-C                 | 4,5            |
| D15       | 2g-(A,B)             | 1ç-C                 | 6              |
| D16       | 2g-(A,B)             | 1ç-C                 | 7,5            |
| D17       | 2g-(A,B)             | 2ç-(C,D)             | 3              |
| D18       | 2g-(A,B)             | 2ç-(C,D)             | 4,5            |
| D19       | 2g-(A,B)             | 2ç-(C,D)             | 6              |
| D20       | 2g-(A,B)             | 2ç-(C,D)             | 7,5            |
| D21       | 2g-(A,C)             | 2ç-(B,D)             | 3              |
| D22       | 2g-(A,C)             | 2ç-(B,D)             | 4,5            |
| D23       | 2g-(A,C)             | 2ç-(B,D)             | 6              |
| D24       | 2g-(A,C)             | 2ç-(B,D)             | 7,5            |

Batarya modülünün zorlanmış konveksiyon şartlarında soğutma performansının değerlendirilmesi hem fan hızına bağlı olarak hava akış özellikleri hem de teorik ısı transfer katsayısı analitik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, hava kanallarından geçen havanın akış rejiminin belirlenmesi için Reynolds sayısı (Re), yüzeyler arasındaki ısı konveksiyonunu karakterize etmek için Nusselt sayısı (Nu) ve buna bağlı olarak teorik ısı transfer katsayısı (h) hesaplanmıştır. Böylece farklı akış konfigürasyonlarının aero-termal etkinlikleri sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca fan hızına bağlı basınç kaybı hesaplamaları gerçekleştirilerek, hava akış yönünün soğutma verimi ve olası enerji tüketimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sayısal hesaplamalarda hava, sürekli rejimde ve sabit yoğunluk varsayımıyla Newtonyen bir akışkan olarak modellenmiş olup termodinamik özellikleri, 25 °C ortam sıcaklığı için sabit kabul edilmiştir. Havanın yoğunluğu 1,184 kg/m<sup>3</sup> ve dinamik viskozitesi ise 1,85×10<sup>-5</sup> Pa.s olarak alınmıştır. Hava akış rejimi Eş. 1 ile belirlenmiştir.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

Burada  $\rho$  yoğunluk, V hava giriş hızı (m/s),  $D_h$  hidrolik çap (m) ve  $\mu$  dinamik viskozitedir. Hava giriş hızı fan çıkışından havanın üniteye giriş kısmından ölçülmüş ve sırasıyla 3-4,5-6-7 m/s değerleri, hidrolik çap değeri için ise havanın giriş kesitinin çapı 0,054 m alınarak Re hesaplamaları yapılmıştır. Ölçülen değerler sonucunda 3 m/s için Re 10.368 ve 7,5 m/s için 25.920 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar deneylerde kullanılan bütün hız kademelerinde  $Re \gg 4000$  olduğundan, giriş kesitindeki akışın türbülanslı rejimde olduğu görülmektedir. Bu türbülanslı akış rejimi, şartlandırma ünitesi içerisindeki akışın, ünite duvarları ile modül arasındaki boşluklar ve

modül hücreleri arasındaki kanallardan geçerek tüm modül yüzeyine ulaşmaktadır. Bu bölgede akış alanı genişlemiş olsa da giriş kanalında türbülanslı yapının korunduğu ve modül çevresinde oluşan yerel Re da türbülans sınırının ( $Re > 2000$ ) üzerinde olduğu kabul edilerek batarya hücrelerine temas eden havanın rejimi hesaplanırken giriş kanalındaki Re referans alınmıştır.

Isı transferi analizlerinde konveksiyonla gerçekleşen ısı transferinin iletimle gerçekleşen ısı transferine göre ne kadar arttığı boyutsuz bir parametre olan Nu ile hesaplanmaktadır. Akışkan ile yüzey arasındaki teorik ısı transfer katsayısı Eş.2'de Nu ile hesaplanabilir ve bu sayede farklı akış rejimleri ile geometri arasındaki termal performans karşılaştırılabilir.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (2)$$

Burada h teorik ısı transfer katsayısı (W/m<sup>2</sup>K),  $D_h$  hidrolik çap (m) ve k ısıl iletkenlik (W/mK)'dir. Nu değerinin bire yaklaşması durumunda iletimin baskın olduğu, yüksek değerlerde olması durumunda ise konveksiyonun ısı transferinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Zorlanmış konveksiyon şartlarında gerçekleştirilen deneylerde aero-termal karakteristiğini değerlendirebilmek amacıyla giriş kesitindeki akış koşulları teorik olarak ele alınmış olup Re, fan hızına ve delik çapına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu analiz ile sistemin potansiyel soğutma kapasitesinin tanımlanması ve farklı hava yönlendirme stratejilerinin termal davranış üzerindeki etkilerini tahmin etmeye olanak sağlamaktadır. Teorik olarak kesitte h değeri hesaplamak sadece giriş kesitindeki hava akışını temsil etmekte olup batarya hücrelerinin yüzeyinde gerçekleşen ısı transferini tam olarak karşılamamaktadır. Isı transferine, batarya hücreleri arasındaki havanın hız dağılımının, yönünün ve türbülans şiddetindeki değişimler ek dirençlere neden olmaktadır. Bu ek dirençler zorlanmış temelli hava soğutma performansının değerlendirilmesinde deneysel sıcaklık ölçümlerinin esas alınarak etkin ısı transfer katsayısının (etkin) hesaplanmasında Eş. 3 kullanılmıştır. Etkin ısı transfer katsayısı, zorlanmış hava akışının hücre yüzeyinde oluşturduğu gerçek ısı taşınım miktarını ifade eden bütünlük bir parametre olarak hesaplanmaktadır.

$$h_{etkin} = \frac{Q_{Toplam}}{A(T_y - T_{\infty})} \quad (3)$$

Burada  $Q_{Toplam}$  batarya modülünün ürettiği toplam ısı enerji miktarını (W), A modülün etkin ısı transfer yüzeyini (dış yüzey alanı) (m<sup>2</sup>),  $T_y$  batarya hücrelerinden ölçülen sıcaklığı (K) ve  $T_{\infty}$  ise kabinin ortam sıcaklığı (K)'dir. Çalışmada modül uzunluğu 96 mm, genişliği 72 mm ve yüksekliği 65 mm olup toplam modül alanı 0,035664 m<sup>2</sup>'dir.

Bataryanın ürettiği ısı enerji, şarj/deşarj döngüleri boyunca fiziksel ve elektrokimyasal mekanizmaların birleşik etkisiyle meydana gelmektedir. Bu mekanizmalar Joule (ohmik) ısı, entropik (tersinir) ısı, reaksiyon/elektrokimyasal ısı, yan reaksiyon ısısı, difüzyon kaynaklı ısı ve mekanik ısıdan oluşmakta olup toplam ısı üretim miktarı Eş. 4 ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_{Toplam} = Q_{Ohmik} + Q_{Tersinir} + Q_{Reaksiyon} + Q_{Yan} + Q_{Difüzyon} + Q_{Mekanik} \quad (4)$$

