



Numerical Investigation of the Effect of Inter-Cooling Channels on the Cooling of Lithium-Ion Battery Modules

Mervener Aydın^{1,a,*}, Ferhat Koca^{2,b}

¹-Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

² Mekatronik Mühendisliği / Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 09/05/2025

Accepted: 16/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Abstract- In this study, the cooling of a battery model consisting of 21 18650-type lithium-ion batteries is numerically investigated with intercooling channels placed at 45° angles and at different stages. The rectangular battery box is designed with a width of 92 mm and a length of 136 mm. In order to increase the cooling capacity of the battery box, intercooling channels at different stages were added to the battery box and analyses were performed with the help of computational fluid dynamics method. The effect of Re= 5000, 10000, 20000 and 40000 on heat transfer was investigated. A constant heat generation of 48750 W/m³ was applied to the batteries throughout the study. Standard model and intercooling channels with 45° angle were evaluated in 3 different stages in terms of heat transfer and energy efficiency. As a result of the analyses, when all models were compared among each other, it was observed that the 45° intercooling stage 2 model gave the best thermal performance and the stage 3 model gave the most balanced values in terms of energy efficiency. In addition to these, it was concluded that the in-battery heat exhibits a homogeneous distribution in the 45° intercooling stage 2 model. In this respect, intercooling is considered to have significant potential for future applications in smart vehicle technologies.

Keywords: Lithium-ion battery cooling, Intercooling, Computational fluid dynamics, Finite element method

Lityum-iyon Batarya Modüllerinin Soğutulmasında Ara Soğutma Kanallarının Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 09/05/2025

Kabul: 16/06/2025

ÖZ

Özet – Bu çalışmada, 18650 tipi 21 adet lityum-iyon pilden oluşan batarya modelinin, 45° açıda ve farklı kademelerde yerleştirilen ara soğutma kanallarıyla soğutulması sayısal olarak incelenmiştir. Dikdörtgen yapıdaki batarya kutusu 92 mm genişliğinde ve 136 mm uzunluğunda tasarlanmıştır. Batarya kutusuna soğutma kapasitesini arttırmak için farklı kademelerde ara soğutma kanalları karşılıklı olarak eklenmiş ve analizler hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi yardımıyla yapılmıştır. Re= 5000, 10000, 20000 ve 40000 değerlerinde ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Çalışma boyunca pillere sabit 48750 W/m³ ısı üretimi uygulanmıştır. Standart model ile 45° açıda sahip ara soğutma kanalları 3 farklı kademede, ısı transferi ve enerji verimliliği bakımından değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tüm modeller birbirleri arasında kıyaslandığında, 45° ara soğutma kademe 1 modelinin termal performansı en iyi, kademe 3 modelinin ise enerji verimliliği açısından en dengeli değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra batarya içi ısının 45° ara soğutma kademe 2 modelinde homojen dağılım sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yönüyle akıllı araç teknolojilerinde gelecekteki uygulamalar için ara soğutmanın önemli potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon batarya soğutma, Ara soğutma, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Sonlu elemanlar yöntemi.

