

RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Elektrikli Araçlarda Hava Giriş Konumu ve Hızının Batarya Soğutma Performansına Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Air Inlet Position and Velocity on Battery Cooling Performance in Electric Vehicles

Hasan UZAL¹ , Ramazan ŞENER² , Hasan OKTAY³ 

¹ Şırnak Üniversitesi, Şırnak MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü, Şırnak, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

³ Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, hava giriş konumu ve hızının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları kullanılarak elektrikli araçlarda nikel-metal hidrür (Ni-MH) batarya paketinin soğutma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elektrikli araçlara olan talebin artması, araçların güvenliğini sağlamak için gelişmiş batarya soğutma performansına ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Ni-MH batarya takımının soğutma performansı, batarya takımının 0 ila 60 mm arasında değişen giriş konumları ve sabit çıkış konumu ile hem U hem de Z kanalı geometrilerinde analiz edilmiştir. Hava giriş hızları 2 ila 6 m/s arasında değişmektedir. Sonuçlar, hava giriş konumu arttıkça sıcaklık değerlerinin düştüğünü, ancak 30 mm'lik giriş konumundan sonra düşüşün önemsiz hale geldiğini göstermektedir. Bu, hava akışını batarya takımını tamamen dolaştırmaya ve ısı transfer hızını arttırmaya yönlendirmenin, hızı arttırmaktan daha etkili olduğunu göstermektedir. En iyi soğutma performansının sırasıyla 316,86-327,75 K ve 316,27-317,46 K sıcaklık değerleri ile hem U hem de Z tipi kanallar için, 30 ve 60 mm giriş konumunda ve 6 m/s hızında olduğu bulunmuştur. Ek olarak, Z-tipi kanalın U-tipi kanaldan yaklaşık %6 daha fazla ısıyı dağıttığı görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, elektrikli araçlarda batarya ısı yönetim sistemlerinin (BIYS) enerji verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Havayı daha düşük hızlarda yönlendirerek, soğutma sisteminin enerji tüketimi azaltılabilir ve gerekli soğutma performansı korunabilir. Bu durum, elektrikli araçların menzilin artmasına ve performansının gelişmesine yol açacaktır. Böylelikle, çalışma aynı zamanda elektrikli araçlarda soğutma performansını optimize etmek ve araçların genel enerji verimliliğini artırmak için kullanılacak batarya paketi düzeninin tasarımı hakkında da fikir vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya ısı yönetim, elektrikli araç, HAD, soğutma performansı

Abstract

This study examines the effect of air inlet location and velocity on the cooling performance of a nickel-metal hydride (Ni-MH) battery pack in electric vehicles (EVs) using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The increasing demand for EVs has led to a need for improved battery cooling performance in order to ensure the safety of the vehicles. The cooling performance of the Ni-MH battery pack was analyzed in both U- and Z-channel geometries, with varying input positions of the battery pack from 0 to 60 mm and constant output positions. The air intake velocities were also varied between 2 and 6 m/s. The results show that as the air intake position increases, the temperature values decrease, but the decrease becomes insignificant after the 30 mm position. This suggests that directing the air flow to fully circulate the battery pack and increase the heat transfer rate is more effective than increasing the velocity. The best cooling performance was found to be at 30- and 60-mm inlet position and 6 m/s velocity for both U- and Z-type channels, with temperature values of 316.86-327.75 K and 316.27-317.46 K respectively. Additionally, the Z-type channel was found to dissipate approximately 6% more heat than the U-type channel. The study's results can be used to improve the energy efficiency of battery thermal management systems (BTMS) in EVs. By directing the air at lower velocities, the energy consumption of the cooling system can be reduced while still maintaining the required cooling performance. This will ultimately lead to the extended range and improved performance of EVs. Additionally, the study also provides insight into the design of the battery pack layout in EVs, which can be used to optimize the cooling performance and improve the overall energy efficiency of the vehicles.

Keywords: Battery thermal management, Electric vehicles, CFD, Cooling performance

I. GİRİŞ

Ulaşımında fosil yakıt kullanımına bağlı olarak, giderek artan çevre kirliliği, sera gazı emisyonları gibi sebeplerden dolayı elektrikli ve hibrit elektrikli araç kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [1,2]. Elektrikli araçlarda Lityum-iyon, Nikel-Kadmium ve Nikel-Metal Hidrür (Ni-MH) gibi batarya grupları güç kaynağı olarak kullanılmaktadır [3-5]. Batarya hücreleri birbirlerine küçük boşluklarda modüler formatta

bağlanarak batarya paketi oluşturulmakta ve araç içerisinde kullanılmaktadır [6]. Bataryaların şarj ve deşarjı esnasında kimyasal reaksiyonlardan dolayı ortaya ısı üretimi çıkmakta ve bu ısı elektrikli aracın çalışması esnasında dağıtılmazsa, bataryanın performansını ve ömrünü etkilemektedir [7–9]. Bu nedenle batarya paketinin etkin olarak soğutulması gerekmektedir.