$Q_{Toplam}$  batarya modülünün ürettiği toplam ısı enerji miktarını (W), ohmik ısı ( $Q_{Ohmik}$ ) akımın hücre iç direncinden geçmesinden kaynaklanmakta olup toplam ısı üretiminin baskın bileşendir. Tersinir ısı ( $Q_{Tersinir}$ ), açık devre geriliminin sıcaklıkla değişimine bağlı olarak hesaplanmakta olup pozitif ya da negatif olabilir. Düşük akım koşullarında negatif etkili bir bileşendir. Reaksiyon ısısı ( $Q_{Reaksiyon}$ ), hücre anlık gerilimi ile açık devre gerilimi arasındaki farktan doğan kinetik ve dirençsel bileşenlerin (polarizasyon)

kayıplarının bir sonucu olarak oluşmaktadır. Hücrelerin kimyasal yaşlanması, elektrolit bozunma ve katı elektrolit ara yüz (SEI – Solid Electrolyte Interface) tabakasının gelişimi gibi süreçlerden kaynaklanan yan reaksiyon ısısı ( $Q_{Yan}$ ), normal çalışma koşullarında düşük seviyelerde olup özellikle yüksek sıcaklıklarda artış gösterebilmektedir. Difüzyon ısısı ( $Q_{Difüzyon}$ ), iyonların elektrotlar arasında hareketi sırasında meydana gelen kimyasal potansiyel farka bağlı oluşmakta olup özellikle yüksek akımlarda önemli hale gelir. Mekanik ısı ( $Q_{Mekanik}$ ), ise hücrelerin genleşmesi, sıkışması veya titreşimi gibi mekanik deformasyonlardan kaynaklanan küçük bir bileşendir. Isı üretim mekanizmalarının hepsi teorik olarak batarya modülünün ürettiği ısıya etkisi olsa da Ohmik ısınn baskın bileşen olmasının nedeni akımın karesiyle orantılı olarak ortaya çıkmakta olup düşük ve orta seviyedeki akımlarda dahi diğer bileşenlerin toplamından daha yüksek etki oluşturmaktadır. Ayrıca tersinir ısınn düşük akım gibi durumlarda negatif etki (soğutma etkisi) yaratabilmesi, reaksiyon ve difüzyon ısısı için gerekli parametrelerin deneysel olarak belirlenmesindeki zorluklar ve yan reaksiyon ısınn sadece hücre yaşlandığında anlamlı bir seviyeye ulaşması, toplam ısı üretimi modelinin gereksiz yere karmaşıklaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada batarya modülünün ısı yükünü temsil etmek amacıyla toplam ısı üretimi Ohmik temelli olarak ele alınmış ve hesaplamalar Eş. 5 ile yapılmıştır.

$$Q_{Toplam} = Q_{Ohmik} \approx I^2 R_{iç} \quad (5)$$

Burada I akım (A),  $R_{iç}$  hücre iç direnci ( $\Omega$ )' dir. Çalışmada zorlanmış taşınım deneylerinin yapılmasında 10 Amper (1 C) akım değeri ve 0,04  $\Omega$  için üretilen ısı miktarı 48 W olarak hesaplanmıştır.

### 2.1. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini nicel olarak değerlendirebilmek amacıyla, deneylerde doğrudan ölçülen büyüklüklerin yanı sıra bu büyüklüklerden türetilen Re, Nu ve h gibi temel aero-termal parametreleri kapsayan ölçüm belirsizlikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi, hesaplamalarında, literatürde yaygın olarak kullanılan hata yayılım yöntemi esas alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda direkt olarak ölçülen temel büyüklükler; hava hızı (V), sıcaklık (T), hidrolik çap ( $D_h$ ) ve akışkana ait termodinamik özellikler (yoğunluk  $\rho$ , dinamik viskozite  $\mu$  ve ısıl iletkenlik k) olup, bu büyüklüklere ait ölçüm belirsizlikleri üretici katalogları ve cihaz hassasiyetleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ölçülen büyüklüklerin belirsizliklerinin, türetilen parametrelere olan etkisini hesaplayabilmek için genel olarak herhangi bir R fonksiyonu Eş. 6 ile ifade edilirse;

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (6)$$

İçin toplam belirsizlik Eş. 7 ile ifade edilmiştir.

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2} \quad (7)$$

Burada R ölçülen büyüklüklerden türetilen parametreyi,  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) deneysel olarak ölçülen bağımsız değişkenleri,  $f(\cdot)$  bu değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi ve n toplam bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir.  $\delta R$  türetilen parametrenin toplam belirsizliğini,  $\left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)$  ise ilgili değişkenin R üzerindeki duyarlılığını göstermektedir. Bu yaklaşım, ölçüm belirsizliklerinin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı altında uygulanmıştır.

Re, hava akışının rejimini tanımlamak amacıyla kullanılarak bağıl belirsizlik, ölçüm belirsizliklerinin hata yayılımı yöntemiyle birleştirilmesi sonucu Eş. 8 elde edilmiştir.

$$\frac{\delta Re}{Re} = \sqrt{\left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2} \quad (8)$$

Isı transfer katsayısının hesaplanmasında, deneysel sıcaklık ölçümlerine dayalı enerji dengesi yaklaşımı kullanılmış ve bu kapsamda bağıl belirsizlik, toplam ısı üretimi ve hücre yüzeyi ile ortam arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak Eş. 9 ifade edilmiştir.

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left( \frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\delta (\Delta T)}{\Delta T} \right)^2} \quad (9)$$

Isı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılan sıcaklık ölçümleri için termokupl sensör belirsizliği  $\pm 0,5$  °C alınmış; bu durumda sıcaklık farkına ait belirsizlik, hücre yüzeyi ve ortam sıcaklıklarının ölçüm belirsizlikleri dikkate alınarak Eş. 10 ile hesaplanmıştır.

$$\delta (\Delta T) = \sqrt{(\delta T_y)^2 + (\delta T_\infty)^2} \quad (10)$$

Nu, hesaplanan ısı transfer katsayısı kullanılarak Eş. 11 ile elde edilmiştir.

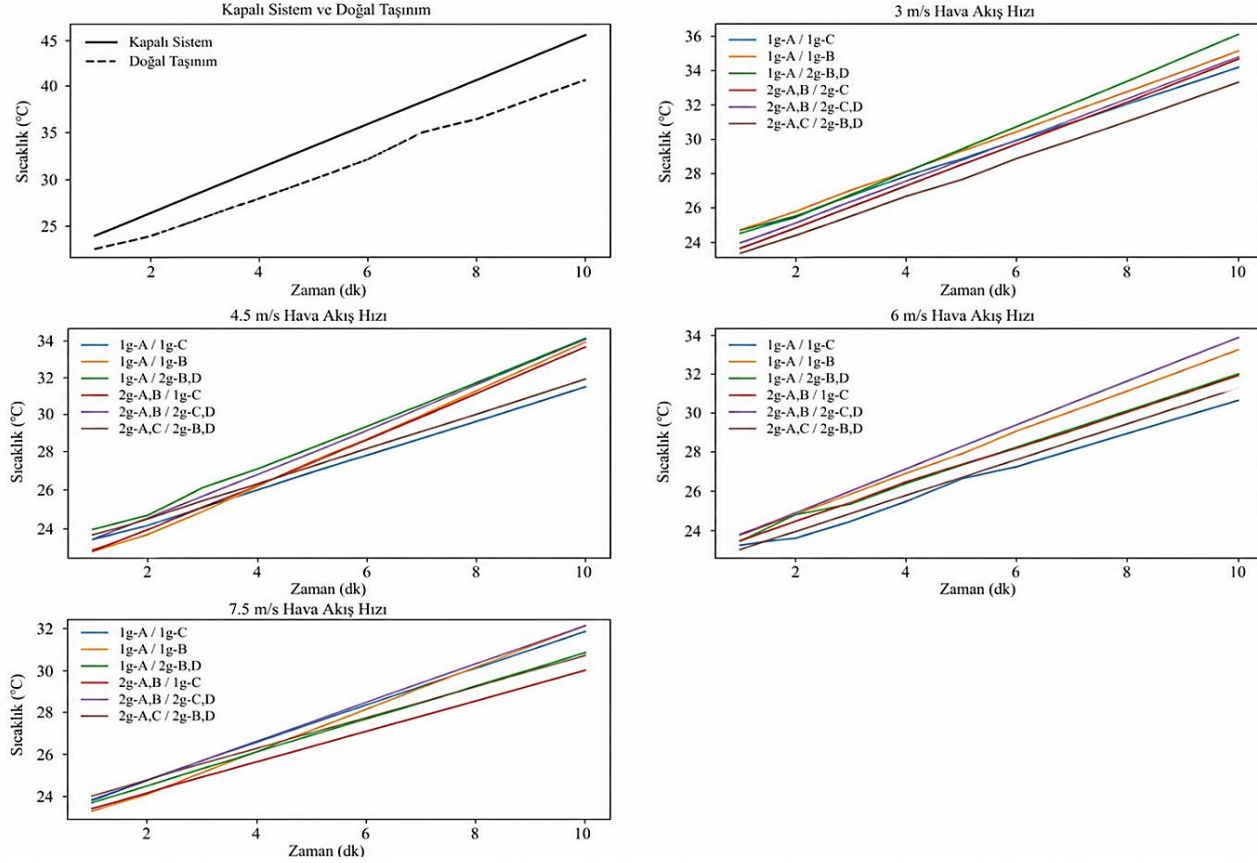
$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \sqrt{\left( \frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{\delta k}{k} \right)^2} \quad (11)$$