Giriş

Günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı geleneksel araçlar yerini daha çevreci ve enerji kaynağının sürdürülebilir olduğu elektrikli araçlara bırakmaktadır. Çevre dostu bir alternatif olarak elektrikli araçlar sessiz çalışma ve düşük karbon emisyonu sayesinde şehir içi ve şehirler arası yolculuklarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır (Eğin, 2019; Menak ve ark., 2021). Elektrikli araçların avantajlarının yanı sıra bazı teknik zorlukları da mevcuttur. Bunların başında şarj süresi, sınırlı sürüş menzili ve batarya termal yönetimi gelmektedir (Hamurcu, Çakır ve Eren, 2021; Aktaş ve ark., 2020). Bu durumda lityum-iyon bataryalar; yüksek enerji, güç yoğunluğu, hafiflik, düşük maliyet ve hızlı şarj olabilme özellikleriyle umut vadetmektedir (Yong ve ark., 2015; Scrosati ve Garche, 2010). Lityum-iyon bataryaların çalışma sıcaklığı 20°C ile 40°C arasında değişmektedir (Kim, Han ve Hong, 2022; Pesaran, 2002; Qian, Li ve Rao, 2016). Çevresel faktörler ve kullanım şartları bu bataryaların fazla ısınmasına ve elektrikli araçlarda performans düşüşüne neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda bataryadan maksimum verim alabilmek için batarya paketi soğutma sistemleri önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar batarya termal yönetimini genel olarak dört başlığa ayırmaktadır. Bunlar; sıvı soğutmalı, hava soğutmalı, faz değiştiren malzeme (FDM) ve hibrit sistemlerdir (Bulut, 2022). Elmi ve Zhao (2024), silindirik lityum-iyon pil paketlerinde termal yönetim stratejilerini dört ana termal yönetim tekniği; hava soğutma, sıvı soğutma, faz değişim malzemeleri (FDM) ve hibrit yöntemlere göre detaylı şekilde incelemiştir. Hava soğutma sistemlerinde, pillerin ısı yayma yapıları ile donatılarak ya da soğutma kanatları ile soğutularak soğutma verimliliğinin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Sıvı soğutma sistemlerinde, bir sıvının batarya paketini tamamen dolaşarak şarj ve deşarj esnasında üretilen ısıyı sıvının emmesiyle soğutmanın gerçekleştiğini belirtmişlerdir. FDM'lerin yüksek gizil ısı kapasitelerine dayanıklılığı sayesinde bataryaların sıcaklığı erime noktasının üzerine çıktığında ısının izotermal olarak emilebildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca bataryanın sıcaklığı düştüğünde ise FDM'nin izotermal olarak ısıyı geri bıraktığını belirtmişlerdir. Hibrit soğutma sistemlerinde ise lityum-iyon piller için birden fazla soğutma tekniğinin birleştirilerek daha iyi soğutma performansı gösterdiğini vurgulamışlardır. Lityum-iyon piller için soğutma teknolojilerinin hala yeterince gelişmediğini çalışmaların hem maliyet hem de performans açısından uygun olması gerektiğini ve bunun için FDM'lerin daha fazla teşvik edilebileceğini belirtmişlerdir. Celen ve Kaba (2021), elektrikli araçlarda kullanılan 10x10 dizilime sahip lityum-iyon batarya grubunu hava ve Novec 7200 sıvısıyla soğutarak incelemiştir. Akışkanın giriş sıcaklığını 15°C ve 35°C aralığında, bataryadaki ısı üretimini 2-6 W aralığında ve Reynolds sayısını 22559 ile 67678 aralığında tutarak bu değerlerin ortalama batarya sıcaklığına ve

basınç kaybına etkilerini araştırmışlardır. Hava sıcaklığının 15°C üzerine çıktığı durumlarda sıvı ile soğutma sisteminin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Sabit Reynolds sayılarındaki analizlerde hava ve sıvı soğutma sistemleri arasındaki basınç kayıplarında önemli farklara rastlamamışlardır. Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda sıvı soğutma sistemlerinin daha kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Sıvı soğutma sistemlerinin batarya termal yönetiminde daha verimli olduğunu belirtmişlerdir. Hasan ve ark. (2023), lityum-iyon pillerin performansını iyileştirmek ve farklı soğutucu akış hızlarında çalışma sıcaklığını düşürmek için hava soğutmalı yeni bir tasarım geliştirmişler ve k-ε türbülans modeli kullanarak sonlu hacim tabanlı bir hesaplama aracı ile yeni tasarımı sayısal olarak incelemiştir. 52 adet lityum-iyon pil hücresi bulunan batarya paketini piller arası mesafe $S=2$ mm olacak şekilde üçlü ve ikili olarak yerleştirmişlerdir. Soğutucu akışkan olarak seçtikleri havanın aynı giriş ve çıkış çapında ($d=10$ mm), $Re=15000$, 17500 , 20000 , 22500 , 27500 ve 30000 çalışma aralığında incelemiştir. Reynolds sayısı arttırdıkça batarya hücrelerindeki ortalama hava sıcaklığının ve sıcaklık farkının düştüğünü belirtmişlerdir. Chung ve Kim (2019), elektrikli araçlarda kullanılan sıvı soğutmalı batarya paketi için metal kanatçıklı batarya modeli geliştirmişler ve tasarımı sayısal olarak incelemiştir. Hücrelerin alt tarafına yerleştirilen soğutma plakalarını modifiye ederek hücrelerin yan kısmına yerleştirmişlerdir. Ayrıca asimetrik hücre dizini yerine yeni hücre dizini olarak simetrik hücre dizini uygulamışlardır. Isı iletiminde simetrik hücre dizininin daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Soğutma plakalarını hücrelerin yan kısmına yerleştirmenin ise batarya paketinin hacminde, ağırlığında ve basınç düşüşündeki artışı en aza indirdiğini belirtmişlerdir. Yeni tasarım ile batarya paketinin soğutma performansının ve sıcaklık dağılımının homojen şekilde olduğunu belirtmişlerdir. E ve ark. (2018), 18650 model 60 adet (6x10) lityum-iyon pilden oluşan batarya modülünde termal özellikleri iyileştirmek amacıyla, hava akış giriş ve çıkış konumlarını ayrı levhalar yardımıyla değiştirerek soğutma performansını, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ve simülasyonlar kullanarak incelemiştir. Tasarlanan modelde hava girişinin üstte, hava çıkışının ise altta olduğu konumda termal performans bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir ancak farklı taraflarda konumlandırılan yan giriş ve yan çıkışın sıcaklık dağılımını dengelediğini belirtmişlerdir. Ayrıca ayırıcı plakanın hava akışını yönlendirerek yan girişte hava ile soğutma performansını arttırdığını vurgulamışlardır.