Batarya soğutma yöntemleri genel olarak hava soğutma ve sıvı soğutma olarak ikiye ayrılmaktadır [6]. Hava soğutması düşük maliyeti ve güvenilirliği açısından yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Doğal ve basınçlı hava ile soğutma olarak ikiye ayrılmakta ve basınçlı hava ile soğutma yöntemi yaygın olarak bataryaların soğutulmasında kullanılmaktadır [11–13]. Li ve ark. [14], deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile lityum-iyon pillerin soğutma performanslarını çeşitli hızlarda inceleyerek, bataryaların yerleştirilme durumuna göre çoklu optimizasyonun batarya paketinin sıcaklık farkını düşüreceğini belirtmiştir. Jiaqiang ve ark. [15], 60 hücreden oluşan Li-iyon batarya grubunun hava giriş ve çıkışlarına bağlı olarak en iyi soğutma performansını HAD yöntemi ile tek yığın hücre modeli kullanarak araştırmış ve hava akış hızlarında giriş ve çıkış konumlarına bağlı olarak bölme kullanılmasının soğutma performansını artırdığını belirtmiştir. Sefidan ve ark. [16], geliştirdikleri nanoakışkan temelli soğutma ile silindirik lityum-iyon bataryanın hava ile soğutulması ile hücrelerin etkili bir şekilde maksimum sıcaklığını düşüğünü deneysel ve HAD yöntemi ile belirtmiştir. Behi ve ark. [17], oluşturduğu hibrid sistemle, piller arası mesafe, ortam sıcaklığı ve hava giriş hızının etkilerini silindirik lityum-iyon pilleri için deneysel ve HAD yöntemi ile belirlemiştir. Xu ve ark. [10], U-biçimli bir kanal içerisinde bulunan batarya grubunun çeşitli giriş konumlarına ve hızlarına göre soğutma performansını HAD yöntemi ile incelemiştir. Hong ve ark. [18], Z- tipi kanal içerisine yerleştirilen pil grubunun soğutma performansını HAD yöntemi ile incelediğinde, ikinci hava çıkışının sıcaklığı önemli ölçüde düşüğünü bildirmişlerdir. Chen ve ark. [3], Z biçimli kanal içerisine yerleştirilmiş batarya grubunda piller arası mesafenin dağılımının soğutma performansına olan etkisini araştırmışlardır. Shen ve ark. [19], Z- biçimli kanal içerisine yerleştirilen prizmatik pil gruplarının çeşitli açılarda soğutma performansını HAD yöntemiyle araştırmışlar ve pil açısı değiştiğinde, hava hızının arttığı ve sıcaklığın üniform olarak dağıldığını belirtmişlerdir. Park [20], çalışmasında hava soğutmalı Li-iyon batarya grubunun U ve Z tipi kanallar için çeşitli hava dağılımlarında hava soğutma performansını HAD yöntemi ile araştırarak, ısı verimliliğini basınç ve giriş konumunu değiştirerek karşılaştırmıştır. Xun ve ark. [21], Li-iyon batarya paketinin düz tabaka ve silindirik yığınlarının ısı performansını HAD yöntemi ile incelemiş ve karşı akış veya ortak akış düzenlemesi

ile akış yönünün periyodik olarak değiştirilmesinin termal yönetimi iyileştirebileceğini önermektedir. Yang ve ark. [22], silindirik pillerin, çeşitli konfigürasyonlarında soğutma performansını HAD yöntemi ile incelemiştir. Li ve ark. [23], U- tipi kanal geometrisine sahip batarya grubunda, pillerin konumunun soğutma performansına olan etkisini HAD yöntemi ile araştırmış ve kanal akış hızı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Liu ve Zhang [24], Z ve U- tipi kanal tipinden elde ettiği J-biçimli kanalı tasarlamışlardır. Sonuçlar, U-, Z- ve J-tipi için sıcaklık artışında sırasıyla %35,3, %46,6 ve %31,18 azalma olduğunu göstermiştir. Sabit konstrüksiyonlu U-tipi ve Z-tipi soğutma yönteminin, küçük batarya paketlerinin ihtiyaçlarını karşılayabildiği, U-tipi soğutma yönteminin sıcaklığa duyarlı durumlar için daha uygunken, Z tipinin enerji verimliliğine duyarlı durumlar için daha uygundur. J-tipi BTMS, soğutma gereksinimlerine göre ayarlanabilen büyük pil takımı için daha esnek ve daha uygun olduğu ancak yüksek enerji tüketimine sahip olduğu bildirilmiştir.

Elektrikli araçlarda batarya ısı yönetim sistemleri (BIYS), aracın performansını ve sürüş menzilini etkilemesinin yanı sıra bataryanın ömrünü etkileyen en önemli parametredir. Batarya soğutma veriminin iyileştirilmesi, yüksek sıcaklıktan dolayı patlama riskini azaltmak ve batarya ömrünü artırmak için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle BIYS konusunda çeşitli araştırmalar ve çalışmalar mevcuttur. İlgili literatür incelendiğinde yapılan çalışmalar, farklı şekiller üzerinde çeşitli hava giriş ve çıkış konumuna bağlı olarak çeşitli geometriler üzerinde yapılmıştır. Giriş konumunun değiştirilerek, çeşitli hızlarda soğutma performansına olan etkisi ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Çeşitli giriş konumu yüksekliğinde, hava giriş hızının soğutma performansını araştırmak için çalışmamızda; U- ve Z-biçiminde kanal içerisine yerleştirilmiş 24 adet Ni-MH pil grubundan oluşan batarya takımının soğutma performansı nümerik olarak incelenmiştir. U- ve Z-biçimli kanal içerisinde bulunan batarya grubunun çeşitli hava giriş konumu ve hızına göre soğutma performansı incelenmiş ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu giriş konumunun yerden yüksekliği arttıkça sıcaklık değerlerini değiştirdiği gözlemlenmiştir.