Belirsizlik analizinde kullanılan ölçüm belirsizlikleri, deney düzeneğinde yer alan cihazların ve sensörlerin çözünürlükleri ile üretici doğruluk toleransları dikkate alınarak belirlenmiştir. Hava hızı ölçümlerindeki mutlak belirsizlik  $\pm 0,1$  m/s olarak alınmıştır. Giriş kanalının karakteristik boyutu olan hidrolik çap, mekanik ölçüm toleransları dâhil edilerek  $D_h = 0,054$  m ve  $\delta D_h = \pm 0,0005$  m kabul edilmiştir. Akışkana ait termodinamik özelliklerin ( $\rho$ ,  $\mu$  ve k) belirsizlikleri, deneylerin  $25 \pm 1$  °C koşullarında yürütülmesi ve özelliklerin sıcaklığa bağlı sınırlı değişimi göz önünde bulundurularak  $\pm 1\%$  düzeyinde değerlendirilmiştir. Toplam ısı üretimi belirsizliği ise akım–direnc temelli ısı üretim modelinde ölçüm ve parametre etkileri birlikte değerlendirilerek  $\pm 5\%$  olarak kabul edilmiştir.

Isı transfer katsayısının belirlenmesinde kullanılan temel parametrelerden biri, batarya hücre yüzeyi ile ortam arasındaki sıcaklık farkıdır. Zorlanmış hava konveksiyonu altında çalışan batarya modüllerinde  $\Delta T$  değeri; fan hızı, hava giriş–çıkış konfigürasyonu ve modül içerisindeki akış dağılımına bağlı olarak değişkenlik göstermesinden dolayı belirsizlik analizinde kullanılan sıcaklık farkı değerinin, çalışmada incelenen deneysel koşulları temsil edecek şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda sıcaklık farkı, farklı fan hızları ve hava akış konfigürasyonları altında gerçekleştirilen deneylerde ölçülen hücreler arası sıcaklık farkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu çalışmada belirsizlik analizi, her bir fan hızı için kendi içerisinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, belirli bir fan hızında gerçekleştirilen tüm hava akış konfigürasyonları için ölçülen hücreler arası sıcaklık farkları dikkate alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili fan hızına ait ortalama bir  $\Delta T$  değeri belirlenmiştir. Böylece belirsizlik hesaplamalarında kullanılan sıcaklık farkı, tek bir deney koşuluna değil; aynı fan hızı altında gerçekleştirilen tüm deneyleri temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, fan hızına bağlı olarak sıcaklık farkında meydana gelen değişimlerin, h ve Nu ait bağıl belirsizlikler üzerindeki etkisi nicel olarak ortaya konulabilmiştir. Ölçüm belirsizlikleri ve hata yayılımı yöntemi kullanılarak Re, h ve Nu için hesaplanan bağıl belirsizlikler Tablo 4'te sunulmuştur.

**Tablo 4.** Re, h ve Nu için belirsizlik analizi sonuçları (Uncertainty analysis results for Re, h, and Nu)

| Fan hızı V (m/s) | Re     | $\frac{\delta Re}{Re}(\%)$ | $\Delta T(^{\circ}C)$ | $\frac{\delta h}{h}(\%)$ | $\frac{\delta Nu}{Nu}(\%)$ |
|------------------|--------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 3                | 10.368 | 3,74                       | 6,85                  | 11,47                    | 11,56                      |
| 4,5              | 15.552 | 2,79                       | 4,30                  | 17,18                    | 17,24                      |
| 6                | 20.736 | 2,37                       | 3,20                  | 22,66                    | 22,70                      |
| 7,5              | 25.920 | 2,15                       | 2,77                  | 26,00                    | 26,03                      |

**Şekil 5.** Kapalı sistem, doğal taşınım ve farklı hava akış hızları altında batarya modülünün zamana bağlı sıcaklık değişimi  
(The time-dependent temperature change of the battery module under closed system, natural convection and different airflow rates)

Tablo 4'te sunulan belirsizlik analizi sonuçları incelendiğinde, Re ait bağıl belirsizliğin fan hızının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Bu durum, hava hızının ölçümündeki mutlak belirsizliğin sabit kalmasına rağmen fan hızının artmasıyla  $\delta V/V$  oranının küçülmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, tüm hız kademelerinde akış rejiminin belirlenmesine yönelik Re hesaplarının yeterli doğrulukla gerçekleştirildiği söylenebilir. h ve Nu için hesaplanan bağıl belirsizlikler ise fan hızına bağlı olarak artış göstermesinin temel nedeni, belirsizlik hesaplamalarında kullanılan sıcaklık farkı değerlerinin her fan hızı için ayrı ayrı belirlenmesi ve fan hızının artmasıyla birlikte hücreler arası ortalama sıcaklık farkının azalmasıdır. Sıcaklık farkının azalması, sıcaklık ölçüm belirsizliklerinin göreceli etkisini artırmakta ve buna bağlı olarak  $\delta h/h$  ve  $\delta Nu/Nu$  değerlerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Bu sonuçlar, belirsizlik hesaplamalarında sıcaklık farkının baskın rol oynadığını ve düşük sıcaklık farkı seviyelerinde ölçüm belirsizliklerinin ısı transfer katsayısı üzerindeki göreceli etkisinin arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, elde edilen belirsizlik düzeyleri zorlanmış konveksiyonlu hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri için literatürde kabul edilen sınırlar içerisinde yer almakta olup, farklı fan hızları ve

hava akış konfigürasyonları arasında gerçekleştirilen karşılaştırmalı aero-termal değerlendirmelerin güvenilirliğini olumsuz etkileyecek büyüklükte değildir. Sonuç olarak, Tablo 4'te sunulan belirsizlik analizi; deneysel sıcaklık ölçümleri, ısı transfer katsayısı hesaplamaları ve akış parametrelerinin yeterli doğrulukla belirlendiğini ve çalışmada aero-termal performans eğilimlerinin nicel açıdan güvenilir olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada 4S3P dizilime sahip batarya modülü için uygulanan hava akış konfigürasyonları, sıcaklık ölçüm stratejisi, ısı üretim modeli ve aero-termal analiz yöntemleri bir bütün olarak ele alınarak teorik ve deneysel değerlendirmeleri kapsayan bütünlük bir metodoloji oluşturulmuştur. Yüksek akım seviyelerinde fan hızı ve giriş-çıkış konfigürasyonlarının sistem üzerindeki etkileri incelenmiş; zorlanmış konveksiyonun batarya modülü üzerindeki soğutma performansını belirleyen temel ısı parametreleri deneysel ölçümlerle desteklenmiştir. Teorik olarak hesaplanan Re, Nu ve h değerleri, giriş kesitindeki hava akışının potansiyel soğutma kapasitesini tanımlarken; modül yüzeyinden elde edilen sıcaklık verileri ise gerçek çalışma koşullarını temsil eden etkin belirlenmesine olanak