Literatürde var olan çalışmalarda lityum-iyon bataryaların soğutulmasında hava ile soğutma sistemlerinin ortam sıcaklığı ve ısı iletimine bağlı olarak yetersiz kaldığı fark edilmiştir. Bu çalışmada 45° ara soğutma kanal geometrisi ve pil yerleşimi ile termal iletkenliğin artırılması hedeflenerek yenilikçi bir soğutma tasarımı geliştirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde lityum-iyon batarya kutusunun soğutulması için 45° açısına ve 1,2,3 kademelerine sahip ara soğutma kanallarına odaklanılarak modeller oluşturulmuştur ve tasarlanan yeni modeller için sınır şartları verilmiştir. Batarya kutusu standart modeli 92 mm genişlik, 136 mm uzunluk ve 65 mm yükseklik ile tüm geometrilerde kullanılmıştır. Batarya kutusunun ön kısmına 8 mm genişlik ve 60 mm uzunluğa sahip beş adet dikdörtgen giriş yerleştirilmiştir. Batarya kutusunun arka yüzeyinin tam ortasına ise çapı 50 mm olan bir adet çıkış yerleştirilmiştir. Batarya kutusu içerisine lityum-iyon 18650 tip piller merkezleri arası mesafe 22 mm ve piller arası mesafe 4 mm olmak üzere ilk sırada 4 pil sonraki sırada çapraz dizilim ile 3 pil olacak şekilde 6 sıra halinde yerleştirilmiştir. Türbülans modeli standart k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir. Soğutma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Havanın giriş sıcaklığı 299,15 K, giriş hızı (u) ise kanal giriş kesitine göre hesaplanan 10000 Reynolds değerinde 1,72 m/s olarak hesaplanmıştır. Çalışma

boyunca pillerin ısı üretimi 48750 W/m^3 olarak sabit alınmıştır. Batarya kutusuna ek olarak 8 mm genişliğe ve 65 mm uzunluğa sahip iki adet ara soğutma kanalı karşılıklı olarak modellenmiştir. Ara soğutma kanalları 45° ile batarya kutusunun yan kısmına kanalın batarya ile birleştiği kısmın genişliği 40 mm olacak şekilde üç farklı kademede yerleştirilmiştir ve toplam 4 farklı model oluşturulmuştur. Çalışmada; standart model, 45° ara soğutma kademe 1 model, 45° ara soğutma kademe 2 model, 45° ara soğutma kademe 3 model geometrileri için $Re = 5000, 10000, 20000$ ve 40000 değerlerinde çözümler gerçekleştirilmiştir.

Analiz için kullanılan modellerin sınır şartları Tablo 1’de verilmiştir.

