

Kese Tipi Lityum-Polimer Bataryaların Altıgen Kesitli Kanatçıklar Kullanılarak Soğutulmasının Sayısal İncelenmesi

Numerical Investigation of Cooling of Pouch Type Lithium-Polymer Batteries Using Hexagonal Fins

Onur YAŞAR*

Öz

Lityum-polimer bataryalar, mühendislikte yaygın ve kullanışlı batarya türlerinden biridir ve bu bataryaların ısı performansı, güvenlik ve dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir. Hücre sıcaklığının optimum çalışma aralığında tutulması ve batarya ömrünün uzatılması için çeşitli soğutma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bir 4S1P lityum-polimer batarya modelinin altıgen kesitli kanatçıklar kullanılarak türbülanslı akışta soğutulması ve ısı yönetimi ele alınmıştır. Ansys Fluent 24 programı ile yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde, türbülans modeli olarak standart k-ε ve RNG k-ε modelleri seçilmiştir. 5C deşarj oranı için batarya modeli, sayısal rüzgar tüneli ortamında analiz edilerek sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Çıkan sonuçlar, RNG k-ε modeli ile elde edilen sıcaklık değerlerinin, standart k-ε modeli ile elde edilen sıcaklık değerlerinden 2-4 K daha fazla olduğunu göstermektedir. Analizlerde elde edilen en yüksek hücre sıcaklığı yaklaşık 316 K olup, kullanılan altıgen kesitli kanatçık modeli, yüksek deşarj oranları için batarya soğutmasında büyük ölçüde başarılı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Lityum-polimer batarya, Altıgen kesitli kanatçık, Batarya sıcaklığı, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isıl yönetim.

Abstract

Lithium-polymer batteries are widely used in engineering, and their thermal performance is of critical importance for safety and durability. Various cooling methods are developed to preserve cell temperature and battery life. In this study, cooling and thermal management of a 4S1P lithium-polymer battery in turbulent flow by using hexagonal fins are investigated. In the computational fluid dynamics analysis performed via Ansys Fluent 24 software, the standard k-ε model and RNG k-ε models are selected as the turbulence models. Temperature distributions are examined for 5C discharge rate by analyzing battery model in a numerical wind tunnel. The results show that the temperature values obtained via the RNG k-ε model are 2 – 4 K higher than the temperature values obtained via the standard k-ε model. The highest cell temperature obtained from the analysis is approximately 316 K and the hexagonal fin model used is found substantially successful with respect to battery cooling for high discharge rates.

Keywords: Lithium-polymer battery, Hexagonal fin, Battery temperature, Computational fluid dynamics, Thermal management.

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: onur.yasar@balikesir.edu.tr

Received/Geliş: 15.04.2025

Accepted/Kabul: 22.11.2025

Published/Yayın: 23.02.2026

1. Giriş

Lityum-polimer bataryalar, insansız hava araçları için en çok tercih edilen batarya türlerinden biridir (Çalışır vd., 2023). Lityum-iyon pillerle karşılaştırıldığında, dayanıklı olması ve yüksek güç üretimi gibi önemli avantajlar sunan lityum-polimer bataryalar, günümüzde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Talluri vd., 2024). Lityum-iyon bataryalarda olduğu gibi, lityum-polimer bataryalarda da sıcaklık hassasiyeti, önemli bir sorun teşkil etmektedir (Aris ve Shabani, 2017). Yüksek sıcaklıklar, ayırıcı tabakanın erimesi veya patlama gibi ciddi sorunlara yol açabilmektedir (Hu vd., 2024). Bu nedenle, batarya sıcaklığının optimum seviyede tutulması, büyük önem taşımaktadır (Lin vd., 2024; Özbektaş vd., 2024). Bataryalarda ısı yönetim için birçok soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında kanatçık kullanarak yapılan soğutma, en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Linxiang vd., 2024; Yardımcı ve Tuğan, 2026). Dairesel, altıgen ve beşgen kesitli kanatçıklar, yaygın olarak kullanılmakta olup altıgen kesitli kanatçıklar, batarya soğutulmasında iyi sonuçlar vermektedir. İlâveten, altıgen kesitli kanatçıklar, yüksek yüzey/hacim oranına ve ısı transfer verimine sahiptir. Bu sebeple altıgen kesitli kanatçıklar, bu kanatçık geometrileri içerisinde özel bir öneme sahiptir (Liu vd., 2021; Zhao vd., 2023).

Altıgen kesitli kanatçıklar, batarya soğutmasında etkili bir geometrik yapı olarak kullanılabilir. Açık literatürde, altıgen kesitli kanatçıklar kullanılarak bataryaların soğutulması üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur. Li vd., (2013), RNG k- ϵ modelini kullanarak hava tüneline silindirik lityum-iyon pillerin soğutulmasını zamana bağlı olarak incelemişlerdir. ANSYS Fluent programını kullanarak 1 m/s ve 5 m/s hava giriş hızlarında iki boyutlu simülasyonlar gerçekleştirmişler ve elde edilen pil sıcaklıklarını doğrulamak amacıyla deneysel bir düzenek de kurmuşlardır. Maksimum pil sıcaklığını tahmin etmek için indirgenmiş dereceli model yaklaşımından yararlanan araştırmacılar, bu modelin maksimum pil sıcaklığını tahmin etmede başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile büyük ölçüde aynı olduğunu belirtmişlerdir. Liu vd., (2021), altıgen, eşkenar dörtgen, dikdörtgen, üçgen, trapez ve dairesele kesitli batarya soğutulması üzerine odaklanmışlar ve bu yöntemi batarya sisteminde yer alan faz değıştiren madde (FDM) üzerinde uygulamışlardır. Kare kesitli bir lityum bataryayı ele alan ilgili araştırmacılar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinden yararlanmış ve simülasyon sonuçlarını önceki çalışmalardan elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. 4C, 6C, 8C ve 10C deşarj oranları üzerinde çalışan ilgili araştırmacılar, çalışmanın sonunda 10C gibi yüksek bir deşarj oranında bile altıgen kesitli kanatçıkların batarya sıcaklığını 323 K'nin altında tuttuğunu savunmuşlardır. Naresh vd., (2021), batarya ısı yönetim sistemi üzerine odaklanmışlar ve bu amaçla altıgen kesitli kanatçıklar ile faz değıştiren maddeden yararlanmışlardır. ANSYS Fluent programında üç boyutlu simülasyonlar

gerçekleştirmişler ve kanatçıkların, faz değiştiren maddenin ergime süresi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kanatçık bulunmayan durumda, faz değiştiren maddenin daha uzun sürede ergidiğini savunan ilgili araştırmacılar, batarya ısı yönetim sisteminde hem altıgen kesitli kanatçıkların hem de faz değiştiren maddenin kullanılmasının ısı performansı artırdığını ortaya koymuşlardır. Liu vd., (2022), altıgen kesitli alüminyum kanatçıkları batarya-faz değiştiren madde sisteminde kullanarak lityum kobalt oksit bataryaların soğutulmasını ele almışlardır. Faz değiştiren maddenin ergime sürecine ilişkin simülasyonlar için ANSYS Fluent programından yararlanan araştırmacılar, üçgen, trapez, eşkenar dörtgen, dikdörtgen, altıgen ve dairesel kesitli kanatçık modellerini kullanmışlardır. Bu kanatçık modellerinin, doğal taşınım yoluyla faz değiştiren maddenin soğumasına etkilerini incelemişlerdir. Faz değiştiren maddenin soğutulması açısından üçgen kesitli kanatçıkların, altıgen kesitli kanatçıklara göre daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, üçgen kesitli kanatçıkların faz değiştiren madde ile birlikte kullanılması durumunda, batarya sıcaklığını 323 K'nin altına düşürdüğünü belirtmişlerdir. Shen vd., (2024), kese şeklindeki lityum-demir-fosfat bataryaların termal yönetimi için hem faz değiştiren madde hem de altıgen kesitli kanatçıklar kullanmış ve oluşturdukları modeli COMSOL programı ile sayısal olarak analiz etmişlerdir. Kanatçık genişliği, kanatçık kalınlığı ve kanatçıklar arası mesafeyi temel parametreler olarak belirlemiş ve toplamda 11 farklı model geliştirmişlerdir. Çalışmanın sonunda, kanatçıklar arası mesafe, kanatçık genişliği ve kanatçık kalınlığı için optimum değerleri sırasıyla 10 mm, 1 mm ve 6 mm olarak belirlemişlerdir. Bu ölçülere göre oluşturulan kanatçık modelinin, bataryalardaki maksimum sıcaklığı 315 K'nin altında tuttuğunu açıklamışlardır.