**Tablo 5.** Farklı fan hızları ve hava akış konfigürasyonları için hücreler arası sıcaklık farkı ( $\Delta T$ , °C)  
(Temperature difference between cells for different fan speeds and airflow configurations, ( $\Delta T$ , °C))

| Hava Akış Konfigürasyonu | $\Delta T$ (°C)<br>(3 m/s) | $\Delta T$ (°C)<br>(4,5 m/s) | $\Delta T$ (°C)<br>(6 m/s) | $\Delta T$ (°C)<br>(7,5 m/s) |
|--------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1g-A / 1ç-C              | 6,8                        | 4,1                          | 2,9                        | 2,4                          |
| 1g-A / 1ç-B              | 9,6                        | 6,3                          | 4,8                        | 4,2                          |
| 1g-A / 2ç-(B,D)          | 7,9                        | 5,2                          | 4,1                        | 3,6                          |
| 2g-(A,B) / 1ç-C          | 6,1                        | 3,7                          | 2,8                        | 2,5                          |
| 2g-(A,B) / 2ç-(C,D)      | 4,3                        | 2,6                          | 1,9                        | 1,6                          |
| 2g-(A,C) / 2ç-(B,D)      | 6,4                        | 3,9                          | 2,7                        | 2,3                          |

sağlamıştır. Böylece hem farklı hava yönlendirme stratejilerinin hem de fan hızının batarya modülünün termal tepkisi üzerindeki etkileri değerlendirilmek üzere sonraki bölümde sunulmuştur.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada zorlanmış konveksiyon şartları altında farklı hava akış konfigürasyonlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sıcaklık dağılımları,  $T_{max}$ ,  $\Delta T$  ve  $h$  değerlerinin batarya modülünün termal davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Materyal ve metod bölümünde giriş kesiti için teorik olarak hesaplanan  $Re$ ,  $Nu$  ve  $h$  değerleri, hava akışının potansiyel soğutma kapasitesine ilişkin bir referans oluşturmuş olup bu bölümde deneysel gözlemlerle ilişkilendirilerek yorumlanmıştır. Uygulanan sabit deşarj akımında fan hızı ve giriş-çıkış konfigürasyonunun batarya modülü üzerindeki sıcaklık alanını nasıl şekillendirdiği sistematik olarak incelenmiş; zorlanmış hava konveksiyonunun etkinliği ile akış yönlendirme stratejilerinin soğutma performansı üzerindeki belirleyici rolü deneysel bulgularla ortaya konulmuştur. Bu kapsamda elde edilen verilerin sadece nicel sonuçlar üzerinden değil aynı zamanda batarya modülünün uzun ömürlü çalışması, termal güvenliği ve ısıl dengesizliklerin önlenmesi bakımından mühendislik perspektifiyle tartışılmıştır.

Kapalı sistem ve doğal taşınım koşulları ile birlikte farklı hava akış hızları (3, 4,5, 6 ve 7,5 m/s) altında incelenen batarya modüllerinin zamana bağlı sıcaklık değişimi Şekil 5' te gösterilmektedir. Kapalı sistem ve doğal taşınım çalışmaları karşılaştırıldığında, kapalı sistemin sıcaklık artışının daha hızlı olduğu ve 10. dakikanın sonunda modül sıcaklığının yaklaşık 46 °C seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Doğal taşınım koşulunda ise sıcaklık artışı kapalı sistem durumuna göre daha sınırlı kalmış ve maksimum sıcaklık yaklaşık 41 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum, dış ortamdan şartlandırma ünitesine hava akışının olmadığı kapalı hacimde hava sirkülasyonunun yetersiz kalmasının ısı birikimini artırdığını açıkça ortaya koymaktadır.

Zorlanmış taşınım uygulanan konfigürasyonlarda, hava akış hızının artmasıyla birlikte tüm dizilimlerde modül sıcaklıkları belirgin şekilde düştüğü görülmektedir. 3 m/s hava giriş hızında konfigürasyonlar arasında sıcaklık farklarının daha belirgin olduğu, özellikle çift giriş-çift çıkışlı (2g-2ç) dizilimlerin daha düşük sıcaklık değerleri sunduğu dikkat çekmektedir. Hava giriş hızı 4,5 ve 6 m/s seviyelerine çıkarıldığında, sıcaklık eğrilerinin birbirine yaklaştığı ve soğutma performansının daha homojen hale geldiği görülmektedir. En yüksek hava giriş hızı olan 7,5 m/s koşulunda ise tüm konfigürasyonlarda sıcaklık artış eğiminin azaldığı ve maksimum modül sıcaklığının yaklaşık 30 – 32 °C aralığında sınırlandırıldığı belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, zorlanmış hava soğutmanın BTMS etkinliğini açıkça ortaya koymakta; özellikle çoklu giriş-çıkışlı hava kanalı tasarımlarının ve yüksek hava akış hızlarının modül sıcaklığını düşürmede önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu bulgular, hava soğutmalı batarya paketlerinde hem geometrik düzenlemenin hem de

akış parametrelerinin birlikte optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, hava akış hızındaki artışın sıcaklık düşüşü üzerindeki etkisinin her hız aralığında aynı oranda gerçekleşmediği görülmektedir. Orta seviyedeki hava hızlarından (4,5–6 m/s) yüksek hızlara (7,5 m/s) geçildiğinde, maksimum sıcaklık değerlerindeki azalma eğiliminin belirgin biçimde zayıfladığı dikkat çekmektedir. Bu durum, zorlanmış hava soğutma sistemlerinde belirli bir hız seviyesinin ötesinde fan hızının artırılması her ne kadar ısı taşınımını güçlendirse de, modül geometrisi, hücreler arası boşluklar ve akışın yön değiştirmesi gibi fiziksel sınırlamalar nedeniyle ek soğutma katkısı giderek azalmakta; buna karşın fan kaynaklı enerji tüketimi artış potansiyeli devam etmektedir.

Fan hızının artırılmasıyla zorlanmış konveksiyon şartlarındaki ısı transfer katsayısı artmakta ve batarya modülünden çevreye taşınan ısı miktarı yükselmektedir. Ancak belirli bir fan hızı seviyesinin ötesinde, soğutma performansındaki iyileşmenin sınırlı kaldığı ve sistemin termal doygunluk davranışı sergilediği görüldüğünün temel nedeni, hava tarafında ısı transfer direncinin azalmasına karşın, batarya hücreleri içerisindeki ısı iletimi ve hücre-hava ara yüzündeki temas koşullarının baskın hâle gelmesidir. Yüksek fan hızlarında, hava akışı hücre yüzeyleri boyunca daha hızlı ilerlemekte; buna bağlı olarak sınır tabaka kalınlığı belirli bir seviyenin altına inse bile, hücre içinden yüzeye doğru gerçekleşen ısı iletimi sınırlayıcı faktör hâline gelmektedir. Ayrıca artan hava hızıyla birlikte modül içerisindeki akış yön değiştirmeleri, yerel hız dağılımlarındaki düzensizlikler ve türbülans yoğunluğundaki artış, ısı transferindeki ek kazanımların azalması nedeniyle, fan hızının artırılması her zaman orantılı bir sıcaklık düşüşü sağlamamakta; belirli bir hızdan sonra sistem, geometrik ve fiziksel sınırlamalar nedeniyle doygunluğa yaklaşmaktadır. Bu bulgular, hava soğutmalı BTMS yalnızca fan hızının artırılmasının yeterli olmadığını; hücre dizilimi, hava giriş-çıkış konfigürasyonu ve akış yönlendirme stratejilerinin de soğutma performansını belirleyen kritik tasarım parametreleri olduğunu göstermektedir.