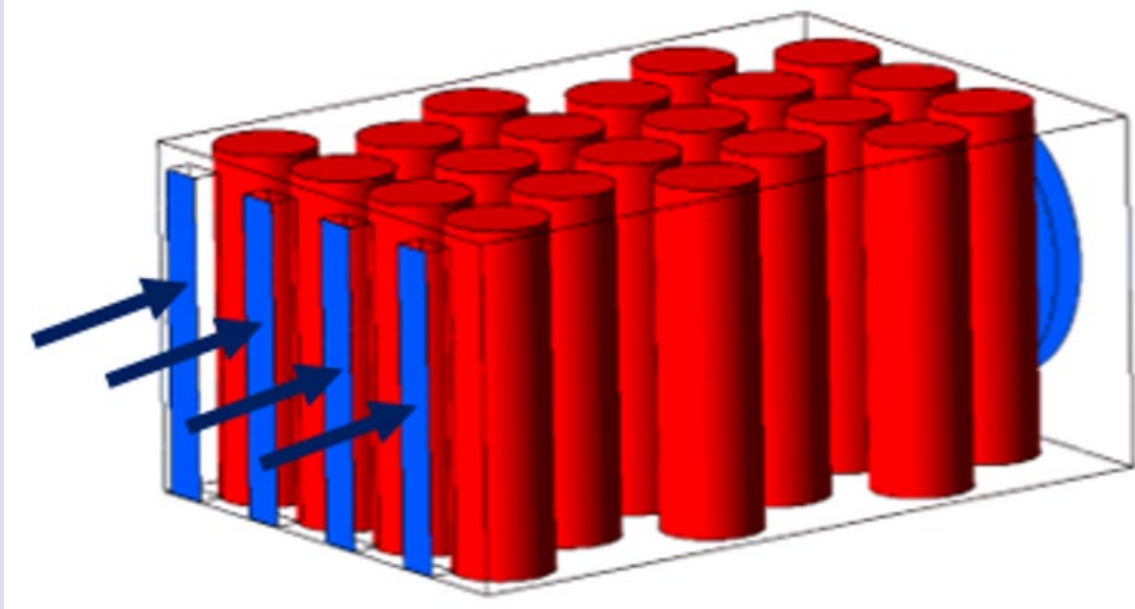
Çalışma boyunca kullanılan standart model batarya kutusunun akış alanı Şekil 1’de verilmiştir.

Standart model batarya kutusu ve 45° açısına sahip 1,2,3 kademe ara soğutma kanallarının ölçüleri Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir. Ayrıca pil dizilimleri kanal yapıları da detaylı bir şekilde aktarılmıştır.

Tablo 1. Modellerin sınır şartları.

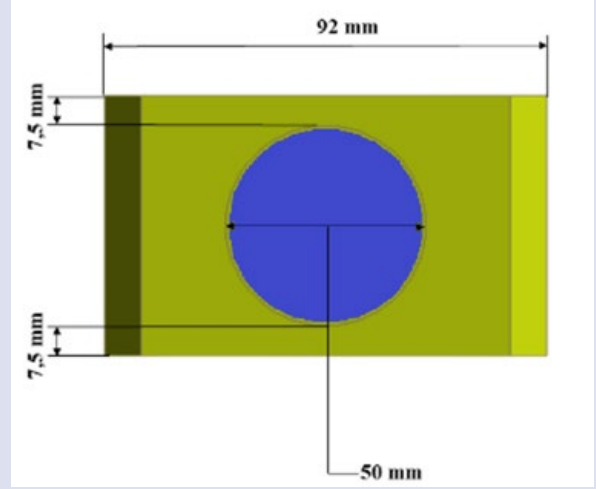
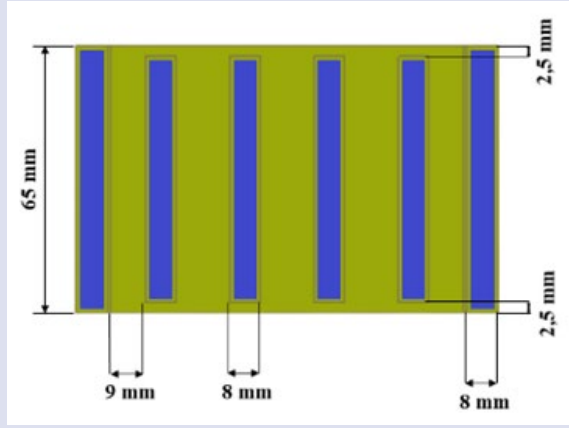
Table 1. Boundary conditions of the models.