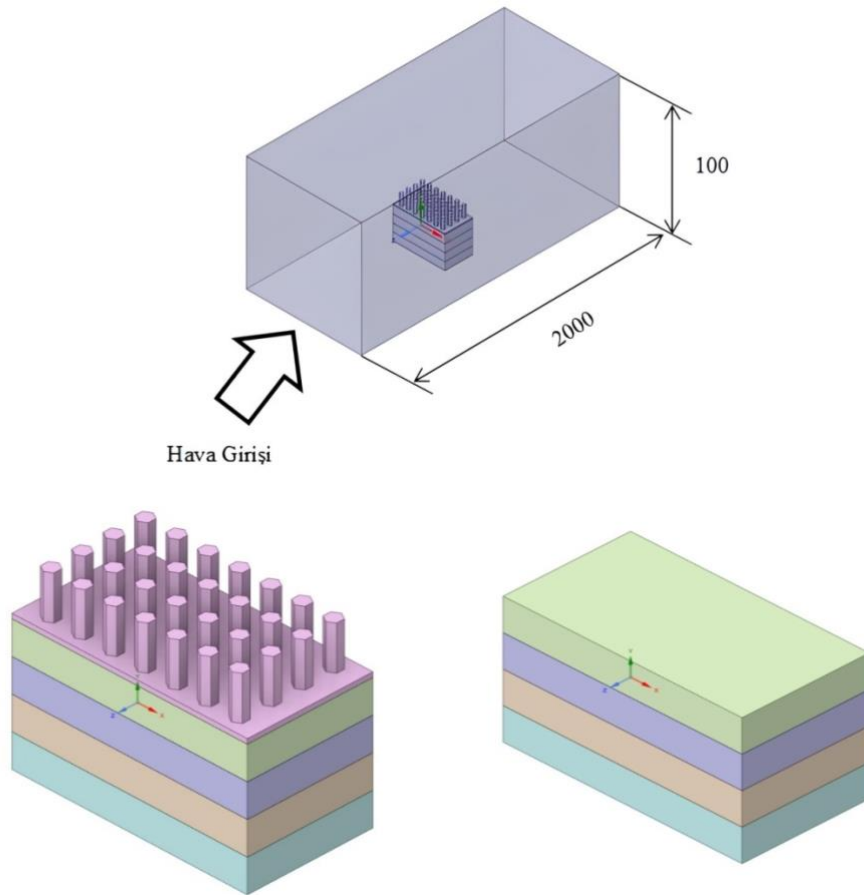
Açık literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, altıgen kesitli kanatçıkların sayısal rüzgar tüneli ortamında kese tipi lityum-polimer bataryaların soğutulması amacıyla kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Önceki çalışmalarda faz değiştiren maddenin yanında kare, dikdörtgen veya dairesel kesitli kanatçıklar daha fazla kullanılmakta olup altıgen kesitli kanatçıklar, batarya soğutulmasında nispeten daha az kullanılmaktadır. İlaveten, silindirik lityum-iyon piller, kese tipi lityum-polimer bataryalara göre çalışmalarda daha çok tercih edilmektedir. Özellikle kese tipi bataryaların soğutulmasında hem hava tüneli ve hem de altıgen kesitli kanatçık kullanımına yönelik çalışmaların sınırlı olduğu göz önüne alındığında, bu çalışmada, kese şeklindeki bir 4S1P lityum-polimer bataryanın altıgen kesitli alüminyum kanatçıklar kullanılarak sayısal rüzgar tüneli ortamında soğutulması, uygun ve özgün bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. ANSYS Fluent 24 programı ile yapılan sayısal simülasyonlarda, sayısal rüzgar tüneli ortamı ve iki ayrı türbülans modeli kullanılarak, kese şeklindeki bir 4S1P lityum-polimer bataryanın 5C deşarj oranında zorlanmış taşınım ile soğutulması ele alınmıştır. Çalışmanın bir diğer amacı da bu kanatçıklar ile bataryanın ısı yönetimini sağlamaktır. Farklı hava giriş hızları ve farklı hava giriş sıcaklıkları kullanılarak yapılan simülasyonlarda, batarya hücreleri üzerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Yapılan bu çalışma,

altıgen kanatçıkların yüksek deşarj oranları için etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, hem uygun kanatçık geometrisi seçimi hem de sayısal rüzgar tüneli ortamı kullanımı açısından özgün bir çalışma olup literatürün bu eksikliğini gidermeye ve modelin deneysel olarak gelecek çalışmalarda doğrulanması ve uygulanmasına yönelik bir çalışma olacaktır.

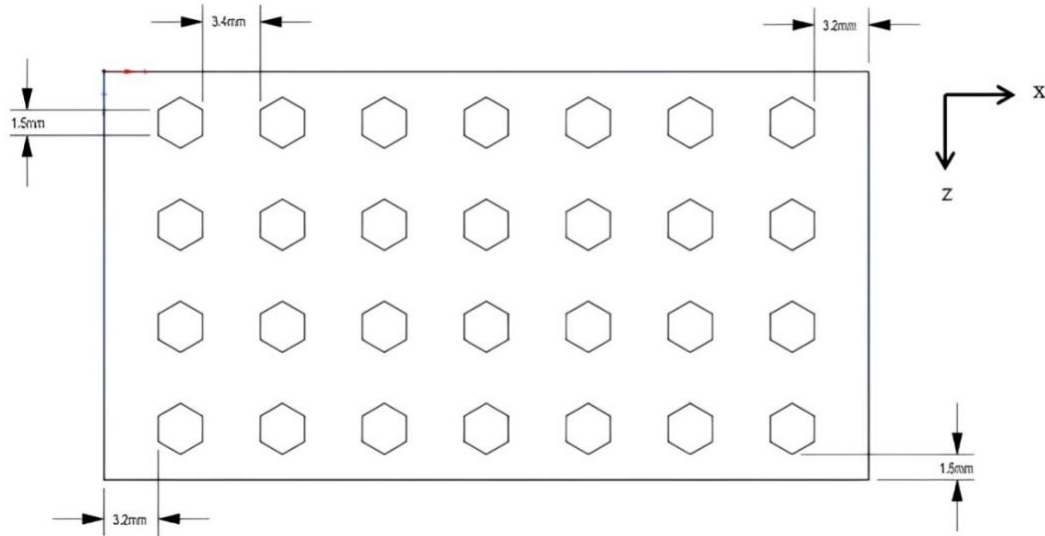
2. Materyal ve Metot

2.1. Sayısal Rüzgar Tüneli Ortamı ve Batarya Modeli

Simülasyonlarda kullanılan rüzgar tüneli ortamı, kare kesitli olup ölçüleri 100 x 100 x 2000 mm'dir. Şekil 1 ve Şekil 2'de, sırasıyla sayısal rüzgar tüneli ortamı, batarya modeli (modülü) ve kanatçıklara ait genel görünüm verilmektedir.



Şekil 1. Sayısal rüzgar tüneli ortamı ve batarya modüllerinin genel bir görünümü (a=Genel görünüm, b= Kanatçıklı batarya modülü, c=Kanatsız batarya modülü).



Şekil 2. Kanatçıklı batarya modülünün üstten bir görünümü.