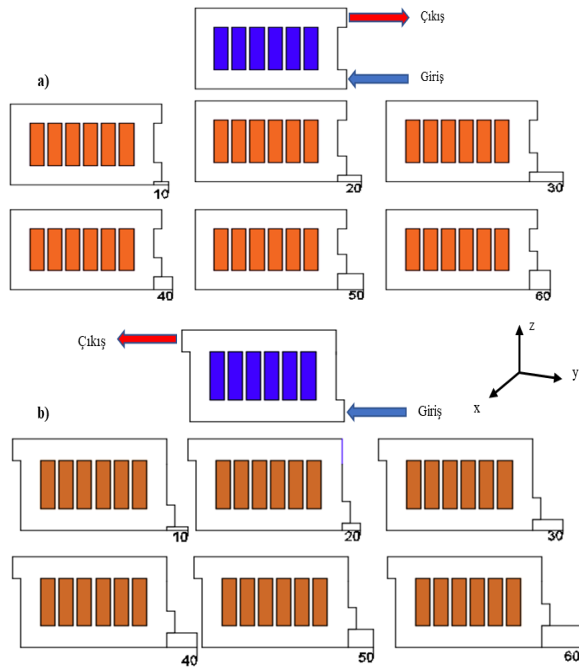
II. SAYISAL YÖNTEM

2.1 Kanal Geometrisi

U- ve Z- tipi kanalların ölçüleri Tablo 1 ve 2'de verilmektedir. Şekil 1'de hava giriş ve çıkışları gösterilmektedir. Giriş ve çıkış ölçüleri 20 mm×210 mm×60 mm, hava giriş konumu yüksekliği 0-60 mm arasında değişmekte, çıkış kısmı ise sabit kalmaktadır. Batarya ve duvarlar arası boşluklar x, y ve z yönlerinde sırasıyla 20 mm, 40 mm ve 60 mm'dir.

Tablo 1. U- ve Z- tipi kanal ölçüleri

Ölçüler	Değer (mm)
Uzunluk	360
Genişlik	210
Yükseklik	250
Giriş uzunluğu	20
Giriş yüksekliği	60
Giriş genişliği	210
Çıkış uzunluğu	20
Çıkış yüksekliği	60
Çıkış genişliği	210

**Şekil 1.** a) U- tipi b) Z- tipi kanal geometrisi ölçüleri**Tablo 2.** Batarya ölçüleri

Ölçüler	Değer (mm)
Pil çapı	35
Yükseklik	130
Batarya arası boşluk	10

2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

HAD analizi, ısı ve akışkanlar alanında önemli bir araştırma alanıdır. Analiz ve deney yoluyla doğrulama yöntemi olarak [25], zaman ve paranın yanı sıra çok fazla deneme yanılma ile optimum çalışma şartlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Soğutma veriminin hesaplanabilmesi için öncelikle hız ve sıcaklık dağılımları belirlenmelidir. Bu çalışmada ANSYS Fluent yazılımı HAD analizi için kullanılmıştır. HAD uygulamalarında, hava, belirli bir hız değerine kadar sıkıştırılmaz olarak kabul edilebilmektedir. Türbülans akışı hesaplamak için Navier-Stokes denklemleri ile k-ε türbülans modeli kullanılmıştır ve benzer problemler için k-ε türbülans

modeli yaygın olarak kullanılmaktadır [26,27]. Batarya ısı üretim oranı, pillerin şarj/deşarj oranı, hücre sıcaklığı, şarj durumu ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Süreklilik denklemi [18,28];

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi [18,28];

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

Türbülans k-ε modeli [18,28];

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{\mu_1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\mu_1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Burada k ve ε türbülans kinetik enerjisi ve enerji dağıtım oranı olarak geçmektedir. μ ve μ_t moleküler dinamik viskozite ve türbülans dinamik viskozite katsayılarıdır. σ_k, σ_ε, σ_T ve C_μ k-ε türbülans modeli parametreleridir. Yaygın olarak kullanılan değerler; C_μ = 0,09, C₁ = 1,4, C₂ = 1,92, σ_k = 1,0, σ_ε = 1,3, σ_T = 0,85 olarak kullanılmaktadır [3]. Hava ve batarya bölgesi için enerji denklemleri;

$$\rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda_a + \frac{\mu_1}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x_j} \right) + \phi_b = 0 \quad (7)$$

olarak verilebilir [18]. Burada ρ, c_p ve T değerleri havanın yoğunluk, özgül ısı ve sıcaklık değerlerini temsil etmektedir. λ_b, T_b, φ_b değerleri ise bataryanın ısı iletkenlik katsayısı sıcaklık ve toplam ısı üretim oranını göstermektedir. Pillerde aşırı gerilimden dolayı meydana gelen ısı üretimi Q₁, elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı entropi değişimi Q₂ ve Ni-MH bataryada şarj vedeşarj işlemi boyunca meydana gelen H₂-O₂ reaksiyonu boyunca açığa çıkan entalpi değişimi Q₃ aşağıdaki denklemleri ile ifade edilmektedir [29,30];

$$Q_1 = I^2 R \quad (8)$$

$$Q_2 = \sum_i T_b \frac{\Delta S_i}{N_i F} I_i \quad (9)$$

$$Q_3 = \sum_k \frac{\Delta H_k}{N_k F} I_k \quad (10)$$

$$\varphi_b = \frac{4(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{\pi d^2 h} \quad (11)$$

Burada I şarj veya deşarj akımı, T_b batarya sıcaklığı, ΔS_i entropi değişimi, ΔH_j entalpi değişimi, I_j ve I_k , i ve j yönlerinde meydana gelen reaksiyon akımlarını, φ_b bataryada meydana gelen ısı üretimini belirtmektedir.