Sınır Şartları	Değerler
Isı Üretimi	48750 W/m ³
Giriş Sıcaklığı	299,15 K
Türbülans modeli	Standart k- ϵ
Re aralığı	5000-40000
u	0,86-6,88 m/s

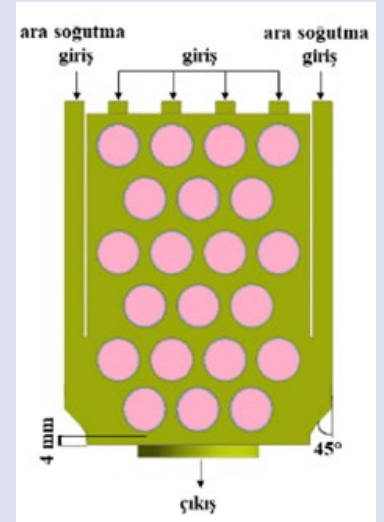
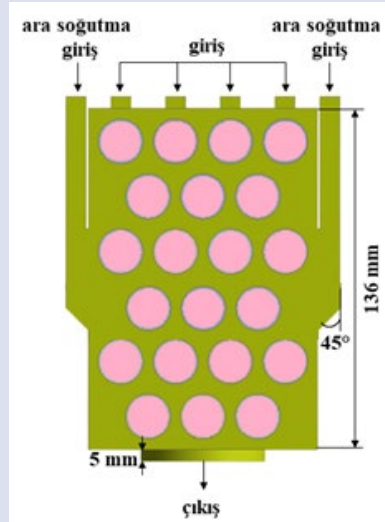
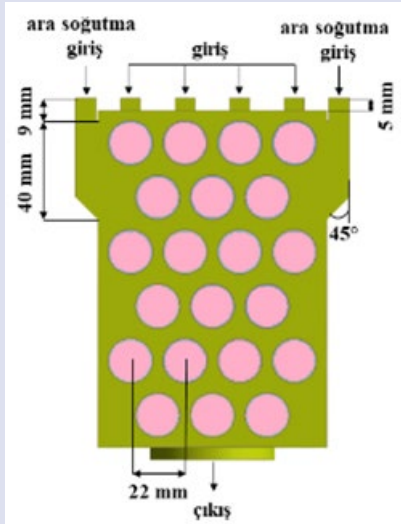


Şekil 1. Standart model akış alanı.

Figure 1. Standard model flow field.



Şekil 2. Batarya modeli giriş ve çıkış ölçüleri.
Figure 2. Inlet and outlet dimensions of the battery model.



Şekil 3. 45° ara soğutma kanallarının ölçüleri.
Figure 3. Dimensions of 45° inter-cooling channels.

Çalışmada havanın giriş sıcaklığı 299,15 K olarak alınmıştır. Batarya modelleri 5000, 10000, 20000 ve 40000 Reynolds değerlerinde test edilmiştir. Giriş hava sıcaklığı referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Reynolds sayısı Denklem 1 kullanılarak elde edilmiştir:

$$Re = \frac{\rho * u_0 * D_h}{\mu} \quad (1)$$

Hesaba göre akışkan yoğunluğu ρ , akışkan giriş hızı u_0 , hidrolik çap D_h ve akışkan dinamik viskozitesi μ olarak ifade edilmektedir. Dikdörtgen kanal için hidrolik çap hesabı a ve b dikdörtgenin kenar uzunluklarını ifade edecek şekilde Denklem 2 kullanılarak elde edilmiştir:

$$D_h = \frac{2 * a * b}{a + b} \quad (2)$$

Boyutsuz bir sayı olan Nusselt sayısı Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Nu = \frac{h * D_h}{k} \quad (3)$$

Hesaba göre konvektif ısı transfer katsayısı h , akışkanın ısı iletkenliği ise k olarak ifade edilmektedir. Sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybını ifade eden sürtünme faktörü ise Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f = \frac{\Delta P * D_h}{2 * \rho * u_0^2 * L} \quad (4)$$

Burada basınç düşüşü ΔP olarak ifade edilirken kanal uzunluğu ise L olarak ifade edilmektedir.