Şekil 1’de görüldüğü üzere, batarya modülü rüzgar tünelinin ortasına yerleştirilmiştir (Whittaker, 1977). Batarya modülünün ölçüleri 45 x 27 x 24 mm’dir (Gens Tattu Website). Şekil 2’de ise kanatçıkların bir kenar uzunluğu 1.5 mm olup, yükseklikleri 9 mm’dir. Kanatçıklar arasındaki mesafe 3.4 mm’dir. Altıgen kesitli kanatçıklar, kare veya dairesel kesitli kanatçıklara göre daha fazla ısı transfer yüzey alanına ve daha yüksek türbülans düzeyine sahiptir (Roozbehi vd., 2023). Bu nedenle, çalışmada altıgen kesitli kanatçıklar, batarya soğutmasında kullanılmıştır.

2.2. Türbülans Modelleri

Ansys Fluent, Navier-Stokes denklemlerine dayanan ve iki ya da üç boyutlu analizlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir yazılımdır. Sayısal simülasyonlarda, bu denklemler kullanılarak batarya sıcaklıklarına ilişkin sonuçlar elde edilmektedir. Navier-Stokes denklemlerinde, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri temel denklemler olarak yer almaktadır (Yang vd., 2021; Zi vd., 2026). Simülasyonlarda, Navier-Stokes denklemlerine dayalı olarak üç boyutlu, türbülanslı ve sıkıştırılmaz akış modeli esas alınmış olup hava, ana akışkan olarak kullanılmıştır (Ghosh vd., 2010). Zamandan bağımsız olarak çözümlenen analizler için standart k-ε ve RNG k-ε modelleri uygulanmıştır. k-ε modelleri, açık literatürde pillerin hava tüneli kullanılarak soğutulması üzerine yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar veren türbülans modelleridir (Li vd., 2013; Hasan vd., 2023). Hem standart k-ε hem de RNG k-ε modelleri için Ölçeklenebilir Duvar Fonksiyonu yaklaşımı baz alınmıştır. Bu yaklaşım, hava tüneli uygulamalarında etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Endalew vd., 2009). Süreklilik, momentum, enerji ile standart k-ε ve RNG k-ε türbülans modellerine

ait temel denklemler aşağıda verilmiştir (Papageorgakis ve Assanis, 1999; Bistafa, 2017; Jha vd., 2019; Koca ve Güder, 2022):

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \cdot (\nabla \cdot \vec{U}) \cdot \vec{U} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot \vec{U} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U} \cdot h) = \nabla \cdot (k \cdot \Delta T) + S_h \quad (3)$$

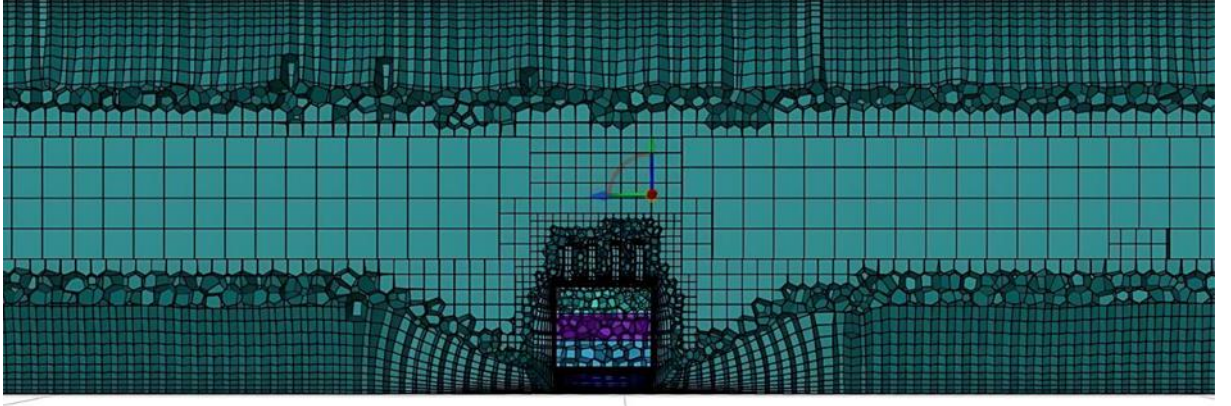
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_g} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \cdot \epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + R_\epsilon - S_\epsilon \quad (5)$$

Denklemlerde yer alan U , ρ , g , μ , h , T , S_h ve P sırasıyla hız, yoğunluk, yerçekimi ivmesi, dinamik viskozite, entalpi, sıcaklık, hacimsel ısı üretimini ve basıncı ifade etmektedir. Ayrıca, Denklem (4) ve (5)'te yer alan α , S , k , ϵ ve G ise sırasıyla Prandtl sayısı, kaynak terimleri, türbülans kinetik enerjisi, türbülans enerjisi dağılım oranı ve türbülans kinetik enerjisi üretimidir (Koca ve Güder, 2022). Yukarıda verilen denklemler temel denklemler olup, türbülans modelleri, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ ve $C_{3\epsilon}$ gibi bazı sabit katsayılar içermektedir. Bu katsayılardan $C_{1\epsilon}$ ve $C_{2\epsilon}$, standart k- ϵ modeli için sırasıyla 1.44 ve 1.92 olarak alınırken, RNG k- ϵ modelinde bu katsayılar 1.42 ve 1.68 olarak kabul edilmektedir (Papageorgakis ve Assanis, 1999; Bistafa, 2017).

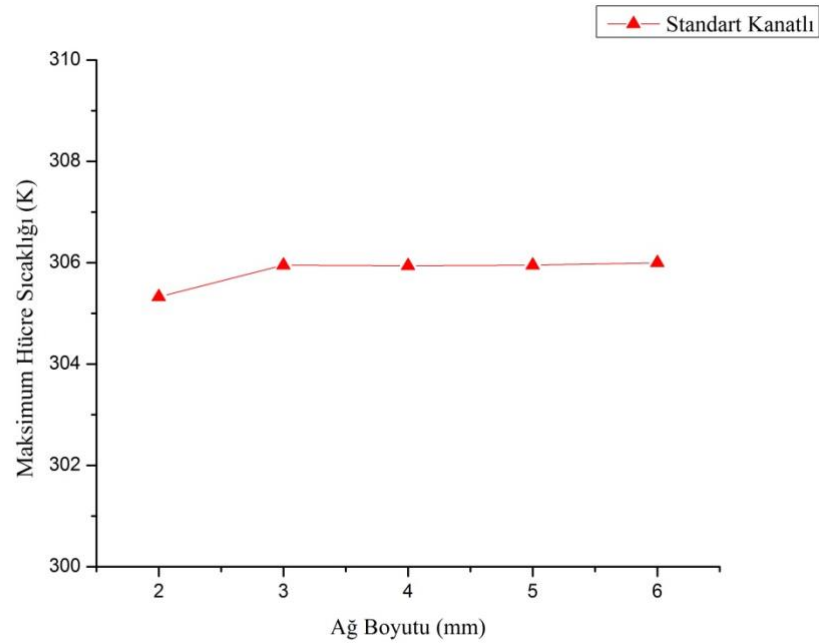
2.3. Ağ yapısı ve Sınır Şartları

Ansys'de çözümleme yapabilmek için modelin sonlu hacimlere bölünmesi ve uygun şekilde ağ atılması gerekmektedir. Analizlerde, daha hızlı yakınsama amacıyla petek şeklinde ağ yapısı kullanılmıştır (Arocena ve Danao, 2023). Şekil 3'te sayısal rüzgar tüneli ortamı ve batarya modeline atılan ağ yapısı görülmektedir:



Şekil 3. Ağ yapısının görünümü.

Şekil 3, petek ağ yapısının düzgün bir dizilimde olduğunu göstermektedir. Ancak, ağ boyutunun sonuçlara olan etkisini değerlendirmek için ağ bağımsızlık analizinin yapılması gerekmektedir (Suo vd., 2026). Ağ bağımsızlık analizi, çeşitli ağ boyutları ve sayıları için elde edilen sonuçların değişimi üzerine yapılan bir analizdir (Al-Hababeh vd., 2008). Bu çalışmada, ağ bağımsızlık analizi; standart $k-\epsilon$ modeli kullanılarak 273.15 K hava giriş sıcaklığı ve 1 m/s hava giriş hızı için gerçekleştirilmiş olup, simülasyon sonuçları Şekil 4'te görülmektedir:



Şekil 4. Ağ bağımsızlık analizi.