Sıcaklık-zaman grafikleri aracılığıyla elde edilen eğilimlerin daha net karşılaştırılabilmesi amacıyla, her bir hava akış konfigürasyonu ve fan hızı için hücreler arası  $\Delta T$  değerleri ayrıca değerlendirilmiştir.  $\Delta T$ , ölçülen maksimum ve minimum hücre sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanmakta olup batarya modülündeki sıcaklık homojenliğinin nicel bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan Tablo 5, farklı fan hızları ve giriş-çıkış konfigürasyonlarının modül içerisindeki sıcaklık dağılımının hem maksimum sıcaklık hem de hücreler arası ısıl dengesizlikler için duyarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5'te hücreler arası  $\Delta T$  sonuçları, hava akış konfigürasyonlarının ve fan hızlarının batarya modülündeki sıcaklık homojenliği üzerindeki belirleyici etkisi bulunmaktadır. Akış düzenlemeleri özelinde değerlendirildiğinde, 2 giriş-çıkışlı konfigürasyonlarda fan hızının artırılması durumunda yalnızca maksimum sıcaklık değerlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda modül içerisindeki

**Tablo 6.** Farklı hava akış konfigürasyonları ve fan hızları için son durum sıcaklıkları ve etkin ısı transfer katsayısı ( $h_{etkin}$ )  
(Final temperatures and effective heat transfer coefficient ( $h_{etkin}$ ) for different airflow configurations and fan speeds)

| Konfigürasyon       | Fan Hızı<br>(m/s) | $T_{max}$<br>(°C) | $T_{\infty}$<br>(°C) | $\Delta T$<br>(°C) | $h_{etkin}$<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $Nu_{etkin}$ |
|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1g-A / 1ç-C         | 3                 | 34,15             | 26,4                 | 7,75               | 176,96                              | 437,33       |
|                     | 4,5               | 31,49             | 24,7                 | 6,79               | 201,98                              | 499,17       |
|                     | 6                 | 30,6              | 26                   | 4,6                | 298,14                              | 737,21       |
|                     | 7,5               | 31,92             | 25,3                 | 6,62               | 207,16                              | 512,41       |
| 1g-A / 1ç-B         | 3                 | 35,1              | 26,1                 | 5                  | 152,38                              | 376,61       |
|                     | 4,5               | 33,66             | 26,3                 | 7,36               | 186,33                              | 460,52       |
|                     | 6                 | 33,05             | 25,6                 | 7,45               | 184,08                              | 454,96       |
|                     | 7,5               | 32,21             | 24,8                 | 7,41               | 185,08                              | 457,44       |
| 1g-A / 2ç-(B,D)     | 3                 | 36,1              | 26                   | 10,1               | 135,78                              | 335,56       |
|                     | 4,5               | 33,83             | 26,1                 | 7,73               | 177,42                              | 438,47       |
|                     | 6                 | 31,86             | 26,3                 | 5,56               | 246,66                              | 609,63       |
|                     | 7,5               | 30,86             | 24,6                 | 6,26               | 219,08                              | 541,46       |
| 2g-(A,B) / 1ç-C     | 3                 | 34,63             | 26,7                 | 7,93               | 172,95                              | 427,42       |
|                     | 4,5               | 33,41             | 24,7                 | 8,71               | 157,45                              | 389,08       |
|                     | 6                 | 31,77             | 26,7                 | 5,07               | 270,50                              | 668,79       |
|                     | 7,5               | 30,05             | 22,8                 | 7,25               | 189,16                              | 467,49       |
| 2g-(A,B) / 2ç-(C,D) | 3                 | 34,79             | 26,2                 | 8,59               | 159,66                              | 394,54       |
|                     | 4,5               | 33,8              | 26,6                 | 7,2                | 190,48                              | 470,71       |
|                     | 6                 | 33,67             | 24,7                 | 8,97               | 152,90                              | 378,24       |
|                     | 7,5               | 32,2              | 25,8                 | 6,4                | 214,29                              | 529,60       |
| 2g-(A,C) / 2ç-(B,D) | 3                 | 33,26             | 27,2                 | 6,05               | 226,31                              | 559,29       |
|                     | 4,5               | 31,88             | 24,4                 | 7,48               | 183,35                              | 453,25       |
|                     | 6                 | 31,19             | 25,4                 | 5,79               | 236,86                              | 585,38       |
|                     | 7,5               | 30,73             | 25,8                 | 4,93               | 278,18                              | 687,33       |

sıcaklık dağılımını daha dengeli hale getirmektedir. Özellikle yanal kapaklardan konumlandırılan giriş (A,B) ve çıkış (C,D) açıklıklarının, hava akışının modül boyunca daha etkin biçimde yayılmasını sağladığı ve akışın şartlandırma ünitesi içinde belirli bölgelerde yoğunlaşmasını engellediği tespit edilmiştir. Buna karşılık, tek giriş–tek çıkışlı yanal akış düzenlemelerinde hava akışının kısa devre yapma eğilimi gösterdiği ve akışın modülün sınırlı bölgelerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, modülde yer alan bazı hücrelerin havayla sınırlı teması nedeniyle daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına ve buna bağlı olarak hücreler arası sıcaklık farklarının artmasına neden olmaktadır. Elde edilen bu bulgular, BTMS yalnızca fan hızının yeterli bir çözüm olmadığını; hava giriş–çıkış konumları ile akış yönlendirme stratejilerinin de en az hava hızı kadar kritik tasarım parametreleri olduğunu ortaya koymaktadır.

Zorlanmış konveksiyonlu hava soğutmalı BTMS’nde, hava çıkış lokasyonlarının konumu havanın modülden uzaklaştırılma biçimini ve modül içerisindeki akış alanının yapısını, hız dağılımını ve türbülans karakterini direkt olarak etkilemektedir. Tek giriş–tek çıkışlı yanal akış düzenlemelerinde, hava akışının girişten çıkışa doğru en kolay akış yolunu izleme eğilimi göstermesi, hava akışının modülün belirli bölgelerinde yoğunlaşmasına ve bazı hücrelerin sınırlı hava teması altında kalmasına sebep olmaktadır. Akışkanlar mekaniğinde bu durum, akış kısa devresi (flow short-circuiting) olarak tanımlanmakta olup, hücre yüzeyleri etrafında yerel hız gradyanlarının artmasına ve sıcaklık dağılımının bozulmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, çoklu hava çıkış lokasyonlarının kullanıldığı konfigürasyonlarda, hava akışı modül hacmi boyunca daha geniş bir etki alanına yayılmakta ve hücreler arası kanallar boyunca ilerleyerek daha homojen bir hız dağılımı oluşturmaktadır. Bu durum, hücre yüzeyleri yakınında yerel Reynolds sayısının artmasına, sınır tabakanın daha etkin biçimde incelmeye ve buna bağlı olarak konvektif ısı transfer katsayısının yükselmesine yol açmaktadır. Isı transferi bakımından değerlendirildiğinde, çoklu hava çıkışı düzenlemeleri ısınan havanın modül içerisinde birikmesini