Isıl ve hidrolik performansın birlikte ifade edildiği performans kriteri (PEC) sayısı Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$PEC = \frac{Nu_b / Nu_m}{f_b / f_m^{(1/3)}} \quad (5)$$

Burada b alt simgesi temel model için, m alt simgesi ise değerlendirilen model için kullanılmaktadır.

Referans alınan (Tuğan ve Yardımcı, 2023) çalışmadaki modelden yola çıkılarak oluşturulan standart modelin ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi yapılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışması 5 çözüm sayısı için gerçekleştirilmiştir. İlk çözümlemede 300806 ağ sayısı kullanılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi boyunca yapılan çözüm sayısı, toplam ağ sayısı, ΔP değerleri ve

Nusselt sayısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Nusselt sayısı toplam ağ sayısı grafiği ise Şekil 4’te verilmiştir.

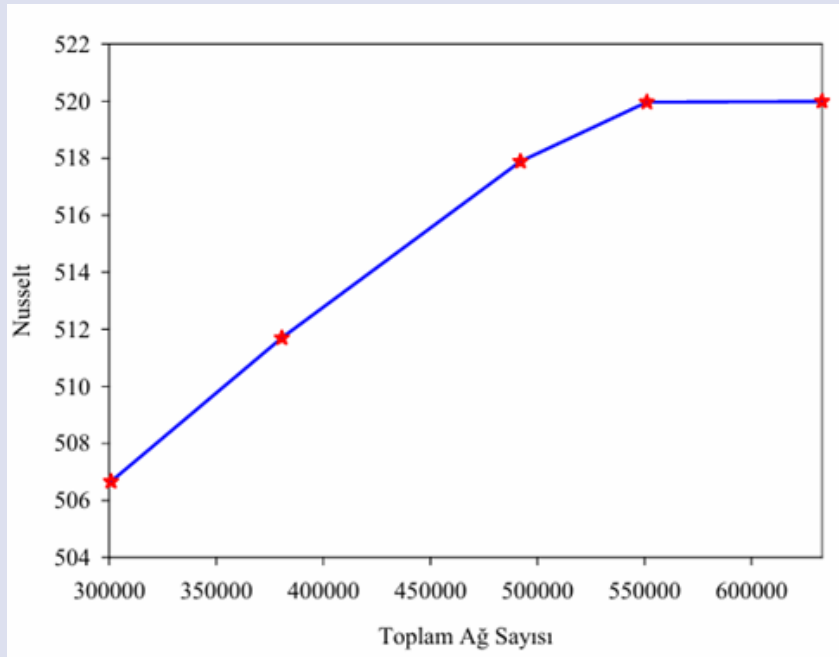
Tablo 2 ve Şekil 4’e göre basınç düşüşüne bakıldığında birbirine yakın artış ve azalışların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ağ sayısının daha fazla artırılmasının basınç düşüşüne bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Nusselt sayısı ilk çözümde 506,6 olarak kaydedilirken üçüncü çözümde 517,8 olarak kaydedilmiştir. Çalışmada hızlı çözüme ulaşmak ve doğru sonuç elde etmek için 551132 ağ sayısı kullanılmıştır. Bu işlemten sonra sayısal çalışmanın doğrulanması işlemine geçilmiştir. Referans çalışmada (Tuğan ve Yardımcı, 2023) kullanılan geometrik modelin sınır şartları kullanılarak giriş hızı 1 m/s, 2 m/s ve 3 m/s değerlerinde çözüm yapılmıştır. Şekil 5’te mevcut çalışma ile Tuğan ve Yardımcı’nın (2023) batarya modelinin ΔP -v grafiği verilmiştir.

Şekil 5’teki grafik incelendiğinde sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu göze çarpmaktadır. Doğrulama işleminden sonra standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin analizine geçilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışması.