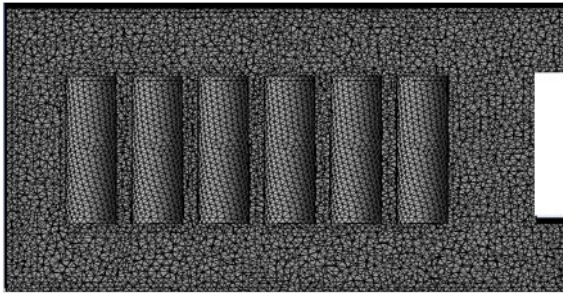
2.3 Çözüm Ağı ve Çözüm Metodu

Çözüm ağı (mesh) işlemi için baskın hesaplama tetrahedral metodu seçilmiştir. U- ve Z- tipi kanal için çözüm ağı Şekil 2'de görülmektedir. Hız girişi, basınç çıkışı ve adyabatik duvar koşulları, hava-batarya arayüzü için ise birleştirilmiş duvar koşulları belirlenmiştir. HAD (ANSYS Fluent) ile giriş konumu ve giriş havası hızının soğutma performansına olan etkisini araştırmak için kararlı durum sayısal simülasyonu kullanılmıştır. Basınç-hız bağlantı şeması SIMPLE, yönetim denklemlerinin difüzyon ve konveksiyon terimleri second-order upwind olarak seçilmiştir. İlgili değerler giriş hızları çıkış ve duvar değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

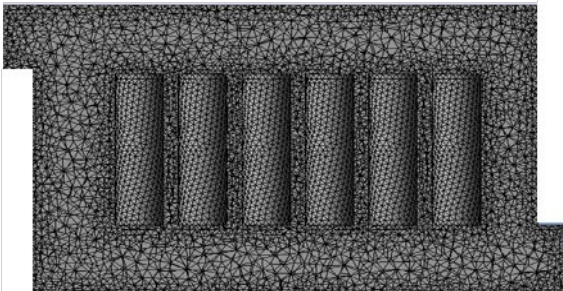
Tablo 3. Sınır Koşulları

Tipi	Değerler
Giriş	Hız: 2-6 m/s Sıcaklık: 298 K Türbülans yoğunluğu: %5 Türbülans viskozitesi oranı: %10
Çıkış	Çıkış basıncı: 1 atm
Duvar	Isı akısı: sıfır
Batarya ısı üretimi	551 W/m ³
Batarya ısı akısı	280 W/m ²

a) U- tipi kanal



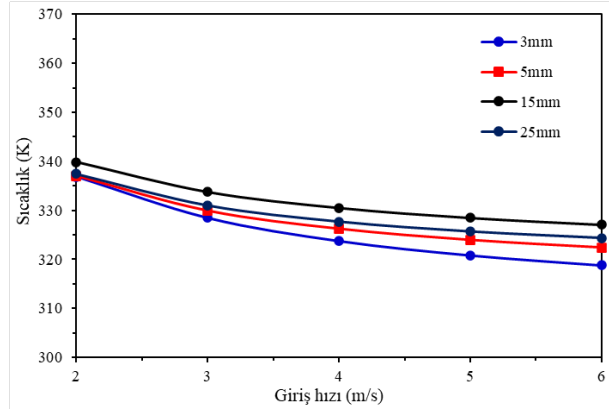
b) Z- tipi kanal



Şekil 2. a) U- ve b) Z- tipi kanalda çözüm ağı yapısı

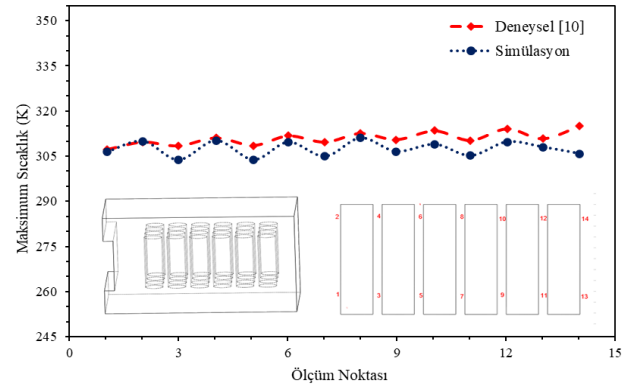
2.4 Çözüm Ağı Doğrulama İşlemi

Çözüm ağı oluşturma aşamasında baskın hesaplama metodu tetrahedral metodu seçildikten sonra, hücre boyutu çeşitli ölçülerde alınarak, elde edilen ölçümler değerlendirilmiş ve gerçek değerlere en yakın değerler seçilmiştir. Mesh işleminde hücre boyutu değeri 3, 5, 15 ve 25 mm değerleri alınarak U- tipi kanal içerisinde 2 ila 6 m/s hızlarda sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Şekil 3'te belirtilen değerlere göre 3 m/s hızında 3 mm ve 5 mm hücre boyutu değerleri arasındaki sıcaklık farkı 1,43 K ve 6 m/s hızındaki hata payı %1,11 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle HAD işlemleri 5 mm hücre boyutu değeri baz alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Hücre boyutuna göre sıcaklık değerleri

U- tipi kanal için 3 m/s hızında Tablo 3 ve 4'te verilen sınır koşulları ve ısıl fiziksel özelliklere göre yapılan çalışma sonucu deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir [10]. Deneysel olarak elde edilen veriler ile maksimum sıcaklık değişimi 307-314,76 K arasında iken, simülasyon sonuçlarımıza göre farklı ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri 303,74-311 K arasında değişmektedir (Şekil 4). Deneysel sonuçlara göre bağıl hata %1-1,17 arasında değişmekte ve simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Deneysel uygulamalarda şarj ve deşarj esnasında batarya paketinin ısı üretimi artmaktadır. Simülasyonda ise ısı üretim miktarı sabit bir değer olarak alındığı için, simülasyon sıcaklığı, deneysel sonuçlara göre biraz daha düşük çıkabilmektedir [10].