önleyerek ısı sınır tabakanın kalınlaşmasını sınırlandırmakta ve hücreler arası sıcaklık farkının azalmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, karşılıklı ve çoklu çıkış konfigürasyonlarının, çıkış sayısına bağlı olarak akış direncinin ve basınç kaybının artabilmesine bağlı olarak fan kaynaklı enerji tüketiminin yükselmesi olasılığı potansiyel bir dezavantajdır. Bu nedenle, hava çıkış lokasyonlarının tasarımı termal performans, akış direnci ve enerji verimliliği kriterlerini birlikte değerlendirilerek ele alınması gereken kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Deneyisel çalışmaların ardından, farklı hava akış hızları ve konfigürasyonları altında elde edilen termal performansın fiziksel temellerini daha iyi açıklayabilmek amacıyla, hava akışının giriş kesitindeki karakteristik özellikleri Reynolds sayıları üzerinden değerlendirilmiştir. Zorlanmış konveksiyon koşullarında batarya modülünün aero-termal davranışını tanımlamak üzere, deneylerde uygulanan hava giriş hızları (3, 4,5, 6 ve 7,5 m/s) esas alınarak hava giriş kanalındaki akış rejimi belirlenmiştir. Reynolds sayısının hesaplanmasında karakteristik uzunluk olarak hava giriş kanalının hidrolik çapı (54 mm) kullanılmış; hava, 25 °C ortam sıcaklığında sabit fiziksel özelliklere sahip Newtonyen ve sıkıştırılmaz bir akışkan olarak kabul edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, hava giriş hızları sırasıyla 3, 4,5, 6 ve 7,5 m/s için Reynolds sayılarının 10.368, 15.552, 20.736 ve 25.920 olduğu belirlenmiştir. Bu Reynolds sayılarının tamamında akışın türbülanslı akış rejimine karşılık geldiği, batarya modülüne giren hava akışının giriş kesitinde çok yüksek momentuma ve güçlü bir karışım etkisine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, zorlanmış konveksiyon koşullarının tüm deneyel çalışma aralığında geçerli olduğunu ispatlamaktadır. Bununla birlikte, giriş kesitinde tanımlanan akış karakteristiği batarya modülü içerisine girildikten sonra hücreler arasındaki dar kanallar, geometrik kısıtlar ve yön değiştiren akış yolları sebebiyle değişime uğramaktadır. Hava akışının batarya hücreleri arasındaki boşluklardaki yön değiştirmesi, düzensiz hız dağılımı ve yerel türbülans şiddetinin artması gibi etkiler, giriş bölgesinde tanımlanan

idealize edilmiş akış varsayımlarının hücre yüzeylerinde gerçekleşen gerçek ısı transferini tam olarak temsil etmesini sınırlandırmaktadır.

Batarya modülünün gerçek çalışma koşullarındaki termal performansını daha doğru biçimde değerlendirebilmek amacıyla, deneysel sıcaklık ölçümlerine dayalı olarak  $h_{\text{etkin}}$  hesaplanmıştır. Bu katsayı, batarya modülünde üretilen toplam ısının, hücre yüzey alanı ve ölçülen ortalama sıcaklık farkı kullanılarak enerji dengesi yaklaşımıyla belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, hücre yüzey sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı arasındaki fark esas alınarak hava akışının modül içerisindeki yön değişimleri, yerel hız farklılıkları, türbülans etkileri ve ek termal dirençler gibi tüm karmaşık etkileşimler dolaylı olarak  $h_{\text{etkin}}$  tanımına dâhil edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen  $h_{\text{etkin}}$  kullanılarak, batarya modülü için etkin Nusselt sayısı ( $Nu_{\text{etkin}}$ ) hesaplanmıştır.  $Nu_{\text{etkin}}$  hesaplanmasında,  $h_{\text{etkin}}$  değeri ile birlikte hava akışının termodinamik özellikleri ve karakteristik uzunluk kullanılmıştır. Bu şekilde tanımlanan  $Nu_{\text{etkin}}$  sayısı, teorik korelasyonlara dayalı idealize edilmiş bir büyüklük olmak yerine batarya modülünün gerçek çalışma koşullarında hücre yüzeylerinde gerçekleşen toplam konvektif ısı transferini temsil etmektedir. Bu yöntem sayesinde, farklı hava akış hızları ve konfigürasyonları altında batarya modülünün termal performansını etkin ısı transfer katsayısı ve etkin Nusselt sayısı üzerinden deneysel olarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılabilir bir çerçevede analiz edilmiştir.

Bu çalışmada  $h_{\text{etkin}}$  belirlenmesinde, batarya modülünün 10 A (1 C) sabit deşarj akımı altında çalıştığı koşullarda ürettiği toplam ısının sabit olduğu kabul edilmiştir. Çalışma akımı ve hücrelerin iç direnci esas alınarak, batarya modülünde açığa çıkan toplam ısı üretimi 48 W olarak değerlendirilmiştir. Isı transferinin gerçekleştiği karakteristik alan, batarya modülünün dış yüzey alanı olarak tanımlanmış ve modülün geometrik ölçütleri dikkate alınarak bu alan 0,035 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.  $h_{\text{etkin}}$  hesaplanmasında, deneylerin kararlı rejiminde ölçülen ortalama hücre yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, her bir hava akış konfigürasyonu ve fan hızı için temel parametre olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen  $h_{\text{etkin}}$  değerleri, hava akış düzeni ve hava hızına bağlı olarak batarya modülünün gerçek çalışma koşullarındaki soğutma performansını nicel olarak temsil etmektedir.  $Nu_{\text{etkin}}$ , batarya modülü etrafındaki dış akışı temsil edecek şekilde karakteristik uzunluk olarak modül yüksekliği (65 mm) ve hava için 25 °C'deki ısı iletim katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Deneylerin kararlı rejiminde elde edilen  $h_{\text{etkin}}$  ve  $Nu_{\text{etkin}}$  değerleri Tablo 6'da sunulmuştur. Bu tabloda yer alan sonuçlar, farklı hava akış konfigürasyonlarının ve fan hızlarının batarya modülünün ısı uzaklaştırma kabiliyeti üzerindeki göreceli etkilerinin doğrudan karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Tablo 6' da sunulan sonuçlar, hava akış konfigürasyonu ve fan hızının batarya modülünün termal davranışı üzerinde belirgin ve karşılaştırılabilir etkiler yarattığını göstermektedir. Tüm konfigürasyonlarda genellikle fan hızının artırılmasıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinde düşüş gözlenmiş, ancak bu düşüş her hız aralığında aynı oranda gerçekleşmemektedir. Özellikle 3 m/s'den 6 m/s'ye geçişte sıcaklık azalması daha belirgin, 6 m/s ile 7,5 m/s arasındaki farkın sınırlı kalmasının nedeni yüksek hava hızlarında soğutma performansının geometrik ve akış kaynaklı sınırlamalardan kaynaklı olarak doygunluğa yaklaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Konfigürasyonlar özelinde değerlendirildiğinde;

- Tek giriş–tek çıkışlı (1g–1ç) düzenlemelerde  $h_{\text{etkin}}$  fan hızına bağlı olarak orta seviyelerde kaldığı, fakat hücreler arası sıcaklık farklarının bazı hızlarda görece yüksek kaldığı görülmektedir. Özellikle 1g-A / 1ç-B konfigürasyonunda 4,5 – 7,5 m/s fan hızları aralığında  $\Delta T$  değerlerinin yakın seviyelerde kalması, hava akışının modül içerisinde homojen şekilde dağılmadığını ve bazı hücrelerin sınırlı soğutma etkisi altında çalıştığını göstermektedir.