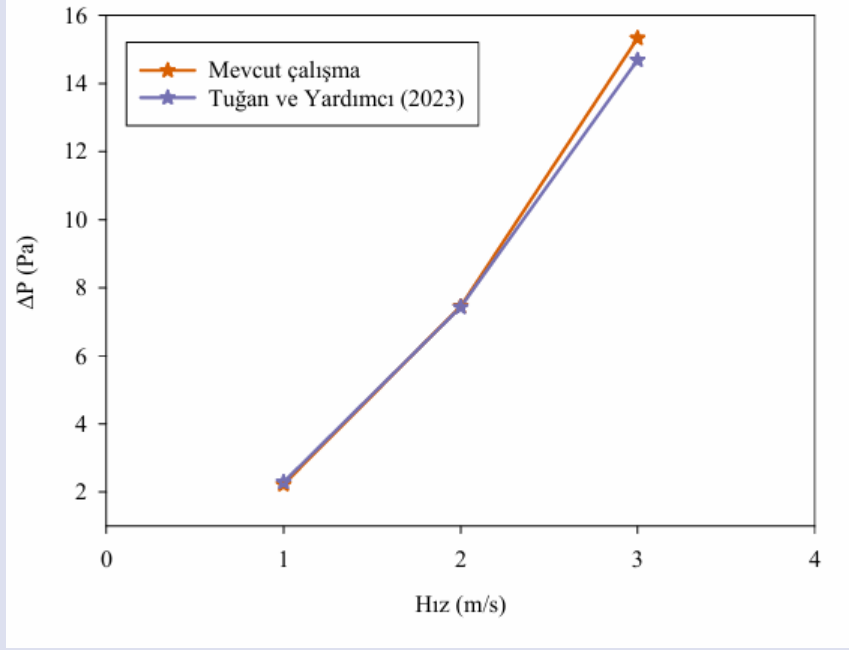
Table 2. Independence from the mesh structure.

Çözüm sayısı	Toplam Ağ Sayısı	ΔP	Nu sayısı
1	300806	20,69	506,6649
2	380571	20,95	511,7011
3	492050	20,93	517,8895
4	551132	20,92	519,9666
5	632942	20,94	519,9261



Şekil 4. Toplam ağ sayısı Nusselt değişimi grafiği.

Figure 4. Plot of total number of meshes-Nusselt change.



Şekil 5. Tuğan ve Yardımcı (2023) batarya modeli ile mevcut çalışmanın basınç düşüşü hız grafiği.
Figure 5. Pressure drop rate graph of Tuğan and Yardımcı (2023) battery model and the present study.

Bulgular

ANSYS Fluent programı yardımıyla yapılan analizler sonucunda standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin Re= 5000, 10000, 20000 ve 40000 sayılarında ısı transferine etkisi, basınç düşüşüne etkisi, sürtünme faktörüne etkisi, sıcaklık konturları, hız akış çizgileri ve PEC grafiği sırasıyla verilmiştir. Dört farklı Reynolds sayısı değerinde batarya modellerinin ısı transferi incelenmiştir. Şekil 6' da tasarlanan modellerin Re-Nu grafiği verilmiştir.

Şekil 6'ya göre Reynolds sayısı arttıkça her modeldeki Nusselt sayısında da bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 7'de basınç düşüşünün Reynolds sayısına göre değişim grafiği verilmiştir.

Şekil 7'deki grafik incelendiğinde en düşük basınç düşüşünün standart modelde gerçekleştiği standart modeli sırasıyla 45° ara soğutma kademe 3, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 1 modellerinin izlediği gözlemlenmiştir. Şekil 8'de sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişim grafiği verilmiştir.

Şekil 8'e göre sürtünme faktörünün en düşük olduğu model standart modelken en yüksek olduğu model 45° ara soğutma kademe 1 modeli olarak kaydedilmiştir.

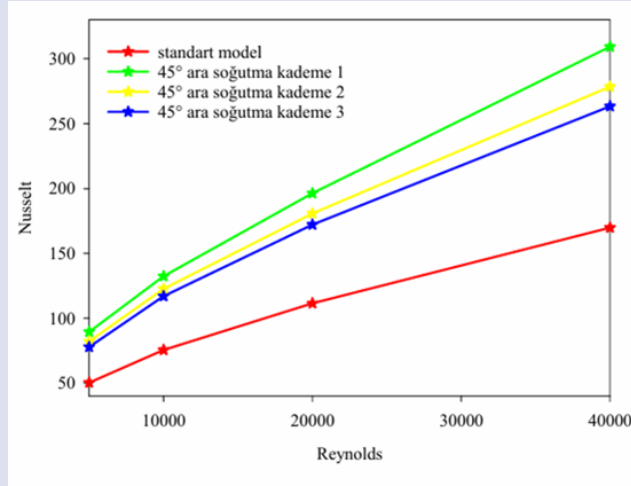
Şekil 9'da Re=10000 değerinde standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin sıcaklık konturları verilmiştir. Piller arası sıcaklık farkının minimum olduğu, homojen ısı dağılımı en iyi modeller 45° ara soğutma kademe 1 ve 45° ara soğutma kademe 2 modelleri olarak ortaya çıkmıştır. Standart model ve kademe 3 modellerinde çıkış kesitine yakın pillerde aşırı ısınma olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da Re=40000 değerinde standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin sıcaklık konturları verilmiştir. En yüksek sıcaklık değerleri tüm Reynolds sayılarında standart modelde gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanalları kullanılan modellerde standart modele göre daha iyi soğutma gözlemlenmiştir. Re= 10000 değerinde standart modelin maksimum sıcaklığı ara soğutma kanalları kullanılarak 309,36 K değerinden 307,30 K değerine düşmüştür. Re= 40000 değerinde ise 303,42 K değerinden 302,45 K değerine düşmüştür.