Şekil 4. Çeşitli noktalardan alınan deneysel ve simülasyon sıcaklık değerleri

Tablo 4. Termofiziksel özellikler

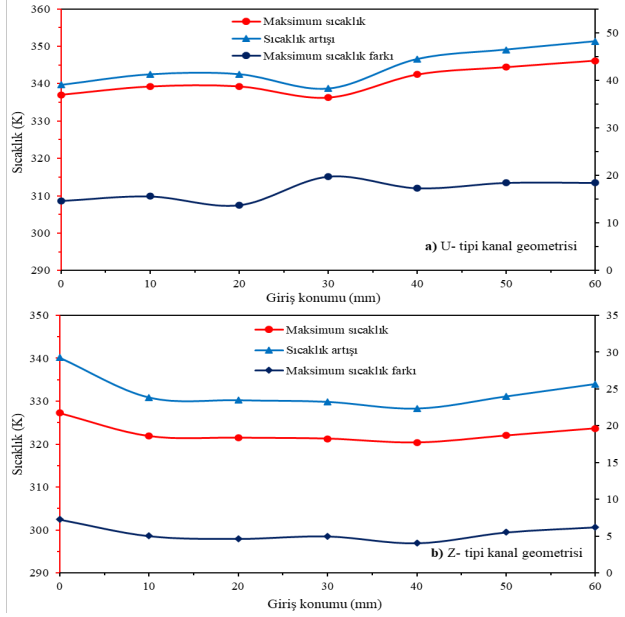
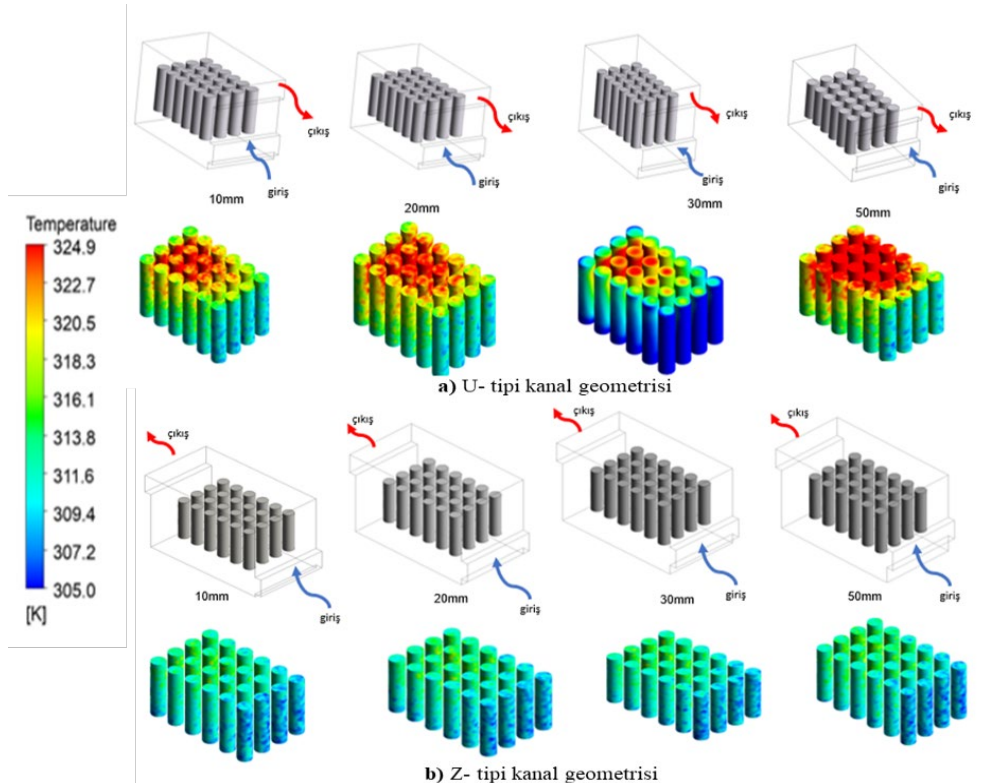
	Hava	Batarya	Batarya Kutusu
Yoğunluk (kg/m ³)	1,225	1958,7	7930
Özgül ısı (J/kg·K)	1006,43	733	500
Isı iletkenlik katsayısı (W/m·K)	0,0242	1,5	16,3
Dinamik viskozite (kg/m·s)	1,7894 × 10 ⁻⁵	-	-

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Giriş konumunun batarya soğutmasına olan etkisi

U- ve Z- tipi hava soğutma kanalının giriş kısmı 0-60 mm giriş kısmından soğutma performansına olan etkisi Şekil 5'te verilmektedir. Maksimum sıcaklık giriş konumuna göre çeşitli hızlarda (2-6 m/s) elde edilen en yüksek sıcaklık değerini, sıcaklık artışı ilk sıcaklık değerine göre farkı ve maksimum sıcaklık farkı ise en yüksek ve en düşük sıcaklık farkı ifadelerini temsil etmektedir. Şekil 6'da giriş konumlarına göre, batarya paketinde pillerin sıcaklık dağılımları verilmektedir. Sıcaklık değerleri U- tipi kanal akışında genel olarak önce artış, azalış ve daha sonra tekrar artış şeklinde meydana gelmektedir. Şekil 5 ve 6-a'da görüldüğü gibi, dairesel silindirlerin etrafındaki akışın neden olduğu hava akış hızı, batarya takımının ikinci yarısında küçülmekte ve maksimum sıcaklıkta bir artışa ve sıcaklık homojenliğinde bir azalmaya neden olmaktadır. Xu ve ark. [10] tarafından bildirilen referansta batarya takımının ikinci yarısında

sıcaklığın arttığı belirtilmiştir. Giriş konumu 30 mm'den yüksek olduğunda, giriş konumunun artmasıyla maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı hızla artmaktadır. 60 mm giriş konumu için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla 346,16 K, 23,36 K ve 48,16 K'dir. Bunun sebebi, havanın pillerin altından yukarı doğru akması ve termal doygunluğa ulaşması için ısıyı soğurmasıdır. Termal doygunluk, giriş konumunun artması ile artmakta ve bu da hava ve pil arasındaki ısı transferini bozarak sıcaklık farkını azaltmaktadır [10,31].