Şekil 4'te görüldüğü üzere 2, 3, 4, 5 ve 6 mm ağ boyutları için elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları arasındaki fark 1 K'den azdır. Bu durum, atılan ağ yapısının doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. 4 mm'lik ağ boyutu, 2 mm ve 3 mm'lik ağ boyutları ile karşılaştırıldığında daha kısa çözüm süresine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple ağ boyutu 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu ağ boyutu ile toplam 893.857 adet hücre ve 2.398.582 düğüm kullanılmıştır. Sonuçların doğruluğu açısından, atılan ağın çarpıklık ve ortogonal kalite değerleri de önemlidir. Yapılan ağ bağımsızlık analizlerine göre, maksimum çarpıklık ve minimum ortogonal kalite değerleri sırasıyla 0.86 ve 0.16 olarak belirlenmiş olup, bu değerler atılan ağın iyi bir kalitede olduğunu göstermektedir (Karkoulas vd., 2022).

Tünel duvarları yakınında kayma koşulu ve viskoz etkiler göz önüne alınmıştır. Bu nedenle, tünel duvarları yakınına daha ince bir ağ yapısı atılmıştır. Bu noktada önemli bir parametre, y^+ veya boyutsuz duvar uzaklığıdır. Bu parametre için temel formül aşağıda verilmiştir (Shukla vd., 2011):

$$y^+ = \left(\frac{u \cdot y}{\nu} \right) \quad (6)$$

Denklem (6)'da yer alan u , y ve ν sırasıyla hız, sınır tabaka kalınlığı ve kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Ölçeklenebilir Duvar Fonksiyonu yaklaşımlarında y^+ değerinin 11.06'dan büyük olması gerekmektedir (Grotjans ve Menter, 1998; Paul vd., 2008). Bu nedenle, duvarlara yakın bölgelere toplam 10 katman atılmıştır (Shukla vd., 2011; Besharat vd., 2016). HAD analizlerinde, sonuçların doğruluğu açısından kullanılan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır (Marconnet vd., 2024). Tablo 1'de, kullanılan batarya modeli, kanatçık malzemesi ve havaya ait termo-fiziksel özellikler verilmiştir:

Tablo 1. Analizlerde kullanılan malzeme ve akışkanların termo-fiziksel özellikleri (Incropera ve DeWitt, 1996; Patil vd., 2018; Li vd., 2021).

Parametre	Batarya	Hava	Alüminyum 5A06
Özgül Isı (kJ/kg.K)	1.3	1.006	1.09
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	22	0.0242	147
Yoğunluk (kg/m ³)	2100	1.225	2630

Tablo 1'de görüldüğü üzere, kanatçık malzemesi olarak alüminyum seçilmiştir. Alüminyum, literatürde kanatçık malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, soğutma uygulamalarında iyi sonuçlar vermektedir (Liu vd., 2022). Bataryalarda hacimsel ısı üretim denklemi, Denklem (7)'de verilmiştir (Rodríguez-Iturriaga vd., 2024):

$$\dot{Q} = I \cdot \left(V - V_{oc} - T \cdot \frac{dV_{oc}}{dT} \right) \text{ (Watt)} \quad (7)$$

Denklem (7)'de yer alan I , V , V_{oc} ve $\dot{Q}$ ise sırasıyla akım, gerilim, açık çevrim voltajı ve ısı üretimini ifade etmektedir (Bernardi vd., 1985; Tripathi ve Marconnet, 2026). Tablo 2'de ise HAD analizlerinde kullanılan sınır şartları verilmiştir:

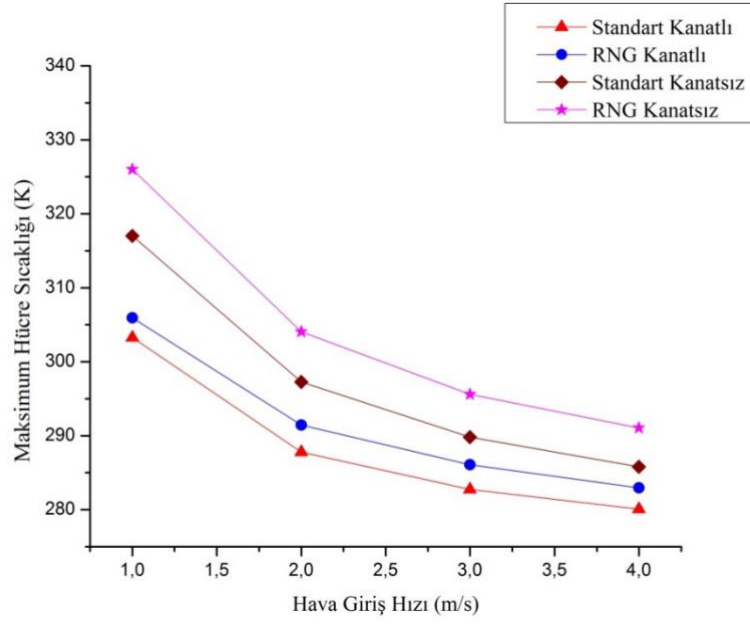
Tablo 2. HAD analizlerinde kullanılan sınır şartları.

Sınır Şartı	Açıklama
Hava Giriş Hızı (m/s)	1, 2, 3 ve 4
Hava Giriş Sıcaklığı (K)	268.15, 273.15 ve 278.15
Bataryaların Başlangıç Sıcaklığı (K)	300
Yaklaşık Reynolds Sayıları	7000, 14000, 21000 ve 28000
Yakınsama Kriteri	10^{-6}
Kullanılan Algoritma	COUPLED
Deşarj Oranı	5C

Tablo 2'de görüldüğü üzere, verilen hava giriş hızlarına karşılık gelen Reynolds sayılarının yaklaşık değerleri, 7000, 14.000, 21.000 ve 28.000'dir. Bataryaların başlangıç sıcaklığı 300 K olarak kabul edilmiştir (Gu vd., 2024). Çalışmada yakınsama kriteri, 10^{-6} olarak seçilmiştir (Saw vd., 2017b). Simülasyonlarda kullanılan algoritma ise COUPLED algoritmasıdır. COUPLED algoritması, hız ve basınç alanlarının eşzamanlı çözdüğü gibi yüksek sıcaklık bölgelerinde daha kararlı sonuçlar vermektedir. Literatürde bataryaların soğutulmasında çoğunlukla SIMPLE algoritması kullanılsa da, bu çalışmada farklı olarak COUPLED algoritması kullanılmıştır (Anderson vd., 2011; Hasan vd., 2023). Türbülans giriş koşulları ise simülasyon sonuçlarına etki eden bir diğer parametredir. Simülasyonlarda hız-giriş (velocity-inlet) ve basınç çıkış (pressure-outlet) sınır koşulları seçilmiştir (Cakici vd., 2017). Giriş için türbülans yoğunluğu %5 olarak belirlenmiştir (Podila vd., 2014). Bataryalarda yüksek güç uygulamaları veya performans değerlendirmede 5C deşarj oranı kullanılabilir. Altıgen kanatçıkların batarya soğutmadaki etkisini görebilmek için bu çalışmada 5C deşarj oranı, kullanılmıştır (Abraham vd., 2010).