- Tek giriş–çift çıkışlı (1g–2ç) düzenlemelerde, modül içerisindeki ısınan havanın daha etkin uzaklaştırılması sayesinde maksimum sıcaklıkların azaldığı ve  $h_{\text{etkin}}$  değerlerinin özellikle orta ve yüksek fan hızların gözle görülür biçimde arttığı görülmektedir. Düşük fan hızında (3 m/s) ise bu konfigürasyonda  $\Delta T$  değerinin diğer hızlara göre yüksek olması, çoklu çıkışın tek başına yeterli olmadığını ve giriş fan hızı koşullarının da sıcaklık homojenliği üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.
- Çift giriş–tek çıkışlı (2g–1ç) konfigürasyonlarda, modül içerisine hava akışının daha yayılı şekilde girmesi sayesinde orta hızlarda (6 m/s) maksimum sıcaklık ve  $\Delta T$  değerlerinde belirgin iyileşme sağlandığı görülmeye rağmen çıkış sayısının sınırlı olması, yüksek hızlarda akışın modülün içinde ısı birikmesine ve  $h_{\text{etkin}}$  artışının sınırlanmasına neden olmuştur.
- Çift giriş–çift çıkışlı (2g–2ç) konfigürasyonlarda ise karşılıklı yerleştirilmiş giriş–çıkış düzenlemelerinde en dengeli termal performansın elde edildiği görülmektedir. Diğer konfigürasyonlara göre bu konfigürasyonlarda, maksimum sıcaklık değerleri görece düşük seviyelerde ve  $\Delta T$  değerleri ise daha sınırlı gerçekleşmiştir. Bununla birlikte,  $h_{\text{etkin}}$  değerlerinin özellikle 6 ve 7,5 m/s fan hızlarında daha yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durum, modül boyunca ısınan havanın yüksek hava akışı sayesinde daha homojen bir şekilde süpürüldüğünü ve hücre yüzeyleriyle daha etkin temas ettiğini göstermektedir.

$h_{\text{etkin}}$  ve  $Nu_{\text{etkin}}$  değerleri, batarya modülünün zorlanmış hava soğutma koşulları altındaki gerçek aero-termal davranışını açıkça ortaya koymaktadır. Genel olarak fan hızının artmasıyla birlikte  $h_{\text{etkin}}$  ve  $Nu_{\text{etkin}}$  değerlerinde artış eğilimi gözlenmiş; ancak bu artışın büyüklüğünün, sadece hava hızına değil, aynı zamanda hava akış konfigürasyonuna ve modül içerisindeki akış düzenine güçlü biçimde bağlı olduğu görülmektedir. Özellikle çoklu giriş–çıkış ve karşılıklı akış düzenine sahip konfigürasyonlarda, hava akışının modül genelinde daha homojen dağılması sayesinde  $h_{\text{etkin}}$  ve  $Nu_{\text{etkin}}$  değerlerinin gözle görülür biçimde yükseldiği görülmektedir. Bu durum, batarya hücrelerinin yüzeyleriyle hava akışının daha etkin temas etmesinin konvektif ısı transferini doğrudan güçlendirdiğini göstermektedir. Buna karşılık, tek yönlü veya yanal akış profiline sahip düzenlemelerde, benzer fan hızlarında dahi  $h_{\text{etkin}}$  ve  $Nu_{\text{etkin}}$  değerlerinin daha düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, modül içerisindeki akışın düzensizliği, yerel hız farklılıkları ve sınırlı yüzey teması gibi etkilerin ısı uzaklaştırma performansını sınırlandırdığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, hem  $h_{\text{etkin}}$  hem de  $Nu_{\text{etkin}}$  değerleri birlikte değerlendirildiğinde, batarya modülünün soğutma performansının hava giriş hızının yanında, hava akışının modül içindeki dağılım karakterine ve hücre yüzeyleriyle olan etkileşimine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, zorlanmış hava soğutmalı BTMS tasarımında, fan hızının artırılmasının yanı sıra, akış konfigürasyonunun ve giriş–çıkış düzenlemesinin optimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Bu bölümde elde edilen deneysel ve matematiksel bulgular, zorlanmış konveksiyon altında çalışan silindirik tip LiB modüllerinde aero-termal performansın, yalnızca fan hızına değil, hava akışının modül içerisindeki yönlendirilme biçimine güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir. Çoklu ve karşılıklı giriş–çıkış konfigürasyonları, daha düşük maksimum sıcaklıklar ve daha homojen sıcaklık dağılımları sağlayarak soğutma etkinliğini artırmıştır. Teorik ve deneysel ısı transfer katsayılarının birlikte değerlendirilmesi, hava akış konfigürasyonunun gerçek soğutma performansını belirleyen temel tasarım parametrelerinden biri olduğunu ortaya koymuştur.

#### 4. Simgeler (Symbols)

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| A              | : Batarya modülünün dış yüzey alanı (m <sup>2</sup> ) |
| D <sub>h</sub> | : Hidrolik çap (m)                                    |

|              |                                              |
|--------------|----------------------------------------------|
| $h$          | : Teorik ısı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ ) |
| $h_{etkin}$  | : Etkin ısı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ )  |
| $I$          | : Şarj/deşarj akımı (A)                      |
| $k$          | : Isıl iletkenlik katsayısı ( $W/mK$ )       |
| $L$          | : Karakteristik uzunluk (m)                  |
| $\dot{Q}$    | : Batarya modülünde üretilen ısı miktarı (W) |
| $Re$         | : Reynolds sayısı                            |
| $Nu$         | : Nusselt sayısı                             |
| $T_{max}$    | : Maksimum sıcaklık ( $^{\circ}C$ )          |
| $T_{min}$    | : Minimum sıcaklık ( $^{\circ}C$ )           |
| $T_{\infty}$ | : Ortam sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )            |
| $\Delta T$   | : Sıcaklık farkı ( $^{\circ}C$ )             |
| $V$          | : Fan hızı (m/s)                             |

#### 4.1. Yunan Harfleri (Greek symbols)

|        |                            |
|--------|----------------------------|
| $\rho$ | : Yoğunluk ( $kg/m^3$ )    |
| $\mu$  | : Dinamik viskozite (Pa.s) |

#### 4.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| EV   | : Elektrikli araçlar                |
| BEV  | : Tam elektrikli araçlar            |
| HEV  | : Hibrit elektrikli araçlar         |
| PHEV | : Fişli hibrit elektrikli araçlar   |
| LiB  | : Lityum iyon bataryalar            |
| BTMS | : Batarya termal yönetim sistemleri |
| SEI  | : Katı elektrolit ara fazı          |

### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan silindirik tip LiB 4 seri 3 paralel dizilimi ile oluşturulan batarya modülünün zorlanmış konveksiyonlu hava soğutması, farklı hava akış konfigürasyonları ve fan hızları altında deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kapalı sistem ve doğal taşınım koşullarının yüksek akımlarda yetersiz kalmasından dolayı uygulanan zorlanmış hava soğutma sisteminin batarya modülünün maksimum sıcaklığını belirgin biçimde düşürdüğü ve modülün termal kararlılığı iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Fan hızının artırılmasıyla genel olarak modül sıcaklığının azaldığı ancak bu azalmanın her hız aralığında aynı oranda gerçekleşmediği görülmüştür.
- Batarya modülünün aero-termal performansında hava akış konfigürasyonunun, fan hızı kadar belirleyici olduğu görülmüştür. Çoklu ve karşılıklı giriş-çıkışa sahip düzenlemeler daha düşük maksimum sıcaklık ve daha homojen sıcaklık dağılımları sağlayarak soğutma etkinliğini artırmıştır.
- Karşılıklı ve simetrik hava akış konfigürasyonlarının  $\Delta T$  ve sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde iyileştirdiği, tek yönlü veya yanal akış düzenlemelerinde ise bazı hücrelerin sınırlı hava teması nedeniyle daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür.
- Giriş kesitindeki akış koşullarına bağlı olarak hesaplanan teorik  $h$ , sistemin potansiyel soğutma kapasitesine ilişkin bir referans sunmakta olup, batarya modülünün gerçek çalışma koşullarını tam olarak temsil etmemektedir. Deneysel sıcaklık ölçümlerine dayalı olarak hesaplanan  $h_{etkin}$ , hava akışının modül içindeki yön değiştirmeleri, yerel hız farklılıkları ve ek termal dirençleri içeren gerçek aero-termal performansı daha doğru biçimde yansıtmaktadır.
- Teorik  $h$  ve  $h_{etkin}$  birlikte değerlendirilmesi, zorlanmış hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde tasarım sürecinin fan kapasitesine, hava giriş-çıkış konumları ve akış yönlendirme stratejilerine odaklanması gerekmektedir.