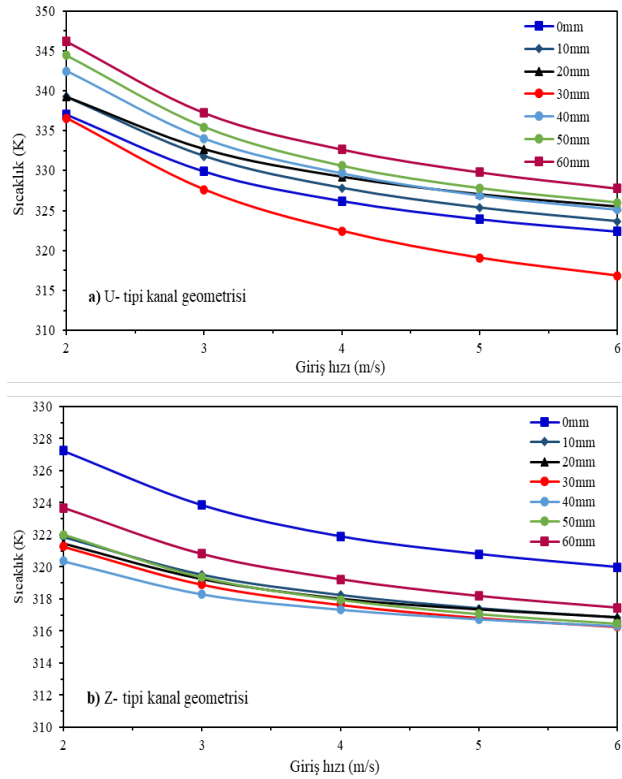
**Şekil 5.** Giriş Konumlarına göre sıcaklık farkı değerleri**Şekil 6.** 3 m/s hızında hava sıcaklık dağılımları

Şekil 5 ve 6-b'de Z- tipi kanal için sıcaklık farkları ve sıcaklık dağılımları giriş konumlarına göre verilmektedir. Sıcaklık değerleri hava giriş konumu değiştikçe belirgin şekilde düşüş göstermekte ve 50 mm giriş konumundan sonra artış göstermeye başlamıştır. 60 mm giriş konumu için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla 323,69 K, 6,23 K ve 25,69 K'dir. Sıcaklık dağılımı incelendiğinde, batarya takımının ikinci yarısından itibaren sıcaklık değerleri artmaktadır. Sıcaklık artışının belirli bir konumdan sonra artmasının temel nedeni, havanın giriş konumunda bulunan akış kanalına girmesinin zor olması ve çıkışa en yakın noktadan kanalı terk etmeye çalışması olarak belirtilebilir [19]. 30 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi şekiller için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla; 336,25 K, 19,71 K, 38,25 K ve 321,26 K, 4,99 K, 23,26 K olarak ölçülmüştür. Sıcaklık farkı düşüşü U- tipi kanaldan Z- tipi kanala göre maksimum sıcaklık değeri için %4 olarak gerçekleşmiştir.