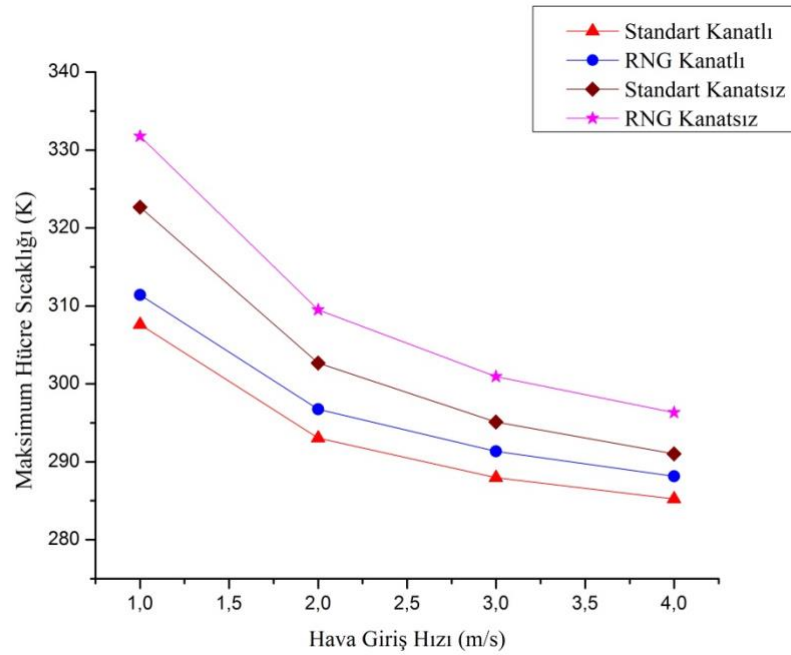
3. Sonuç ve Tartışma

Analizler, Tablo 2'de yer alan sınır şartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te ise 268.15 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklığının hava giriş hızlarına göre değişimi görülmektedir:



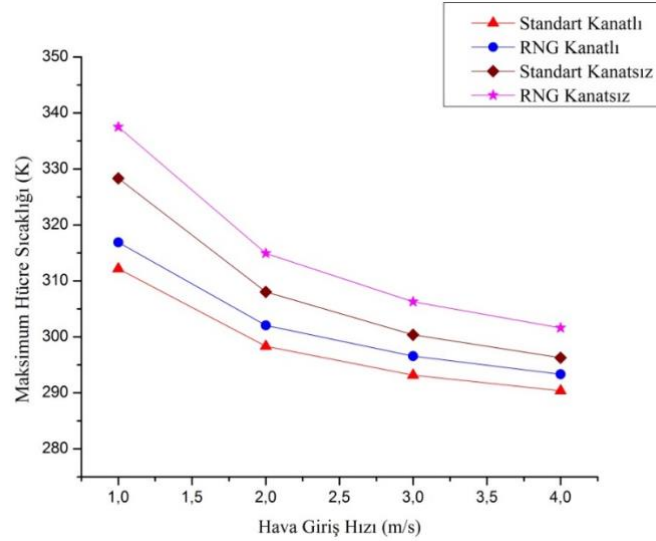
Şekil 5. 268.15 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi.

Şekil 5'te verilen analiz sonuçları, her iki türbülans modeli için kanatçıklı batarya modelindeki maksimum hücre sıcaklığının 308 K'nin üzerine çıkmadığını göstermektedir. Özellikle, hava giriş hızının artması, sınır tabaka kalınlığını azaltmakta ve ısı transfer katsayısını ise artırmaktadır (Koca ve Güder, 2022). Bu durum, hücre sıcaklıklarında belirgin bir düşüşe sebep olmaktadır. (Li vd., 2013). Kanatçık olmadığı durumda, hücre sıcaklıkları 323 K'nin üzerine çıkabilmektedir. Şekil 6'da ise 273.15 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklığının, hava giriş hızlarına göre değişimi verilmiştir:

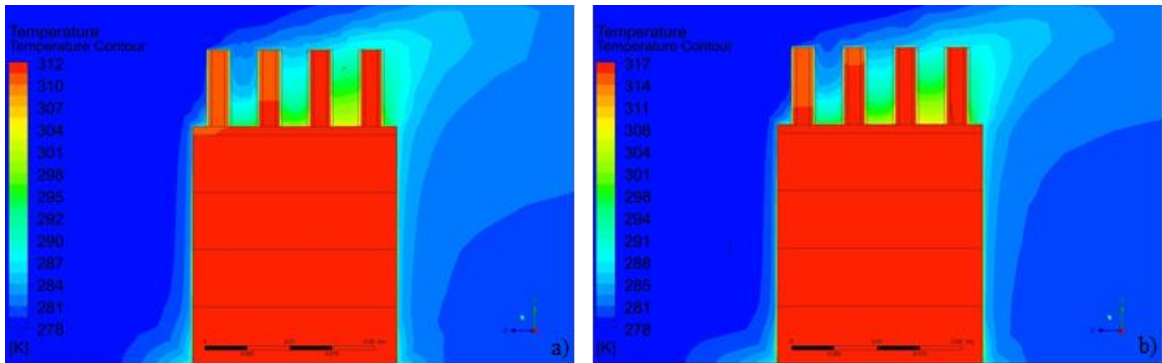


Şekil 6. 273.15 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi.

Şekil 6’da görüldüğü üzere, hava giriş sıcaklığının 268.15 K’den 273.15 K’ye çıkması, hücre sıcaklıklarında yaklaşık 4 K’lik bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum, batarya yüzey sıcaklığı ile hava giriş sıcaklığı arasındaki farkın ve dolayısıyla ısı transferinin azalması ile açıklanabilir (Fayaz vd., 2022). Elde edilen analiz sonuçları, RNG k- ϵ türbülans modelinden elde edilen sıcaklık değerlerinin, standart k- ϵ modeli ile elde edilen sıcaklık değerlerinden 2-4 K daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, RNG k- ϵ modelinin deformasyon etkilerini, karışım ve girdapları daha ayrıntılı bir şekilde çözümlemesi ve bu sayede türbülans viskozitesini daha büyük hesaplamasından ileri gelmektedir. Türbülans viskozitesinin büyük hesaplanması ise yüzey sıcaklıklarında 2-4 K’lik bir artışa sebep olmuştur (Abbas vd., 2021). Kanatçıklı batarya modeli göz önüne alındığında, 278.15 K hava giriş sıcaklığı ve 1 m/s hava giriş hızı için RNG k- ϵ türbülans modelinden elde edilen maksimum hücre sıcaklığı yaklaşık 311 K’dir. Şekil 7 ve Şekil 8’de, 278.15 K hava giriş sıcaklığı için batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir:



Şekil 7. 278.15 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi.



Şekil 8. 278.15 K hava giriş sıcaklığı ve 1 m/s hava giriş hızı için standart k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modellerinden elde edilen sıcaklık dağılımları (a=Standart k- ϵ model, b= RNG k- ϵ model).