Sonuç olarak, silindirik tip LiB modüllerinde zorlanmış konveksiyonlu hava soğutmanın etkinliğinin artırılmasında hava akış konfigürasyonunun ve fan hızının kritik bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir. Elde edilen deneysel bulgular, elektrikli araç BTMS daha güvenli, homojen ve verimli şekilde tasarlanmasına yönelik önemli mühendislik çıkarımları sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, modül içi akış alanının detaylı olarak incelenmesi ve fan enerji tüketiminin deneysel olarak ölçülmesi, aero-termal performansın enerji verimliliği perspektifinden daha kapsamlı değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

### Kaynaklar (References)

- Çevik Bektaş S., Altaş İ., Multi-objective day-ahead optimal energy scheduling of a grid connected distribution network consisting of renewable energy sources and storage units, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40 (2), 1335-1346, 2025.
- Lahnaoui A., Wulf C., Heinrichs H., Dalmazzone D., Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia, Appl. Energy, 223, 317-328, 2018.
- Peneklioglu K., Bilen K., Investigation of cooling an electric vehicle battery module using water by considering effect of contact resistance, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (4), 2587-2600, 2024.
- Herzog A.V., Lipman T.E., Kammen D.M., Renewable energy sources, University of California, Berkeley, USA, 2001.
- Lyu Y., Siddique A.R.M., Majid S.H., Biglarbegian M., Gadsden S.A., Mahmud S., Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling, Energy Rep., 5, 822-827, 2019.
- Koyama R. et al., Thermophysical properties of trimethylolethane hydrate as phase change material for cooling lithium-ion battery in electric vehicle, J. Power Sources, 427, 70-76, 2019.
- Natkunarah N., Scharf M., Scharf P., Scenarios for the return of lithium-ion batteries out of electric cars for recycling, Procedia CIRP, 29, 740-745, 2015.
- Wei Y., Agelin-Chaab M., Development and experimental analysis of a hybrid cooling concept for electric vehicle battery packs, J. Energy Storage, 25, 100906, 2019.
- Bai F., Chen M., Song W., Li Y., Feng Z., Li Y., Thermal performance of pouch lithium-ion battery module cooled by phase change materials, Energy Procedia, 158, 3682-3689, 2019.
- Akkuş F., Işık M.Z., A review of thermal management systems of lithium-ion batteries used in electric vehicles, J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.), in press, 2025.
- Akkuş F., Işık M.Z., Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların hava, sıvı ve ısı borulu termal yönetim sistemlerinin incelenmesi, Batman Univ. J. Life Sci., 13 (2), 36-54, 2023.
- Li X., Wang Z., Zhang L., Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles, Energy, 174, 33-44, 2019.
- Akcıl M., Ekici M.B., Study of the effect of calendaring parameters on physical and electrochemical properties in lithium-ion battery electrodes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (3), 1427-1438, 2024.
- Jones N., The new car batteries that could power the electric vehicle revolution, Nature, 626 (7998), 248-251, 2024.
- Bulut E., Elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemlerinin optimum tasarımı, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2022.
- Liu S., Zhang T., Zhang C., Yuan L., Xu Z., Jin L., Non-uniform heat generation model of pouch lithium-ion battery based on regional heat generation rate, J. Energy Storage, 63, 107074, 2023.
- Xu J., Chen Z., Qin J., Minqiang P., A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs, Appl. Therm. Eng., 203, 117871, 2022.
- Yang W., Zhou F., Chen X., Li K., Shen J., Thermal performance of honeycomb-type cylindrical lithium-ion battery pack with air distribution plate and bionic heat sinks, Appl. Therm. Eng., 218, 119299, 2023.

19. Malik M., Dincer I., Rosen M.A., Mathew M., Fowler M., Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling, *Appl. Therm. Eng.*, 129, 472-481, 2018.
20. Ling Z. et al., Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 31, 427-438, 2014.
21. Huang Y. et al., A novel approach for lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates, *Appl. Therm. Eng.*, 157, 113623, 2019.
22. Kshetrimayum K.S., Yoon Y.G., Gye H.R., Lee C.J., Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system, *Appl. Therm. Eng.*, 159, 113797, 2019.
23. Liu H., Wei Z., He W., Zhao J., Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review, *Energy Convers. Manag.*, 150, 304-330, 2017.
24. Liu S. et al., Thermal equalization design for the battery energy storage system of a fully electric ship, *Energy*, 312, 133611, 2024.
25. Rao Z., Wang S., A review of power battery thermal energy management, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15 (9), 4554-4571, 2011.
26. Akinlabi A.A.H., Solyali D., Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 125, 109815, 2020.
27. Akkuş F., Işık M.Z., Üçgen dizilim geometrisine sahip batarya paketlerinde farklı soğutucu akışkanların termal etkilerinin deneysel ve sayısal analizi, *Gazi Univ. J. Sci. Part C*, in press, 2025.
28. Ye Y., Saw L.H., Shi Y., Tay A.A.O., Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging, *Appl. Therm. Eng.*, 86, 281-291, 2015.
29. Zhang W., Qiu J., Yin X., Wang D., A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material, *Appl. Therm. Eng.*, 165, 114571, 2020.
30. Xu X., Li W., Xu B., Qin J., Numerical study on a water cooling system for prismatic LiFePO<sub>4</sub> batteries at abused operating conditions, *Appl. Energy*, 250, 404-412, 2019.
31. Al-Zareer M., Dincer I., Rosen M.A., A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems, *Energy Convers. Manag.*, 187, 191-204, 2019.
32. Bais A., Subhedar D., Panchal S., Experimental investigations of a novel phase change material and nano enhanced phase change material based passive battery thermal management system, *J. Energy Storage*, 103, 114395, 2024.
33. Farouk N., Alotaibi A.A., Alshahri A.H., Almitani K.H., Challenges in incorporating phase change materials into thermal control units for lithium-ion battery cooling, *J. Energy Storage*, 49, 104094, 2022.
34. Mustafa J., Effect of inlet and outlet size, battery distance, and air inlet and outlet position on the cooling of a lithium-ion battery pack, *J. Energy Storage*, 46, 103826, 2022.
35. Kök C., Alkaya A., Numerical investigation of different cooling applications for pouch type lithium ion battery cells, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 381-398, 2022.
36. Uzal H., Şener R., Oktay H., Elektrikli araçlarda hava giriş konumu ve hızının batarya soğutma performansına etkisinin araştırılması, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, 35 (1), 116-124, 2023.
37. Özbektaş S., Sungur B., Kaleli A.R., Zorlanmış hava soğutma esaslı lityum bazlı silindirik bir batarya hücresinin ısı dağılım performansının nümerik incelenmesi, *Karadeniz Fen Bil. Derg.*, 14 (3), 1586-1603, 2024.
38. Zhang S., Nie F., Cheng J., Yang H., Gao Q., Optimizing the air flow pattern to improve the performance of the air-cooling lithium-ion battery pack, *Appl. Therm. Eng.*, 236, 121486, 2024.