3.2 Giriş hızının batarya soğutmasına olan etkisi

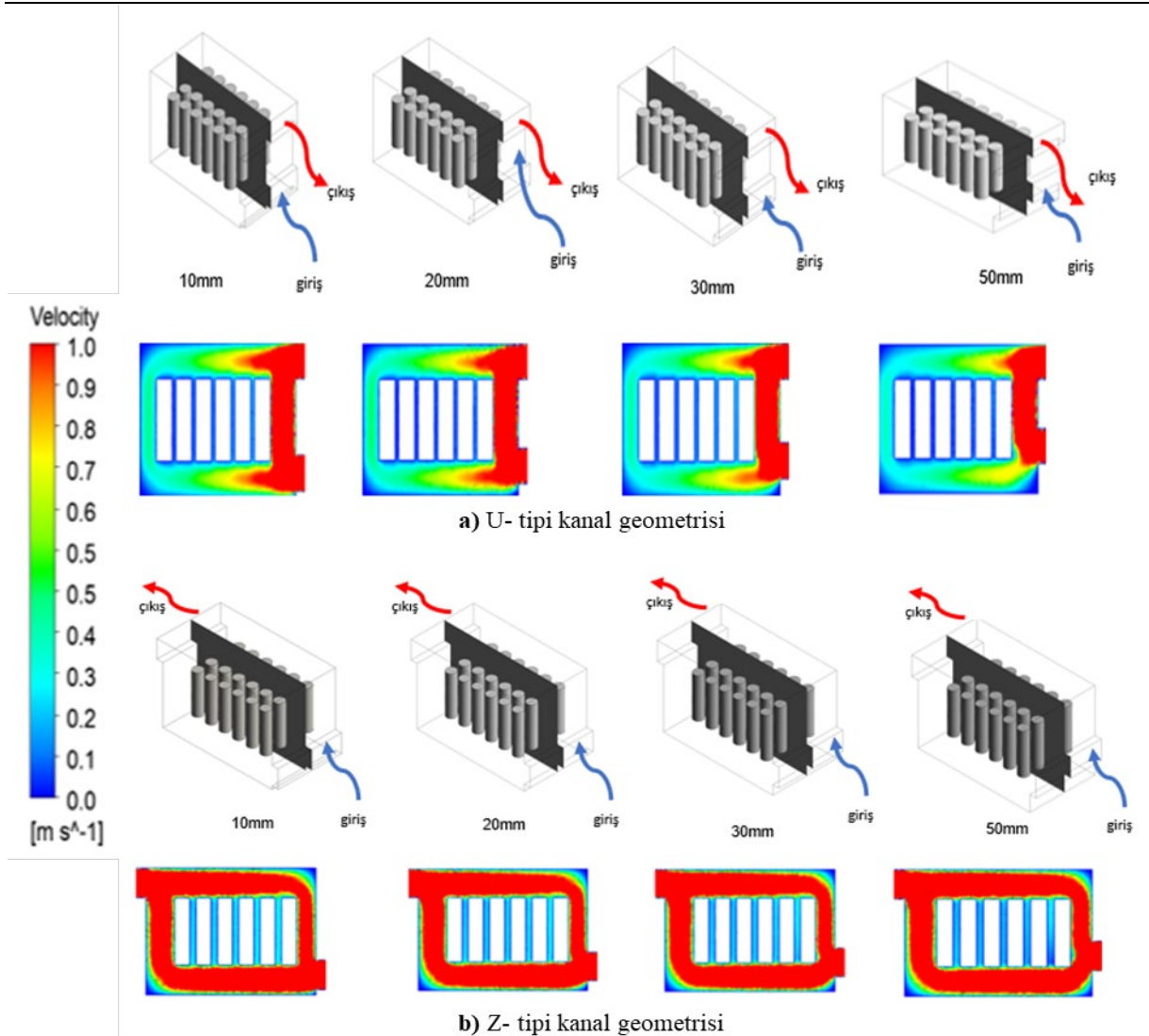
U- ve Z- tipi kanallar için sıcaklığın giriş hızına göre değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Giriş hızları 2 m/s'den 6 m/s 'ye doğru arttıkça batarya sıcaklığının düştüğü açıkça görülmektedir. U- tipi kanal için 0 ve 60 mm giriş konumunda sıcaklık değerleri 337-322,37 K ve 346,16-327,75 K arasında değişirken, 30 mm giriş konumunda bu değer 336,57-316,86 K olarak ölçülmüştür. Literatür incelendiğinde benzer eğilimler görülmektedir [3,10,23]. Giriş hızının artmasına bağlı olarak, hava ile piller arasındaki etkin ısı transferinin artması, sıcaklık düşüşüne yol açabilmektedir [10]. Şekil 7-a incelendiğinde U- tipi kanal için 30 mm giriş konumunda en düşük sıcaklık farkı oluşmuştur. Bu durum havanın ideal davranışı ile uygun giriş hızı ve konumunun eşleşmesi dolayısı ile ısı transfer mekanizmasına olumlu katkı sağlaması olabilir. Giriş hızı 3 m/s 'den sonraki artan hız aralığında, sıcaklık değerleri düşmeye başlamaktadır. Bu durum, hava giriş hızının artması ve uygun konum eşleşmesi ile bataryanın soğutulması sürecinde, ısı transferinin geliştirilmesinde olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Z- tipi kanal için giriş konumuna göre sıcaklık değişimi Şekil 7-b'de gösterilmektedir. 0 ve 60 mm giriş konumunda sıcaklık değerleri 327,6-319,97 K ve 323,69-317,46 arasında değişmektedir. 30 mm giriş konumunda en düşük sıcaklık farkına ulaşmıştır. U- tipi kanala göre 30 mm giriş konumunda %4,5 sıcaklık düşüşü meydana gelmektedir. Sıcaklık değerleri giriş konumunun değişmesine paralel olarak belirgin şekilde düşmüş, belirli bir hızdan sonra benzer sıcaklıklarda seretmeye başlamıştır. Hava giriş hızı 4 m/s'den sonraki hızlarında, sıcaklık değerleri değişim miktarı çok fazla değişmemiştir. Bunun nedeni havanın batarya grubunun ikinci yarısında termal doygunluk bölgesine ulaşması ve ısı transfer sürecinin stabil kalmasına

bağlanabilir. Buda Z- tipi bataryaların havanın yönlendirilmesinde, daha düşük hızlarda ve uygun giriş konumunda daha az enerji harcanarak soğutma gerçekleştirileceğini göstermektedir [24].



Şekil 7. Giriş hızlarına göre sıcaklık değişimleri

Şekil 8'de U- ve Z- tipi kanallara ait çeşitli konumlarda hız dağılımları verilmektedir. Şekil 8-a incelendiğinde U- tipi kanal için, giriş konumunun artmasıyla, düşük hızlarda hava ile pil grubu arasındaki soğutma performansı düşmekte ve pillerin sıcaklığı artmaktadır. Düşük giriş konumu ve hızlarında hava akışının batarya grubunu tam dolaşmasıyla piller arasındaki akış etkisi ve yüksek ısı transfer mekanizması oluşmakta ve batarya sıcaklığı düşmektedir. 30 mm giriş konumunda, ideal eşleşme gerçekleşerek hava akış hızının, ısı transferini artırarak sıcaklık değerini azalttığı görülmektedir. Şekil 8-b'de Z- tipi kanal çıkışında basınçlı hava, batarya takımının tamamında dolaşımı sağlamakta ve U- tipi kanala göre yüksek ısı transfer mekanizması gerçekleşmektedir. Giriş konumu 40 mm'den sonraki koşullarda, basınçlı havanın girişi zorlanmasıyla, uygun eşleşme gerçekleşmemekte ve batarya takımının sıcaklığında artışa neden olmaktadır.