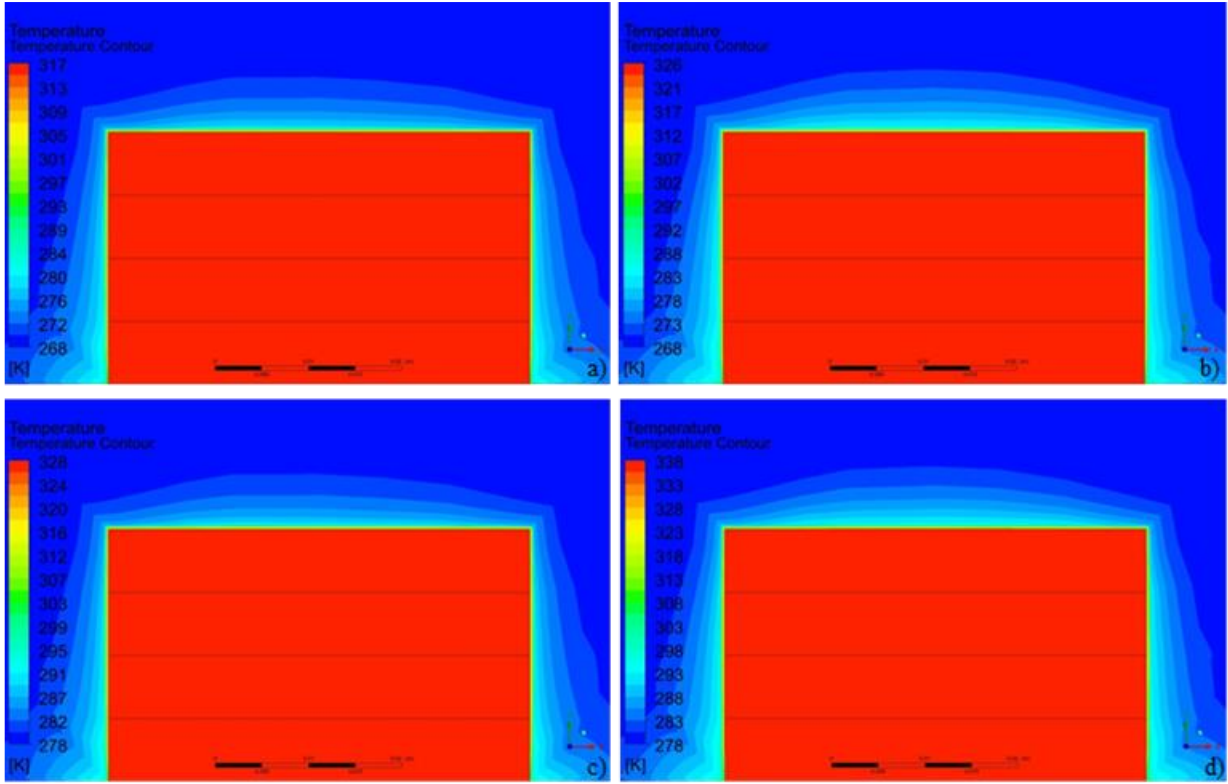
Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen sonuçlara göre, kanatçıklı batarya model için standart k-ε ve RNG k-ε modelinden elde edilen sıcaklık değerleri 308 K’nin üzerine çıkmaktadır. Özellikle lityum-polimer bataryaların çalışma sıcaklıkları göz önüne alındığında, bu durum olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir (Ianniciello vd., 2018; El-Said vd., 2021). Bu bağlamda, hava giriş sıcaklığının 278.15 K’den 268.15 K’e düşürülmesi uygun bir seçenek olacaktır (Shang vd., 2019; Koca ve Özcan, 2025). İlaveeten, en alt ile en üst hücre arasındaki sıcaklık farkı 5 K’den az olup, hücre içi sıcaklık farkı 1 K’i aşmamaktadır. Bu durum, kullanılan kanatçık yapısının ve seçilen sınır şartlarının doğruluğunu göstermektedir (Xu ve He, 2014). Hava giriş hızının 1 m/s’den 4 m/s’ye çıkarılması, hücre sıcaklıklarını yaklaşık %56 oranında azaltmaktadır. Batarya soğutması ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar ve ilgili sınır şartları göz önünde bulundurulduğunda, en yaygın ve doğru sonuçları veren türbülans modeli RNG k-ε modelidir (Li vd., 2013). Sonuç olarak, bu çalışmada da aynı sınır şartları tercih edilmiştir (Saw vd., 2017a; Ostanek vd., 2023). Tablo 3’te, maksimum hücre sıcaklıklarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması görülmektedir:

Tablo 3. Maksimum hücre sıcaklıklarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.

Çalışma	Isı Kaynağı/ Batarya	Batarya Şekli	Batarya Tipi	Kullanılan Akışkan (Hava veya su)	Soğutma Yöntemi	Deşarj Oranı	Kanatçık Geometrisi	Maksimum Hücre Sıcaklığı
Liu vd., (2021)	Batarya	Kese tipi	Lityum-kobalt-oksit	Kaynakta belirtilmemiştir.	Kanatçık ve FDM	4C, 6C, 8C ve 10C	Altıgen	yaklaşık 335 K (10C deşarj oranı için)
Liu vd., (2022)	Batarya	Kese tipi	Lityum-kobalt-oksit	Hava	FDM, doğal taşınım ve kanatçık	4C, 6C, 8C ve 10C	Altıgen, dairesel, yamuk, üçgen, dikdörtgen ve eşkenar dörtgen	yaklaşık 335 K (10 C deşarj oranı için)
Yang vd., (2023)	Batarya	Silindirik	Lityum-iyon	Hava	Kanatçık, levha ve hava boruları	3C	Altıgen	yaklaşık 318 K
Shen vd., (2024)	Batarya	Prizmatik	Lityum-demir-fosfat	Kaynakta belirtilmemiştir.	Kanatçık ve FDM	2C, 4C, 6C ve 8C	Altıgen	yaklaşık 330.7 K (8C deşarj oranı için)
Sutheesh vd., (2024)	Batarya	Silindirik	Lityum-iyon	Kaynakta belirtilmemiştir.	Kanatçık ve FDM	1C, 3C ve 5C	Altıgen	yaklaşık 335 K (5C deşarj oranı için)
Li vd., (2025)	Batarya	Prizmatik	Lityum-iyon	Ethanol	Kanatçık ve U- tipi kanal	3C	Altıgen	yaklaşık 310 K
Mevcut çalışma	Batarya	Kese tipi	Lityum-polimer	Hava	Kanatçık ve zorlanmış taşınım	5C	Altıgen	317 K

Tablo 3'te görüldüğü üzere silindirik ve prizmatik lityum-iyon bataryalar, önceki çalışmalarda yaygın olarak kullanılmıştır. Kanatçık ile yapılan soğutmanın yanı sıra faz değiştiren madde de tercih edilmiştir. Genel olarak tek kanatçık modeli kullanılmış olup, birden fazla deşarj oranı eklenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde maksimum sıcaklık değerleri yaklaşık 310 K ile 335 K arasında değişmektedir. Tablo 3'te yer alan çoğu çalışmadan farklı olarak, 5C deşarj oranı kullanılmıştır. Tablo 3'te yer alan çalışmalar incelendiğinde mevcut çalışmadan elde edilen maksimum hücre sıcaklığı değerinin, Liu vd., (2021), Liu vd., (2022), Shen vd., (2024) ve Sutheesh vd., (2024) tarafından edilen maksimum hücre sıcaklığı değerlerinden düşük olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bahsedilen bu çalışmalarda 6C, 8C ve 10C gibi yüksek deşarj oranları kullanılmıştır. Bu yüksek deşarj oranları, maksimum hücre sıcaklığının mevcut çalışmadan elde edilen maksimum hücre sıcaklığı değerinden daha yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Söz konusu çalışmalardan elde edilen yaklaşık maksimum hücre sıcaklığı değerleri, sırasıyla 335 K, 330.7 K ve 335 K'dir. İlaveten, mevcut çalışmada kullanılan deşarj oranı, Yang vd., (2023) ve Li vd., (2025) tarafından kullanılan deşarj oranlarından yüksektir. Bahsedilen bu çalışmalarda yaklaşık maksimum hücre sıcaklıkları sırasıyla 318 K ve 310 K olarak elde edilmiştir. Bu çalışmalardaki deşarj oranının düşük olması, maksimum hücre sıcaklığının mevcut çalışmada daha düşük çıkmasının temel nedenlerinden biridir. Mevcut çalışmada, düşük hava giriş sıcaklıkları ile yüksek hava giriş hızları koşullarında elde edilen batarya sıcaklıkları, optimum çalışma aralığını net bir şekilde sağlamaktadır. Özellikle seçilen sınır şartları, türbülans modeli ve ağ bağımsızlık analizleri de bu durumu desteklemektedir. Ancak, kese tipi lityum-polimer bataryaların sayısal rüzgar tüneli ortamında soğutulması üzerine aynı sınır şartlarını birebir kullanan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu durum, mevcut çalışmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır. Şekil 9'da ise kanatsız batarya modeli için, standart k-ε ve RNG k-ε modellerinden elde edilen sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.

Şekil 9'da görüldüğü üzere, kanatçık kullanılmadığında batarya modelinin sıcaklığı 335 K'i aşmakta olup bu durum, bataryanın termal bozulma riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, kanatçık kullanımının önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, altıgen kesitli kanatçık modelinin kese tipi lityum-polimer bataryaların soğutulmasında başarılı olduğu söylenebilir (Shen vd., 2024).



Şekil 9. 268.15 K ve 278.15 K hava giriş sıcaklığı, 1 m/s hava giriş hızı şartlarında kanatsız batarya modeli için standart k-ε ve RNG k-ε türbülans modellerinden elde edilen sıcaklık dağılımları (a= 268.15 K hava giriş sıcaklığı için standart k-ε, b= 268.15 K hava giriş sıcaklığı için RNG k-ε, c= 278.15 K hava giriş sıcaklığı için standart k-ε, d= 278.15 K hava giriş sıcaklığı için RNG k-ε).

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışma, kese tipi lityum-polimer bataryaların altıgen kesitli kanatçıklar kullanılarak 5C deşarj oranında zorlanmış taşınım ile soğutulmasını içeren özgül HAD analizlerini içermektedir. Simülasyonlar ile ilgili önemli bulgular aşağıda verilmiştir:

- Analizlerden elde edilen hücre sıcaklıkları incelendiğinde, standart k-ε modelinden elde edilen sıcaklık değerlerinin, aynı sınır şartları altında RNG k-ε modelinden elde edilen sıcaklık değerlerinden 2-4 K daha düşük olduğu gözlenmiştir.
- Hava giriş hızının 1 m/s'den 4 m/s'ye çıkarılması, hücre sıcaklıklarında yaklaşık %56 oranında bir azalmaya neden olmaktadır. Bu bağlamda, lityum-polimer bataryaların etkili bir şekilde soğutulması için hava giriş hızlarını artırmak ve hava giriş sıcaklıklarını düşük tutmak daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.
- Özellikle maksimum hücre sıcaklıkları dikkate alındığında, RNG k-ε modelinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Batarya modelinde en alt ve en üst hücreler arası sıcaklık farkı 5 K'i geçmemekte olup bu durum, literatürde yer alan önceki çalışmalar ile uyumludur.

Genel olarak, altıgen kesitli kanatçık modeli, kese tipi lityum-polimer bataryaların soğutulmasında başarılı bulunmuştur. Gelecek çalışmalarda ise:

- Dinamik rüzgar tünelinin yeni çalışmalarda kullanılması
- Bu kanatçık modelinin farklı sınır şartlarında, lityum-iyon batarya modüllerinde elektrikli araçlar için kullanılması
- Belirsizlik analizi ve zamana bağlı analizlerin kullanılmasıyla batarya soğutmasında daha etkili sonuçlar elde edilmesi
- Sayısal modelin en azından bir bölümünün, literatürde yer alan benzer çalışmalarla doğrulamasının yapılması
- Farklı kanatçık yerleşimleri ve farklı kanatçık boyutları ile daha fazla parametrenin çalışılması
- Kare, dairesel, yedigen kesitli kanatçıklar ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve parametrik analiz yapılması
- Uygun deneysel düzenek kurulması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması
- Çalışmalarda Nusselt sayısı, basınç kaybı ve ısı transfer katsayısının hesaplanarak daha detaylı sonuçlar elde edilmesi
- Üç boyutlu yazıcı ile üretilen soğutma kanallarının çalışmalarda kullanılması
- Nano-malzemelerin çalışmalarda kullanılması
- Sesüstü hızlarda çalışan rüzgar tünellerinin kullanılması
- Üç boyutlu görselleştirme yöntemlerinin kullanılması
- HAD analizleri ile hız vektörleri, akış çizgileri ve türbülans yoğunluğu gibi akış sonuçlarının da verilmesi
- y^+ dağılımının simülasyon sonuçları arasında verilmesi
- Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-polimer bataryaların soğutulmasında altıgen kesitli kanatçıkların kullanımı ve bu yöntemin ilgili alanda kullanımına dair yapılan bu çalışmanın deneysel olarak hayata geçirilmesi
- Bu çalışmanın, bu alanda yapılacak nümerik ve deneysel çalışmalar için bir referans olması hedeflenmektedir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abbas, A., Murugan, M., Wang, C. -C. (2021). Performance of displaced fin heatsink in natural convection subject to upward and downward arrangement. *International Journal of Thermal Sciences*, 162(106797).
- Abraham, D. P., Dees, D. W., Christophersen, J., Ho, C., Jansen, A. N. (2010). Performance of high-power lithium-ion cells under pulse discharge and charge conditions. *International Journal of Energy Research*, 34, 190-203.
- Al-Hababbeh, O. M., Aidun, D. K., Marzocca, P., Lee, H. (2008, October). Reliability prediction for a thermal system using CFD and FEM simulations. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 195-204). New York, USA: American Society of Mechanical Engineers.
- Anderson, B. (2011). *Computational fluid dynamics for engineers*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Aris, A. M., Shabani, B. (2017). An experimental study of a lithium ion cell operation at low temperature conditions. *Energy Procedia*, 110, 128–135.
- Arocena, V. M., Danao, L. A. M. (2023). Improving the modeling of pressure pulsation and cavitation prediction in a double-volute double-suction pump using mosaic meshing technology. *Processes*, 11(3), 660.
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., Newman, J. (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132, 5–12.
- Besharat, M., Tarinejad, R., Aalami, M. T., Ramos, H. M. (2016). Study of a compressed air vessel for controlling the pressure surge in water networks: CFD and experimental analysis. *Water Resources Management*, 30, 2687–2702.
- Bistafa, S. R. (2017). On the development of the Navier-Stokes equation by Navier. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40, e2603.
- Cakici, F., Sukas, O. F., Kinaci, O. K., Alkan, A. D. (2017). Prediction of the vertical motions of DTMB 5415 ship using different numerical approaches. *Brodogradnja*, 68, 29–44.
- Çalışır, D., Ekici, S., Midilli, A., Karakoc, T. H. (2023). Benchmarking environmental impacts of power groups used in a designed UAV: Hybrid hydrogen fuel cell system versus lithium-polymer battery drive system. *Energy*, 262, 125543.
- El-Said, E. M. S., Abdelaziz, G. B., Sharshir, S. W., Elsheikh, A. H., Elsaid, A. M. (2021). Experimental investigation of the twist angle effects on thermo-hydraulic performance of a square and hexagonal pin fin array in forced convection. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126, 105374.
- Endalew, A. M., Hertog, M., Delele, M. A., Baetens, K., Persoons, T., Baelmans, M., Ramon, H., Nicolaï, B. M., Verboven, P. (2009). CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(2), 356–368.
- Fayaz, H., Afzal, A., Samee, A. D. M., Soudagar, M. E. M., Akram, N., Mujtaba, M. A., Jilte, R. D., Islam, M. T., Ağbulut, Ü., Saleel, C. A. (2022). Optimization of thermal and structural design in lithium-ion batteries to obtain energy efficient battery thermal management system (BTMS): A critical review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 129–194.
- Gens Tattu Websitesi: <https://genstattu.com/tattu-450mah-14-8v-75c-4s1p-lipo-battery-pack-with-xt30-plug.html>, (Erişim Tarihi: 21 Şubat 2025).
- Ghosh, D., King, K., Schwemmin, B., Zhu, D. (2010). Full Hybrid Electrical Vehicle Battery Pack System Design, CFD Simulation and Testing, *Proceedings of SAE Technical Paper Series*, USA: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA.
- Grotjans, H., Menter, F. (1998, September). Wall functions for general application CFD codes. *4th European Computational Fluid Dynamics Conference* (pp. 1112–1117). Athens.
- Gu, X., Ding, P., Chao, G., Cui, Y. (2024). Analysis and prediction of battery temperature in thermal management system coupled SiC foam-composite phase change material and air. *Journal of Energy Storage*, 104, 114503.
- Hasan, H. A., Togun, H., Mohammed, H. I., Abed, A. M., Homod, R. Z. (2023). CFD simulation of effect spacing between lithium-ion batteries by using flow air inside the cooling pack. *Journal of Energy Storage*, 72, 108631.