Şekil 8. Çeşitli konumlarda hava giriş hızı dağılımları

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada U- ve Z- tipi kanallara ait batarya grubunun çeşitli hava giriş hızlarında ve konumlarında batarya soğutma performansı incelenmiştir. Bunun için 24 adet Ni-MH pil grubundan oluşan batarya grubu seçilmiş ve hesaplama için HAD yöntemi kullanılmıştır. Kanal giriş kısımlarının yerden yükseklikleri sırası ile 0-60 mm arasında ve hava giriş hızları 2-6 m/s olarak incelenmiştir. Hava giriş hızının artmasıyla, sıcaklık değerleri azalmıştır. Giriş konumu değerleri artmasıyla sıcaklık değerleri 30 mm giriş konumuna kadar azalmış, sonrasında artmaya başlamıştır. Hava giriş hızı 2-5 m/s arasında, 30 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi kanal sıcaklık artış değerleri, 39,13-22,1 K ve 22,3-20 K olarak gerçekleşmiştir. 40 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi kanal için maksimum sıcaklık değerleri 342,44 ve 320,35 K olarak gerçekleşmiştir. Buda Z- tipi kanal çeşidinin %6 daha fazla soğutma performansına sahip olduğunu göstermektedir. Z- tipi kanal soğutma sisteminde, uygun eşleşme ve ideal hava akışı

eşleşmesi ile, ısı transfer mekanizmasının arttığı ve sıcaklık değerlerinin düştüğü söylenebilir. Daha düşük enerji akışı istenilen durumlarda, Z- tipi akış mekanizması kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Elektrikli araçlarda, batarya ömrünü belirleyen en önemli etken batarya verimidir. Etkili verim için soğutma performansının en ideal şartlara göre ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada batarya giriş konumları ve hızlarının sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve elde edilen bulgular yorumlanmıştır. Gelecekteki araştırmalar için, hava çıkış konumunun soğutma performansına olan etkisinin incelenmesi ve çok amaçlı bir optimizasyonun yapılmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Xie, J., Ge, Z., Zang, M., & Wang, S., Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air-cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 126, 583–593. (2017).

- [2] Gupta, A. & Kumar, H., Multi-dimensional perspectives on electric vehicles design: A mind map approach. *Cleaner Engineering & Technology*, 8 100483. (2022).
- [3] Chen, K., Chen, Y., Li, Z., Yuan, F., & Wang, S., Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 393–401. (2018).
- [4] Cengiz, M., Oh, H., & Lee, S.-H., Lithium Dendrite Growth Suppression and Ionic Conductivity of $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5\text{-P}_2\text{O}_5$ Glass Solid Electrolytes Prepared by Mechanical Milling. *Journal of The Electrochemical Society*, 166 (16), A3997–A4004. (2019).
- [5] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M., A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288. (2013).
- [6] Kim, Y.T. & Han, S.Y., Cooling channel designs of a prismatic battery pack for electric vehicle using the deep Q-network algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119610. (2023).
- [7] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C., Thermal runaway caused fire and explosion of lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210–224. (2012).
- [8] Rao, Z. & Wang, S., A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (9), 4554–4571. (2011)
- [9] Wang, Y.F. ve Wu, J.T., Performance improvement of thermal management system of lithium-ion battery module on purely electric AUVs. *Applied Thermal Engineering*, 146, 74–84. (2019).
- [10] Xu, Z., Yu, G., Zhang, T., & Wang, R., Cooling performance of battery pack as affected by inlet position and inlet air velocity in electric vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102382. (2022).
- [11] Xu, X.M. & He, R., Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling. *Journal of Power Sources*, 240, 33–41. (2013).
- [12] Mahamud, R. & Park, C., Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5685–5696. (2011).
- [13] Tran, T.H., Harmand, S., & Sahut, B., Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 265, 262–272. (2014).
- [14] Li, X., He, F., & Ma, L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395–402. (2013).
- [15] Jiaqiang, E., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., et al., Effects of the different air-cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*, 144, 231–241. (2018).
- [16] Sefidan, A.M., Sojoudi, A., & Saha, S.C., Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 44–58. (2017).
- [17] Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Sokkeh, M.A., et al., A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115280. (2020).
- [18] Hong, S., Zhang, X., Chen, K., & Wang, S., Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1204–1212. (2018).
- [19] Shen, X., Cai, T., He, C., Yang, Y., & Chen, M., Thermal analysis of modified Z-shaped air-cooled battery thermal management system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 58, 106356. (2023).
- [20] Park, H., A design of air flow configuration for cooling lithium-ion battery in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 239 30–36. (2013)
- [21] Xun, J., Liu, R., & Jiao, K., Numerical and analytical modeling of lithium-ion battery thermal behaviors with different cooling designs. *Journal of Power Sources*, 233 47–61. (2013).
- [22] Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D., Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*, 80 55–65. (2015).
- [23] Li, M., Liu, Y., Wang, X., & Zhang, J., Modeling and optimization of an enhanced battery thermal management system in electric vehicles. *Front. Mech. Eng*, 14(1), 65–75. (2019).
- [24] Liu, Y. & Zhang, J., Design a J-type air-based battery thermal management system through surrogate-based optimization. *Applied Energy*, 252, 113426. (2019).
- [25] Calzolari, G. & Liu, W., Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*, 206, 108315. (2021).
- [26] Şener, R. Experimental and Numerical Analysis of a Waste Cooking Oil Biodiesel Blend used in a CI Engine. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33 (2), 299–307. (2021).
- [27] Sahbaz, M., Kentli, A., & Koten, H., Thermal Analysis and Optimization of High Power Led

-
- Armature. *Thermal Science*, 23 (2A), 637–646. (2019).
- [28] Zhang, J., Wu, X., Chen, K., Zhou, D., & Song, M. Experimental and numerical studies on an efficient transient heat transfer model for air-cooled battery thermal management systems. *Journal of Power Sources*, 490, 229539. (2021).
- [29] Sato, N. & Yagi, K., Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles. *JSAE Review*, 21(2), 205–211, (2000).
- [30] Araki, T., Nakayama, M., Fukuda, K., & Onda, K., Thermal Behavior of Small Nickel/Metal Hydride Battery during Rapid Charge and Discharge Cycles. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(6), A1128, (2005).
- [31] Xu, Z., Heat transfer performance of the rectangular heat sinks with non-uniform height thermosyphons for high power LED lamps cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 101013. (2021).