- Hu, D., Huang, S., Wen, Z., Gu, X., Lu, J. (2024). A review on thermal runaway warning technology for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 206, 114882.
- Ianniciello, L., Biwolé, P. H., Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of Power Sources*, 378, 383–403.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (1996). *Introduction to Heat Transfer*. New York, NY: John Wiley & Sons Inc.
- Jha, A., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2019). Optimizing beverage pasteurization using computational fluid dynamics. *Preservatives and Preservation Approaches in Beverages*, 15, 237–271.
- Karkoulas, D. G., Tzoganis, E. D., Panagiotopoulos, A. G., Acheimastos, S.- G. D., Margaritis, D. P. (2022). Computational fluid dynamics study of wing in air flow and air–solid flow using three different meshing techniques and comparison with experimental results in wind tunnel. *Computation*, 10(3), 34.
- Koca, F., Güder, T. B. (2022). Numerical investigation of CPU cooling with micro-pin–fin heat sink in different shapes. *The European Physical Journal Plus*, 137, 1276.
- Koca, F., Özcan, R. (2025). Numerical investigation on positional optimisation of extra air channels for conventional battery cooling models. *Physica Scripta*, 100(6), 065242.
- Li, H., Wang, Y., Li, W., Guo, J., Gui, A. (2025). Thermal management system for prismatic lithium-ion batteries coupling with U-type channels and pyrolytic graphite honeycomb fins. *Applied Thermal Engineering*, 259, 124921.
- Li, L., Gong, J., Xia, H., Peng, G., Hao, Y., Meng, S., Wang, J. (2021). Influence of scan paths on flow dynamics and weld formations during oscillating laser welding of 5A06 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 19–32.
- Li, X., He, F., Ma, L. (2013). Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395–402.
- Lin, X. -W., Zhou, Z. -F., Yin, J., Zhu, X. -G., Shi, M. -Y., Chen, B. (2024). A comparative investigation of two-phase immersion thermal management system for lithium-ion battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140472.
- Linxiang, F., Zhang, Z., Sheng, L., Zhiwei, K., Zhu, Z. (2024). Pouch lithium-ion battery thermal management by using a new liquid-cooling plate with honeycomb-like fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 105945.
- Liu, F., Wang, J., Liu, Y., Wang, F., Chen, Y., Du, Q., Sun, F., Yang, N. (2022). Natural convection characteristics of honeycomb fin with different hole cells for battery phase-change material cooling systems. *Journal of Energy Storage*, 51, 104578.
- Liu, F., Wang, J., Liu, Y., Wang, F., Yang, N., Liu, X., Liu, H., Li, W., Liu, H., Huang, B. (2021). Performance analysis of phase change material in battery thermal management with biomimetic honeycomb fin. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117296.
- Marconnet, A., Herberger, S., Paarmann, S., Seegert, P., Wetzel, T. (2024). Impact of aging on the thermophysical properties of lithium-ion battery electrodes. *Journal of Power Sources*, 603, 234367.
- Naresh, G., Sagar, K., V, Reddy, Reddy, L. S., Reddy, E. N., Reddy, N. S., Vohra, M. (2021). Battery thermal management using fins in PCM (Phase Change Material). *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 8(5), b380-b386.
- Ostaneck, J. K., Parhizi, M., Li, W., Kilaz, G., Crompton, K. R. (2023). CFD-based thermal abuse simulations including gas generation and venting of an 18650 li-ion battery cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 170, 090512.
- Özbektaş, S., Sungur, B., Kaleli, A. R. (2024). Zorlanmış hava soğutma esaslı lityum bazlı silindirik bir batarya hücresinin ısı dağılım performansının nümerik incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1586–1603.
- Papageorgakis, G. C., Assanis, D. N. (1999). Comparison of linear and nonlinear rng-based k-epsilon models for incompressible turbulent flows. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 35(1), 1–22.
- Patil, M. S., Panchal, S., Kim, N., Lee, M. -Y. (2018). Cooling performance characteristics of 20 Ah lithium-ion pouch cell with cold plates along both surfaces. *Energies*, 11(10), 2550.
- Paul, S. S., Ormiston, S. J., Tachie, M. F. (2008). Experimental and numerical investigation of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(2), 387–414.
- Podila, K., Rao, Y. F., Krause, M., Bailey, J. (2014). A CFD simulation of 5×5 rod bundles with split-type spacers. *Progress in Nuclear Energy*, 70, 167–175.
- Rodríguez-Iturriaga, P., García, V. M., Rodríguez-Bolívar, S., Valdés, E. E., Anseán, D., López-Villanueva, J. A. (2024). A coupled electrothermal lithium-ion battery reduced-order model including heat generation due to solid diffusion. *Applied Energy*, 367, 123327.

- Roozbehi, A. R., Zabetian Targhi, M., Heyhat, M. M., Khatibi, A. (2023). Modified hexagonal pin fins for enhanced thermal-hydraulic performance of micro-pin fin heat sinks. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 33, 2902–2926.
- Saw, L. H., King, Y. J., Yew, M. C., Ching Ng, T., Chong, W. T., Pambudi, N. A. (2017a). Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery. *Energy Procedia*, 142, 2592–2597.
- Saw, L. H., Ye, Y., Yew, M. C., Chong, W. T., Yew, M. K., Ng, T. C. (2017b). Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system. *Applied Energy*, 204, 1489–1499.
- Shang, Z., Qi, H., Liu, X., Ouyang, C., Wang, Y. (2019). Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 33–41.
- Shen, X., Zhang, X., Pan, H., Chen, M. (2024). Thermal management of Li-ion battery based on honeycomb-structured fins-modified phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 232, 125962.
- Shukla, I., Tupkari, S. S., Raman, A. K., Mullick, A. N. (2011, October). Wall Y+ approach for dealing with turbulent flow through a constant area duct. *The 4th International Meeting of Advances In Thermofluids* (pp.144-153). Melaka.
- Suo, Y., Tang, C., Zhang, H. (2026). Cooling performance optimization of a novel L1—-type structure for the forced air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 117, 110085.
- Sutheesh, P. M., Jose, J., Hotta, T. K., Rohinikumar, B. (2024). Numerical investigations on thermal performance of PCM-based lithium-ion battery thermal management system equipped with advanced honeycomb structures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 158, 107937.
- Talluri, T., Angani, A., Shin, K., Hwang, M. -H., Cha, H. -R. (2024). A novel design of lithium-polymer pouch battery pack with passive thermal management for electric vehicles. *Energy*, 304, 132205.
- Tripathi, P. M., Marconnet, A. M. (2026). A comprehensive fundamental study of static immersion cooling of Li-ion battery: Experiments to data-driven model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 256, 127945.
- Whittaker, S. (1977). *Fundamental Principles of Heat Transfer*. USA: Pergamon Press.
- Xu, X. M., He, R. (2014). Review on the heat dissipation performance of battery pack with different structures and operation conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 301–315.
- Yang, W., Zhou, F., Chen, X., Li, K., Shen, J. (2023). Thermal performance of honeycomb-type cylindrical lithium-ion battery pack with air distribution plate and bionic heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119299.
- Yang, X., Zhao, Z., Liu, Y., Xing, R., Sun, Y. (2021). Simulation of nanofluid-cooled lithium-ion battery during charging: A battery connected to a solar cell. *International Journal of Mechanical Sciences*, 212, 106836.
- Yardımcı, U., Tuğın, V. (2026). Computational fluid dynamics analysis of battery pack with cooling channel integrated with innovative thermoelectric cooling stations. *International Journal of Thermal Sciences*, 220, 110380.
- Zhao, Z., Hu, B., He, J., Lin, M., Ke, H. (2023). Effect of fin shapes on flow boiling heat transfer with staggered fin arrays in a heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120179.
- Zi, J., Long, W., Lin, T., Zhao, R. (2026). Optimization and performance analysis of a battery thermal management system combining piped liquid cooling and phase change material. *International Journal of Thermal Sciences*, 220, 110401.