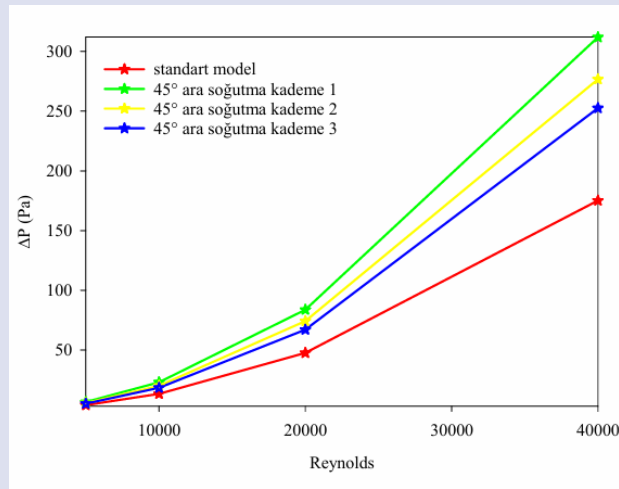
Şekil 11'de bütün modellerin en düşük Re sayısı olan Re=10000 değerinde, Şekil 12'de bütün modellerin en yüksek Re sayısı olan Re= 40000 değerinde hız akış çizgileri verilmiştir. Re= 10000 ve Re= 40000 değerlerinde batarya kanalları boyunca hız akış çizgileri incelendiğinde standart modelde akışın düzenli olduğu ve piller arasındaki düşük hızlı bölgelerin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Modeller arasında en dengeli dağılımların 45° ara soğutma kademe 2 modelinde olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 13'te PEC sayısı Reynolds değişim grafiği verilmiştir. PEC sayısı sonuçlarının en iyi olduğu modeller sırası ile 45° ara soğutma kademe 3, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 1 modelleri olarak gözlemlenmiştir. PEC çalışma aralığının Re= 5000 ve Re= 10000 değerleri arasında en iyi seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

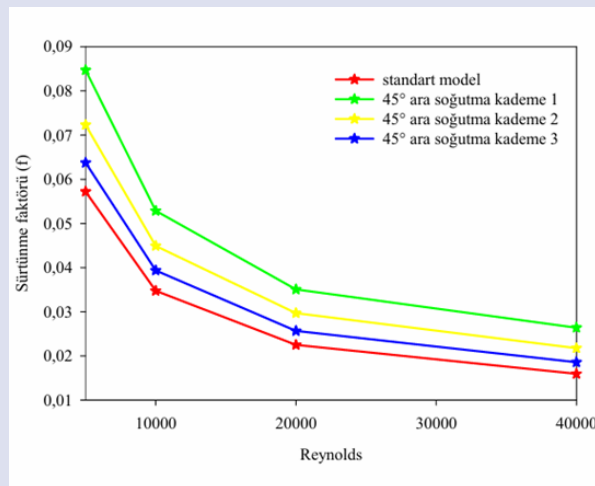
Re= 5000 değerinde 4,16 sayısı ve Re= 10000 değerinde 4,10 sayısı ile diğer modellere göre daha verimli ısı transferi performansının 45° ara soğutma kademe 3 modelinde sağlandığı kaydedilmiştir. Bu durum ısı performans ile hidrolik performans arasındaki durumu ortaya koymaktadır.



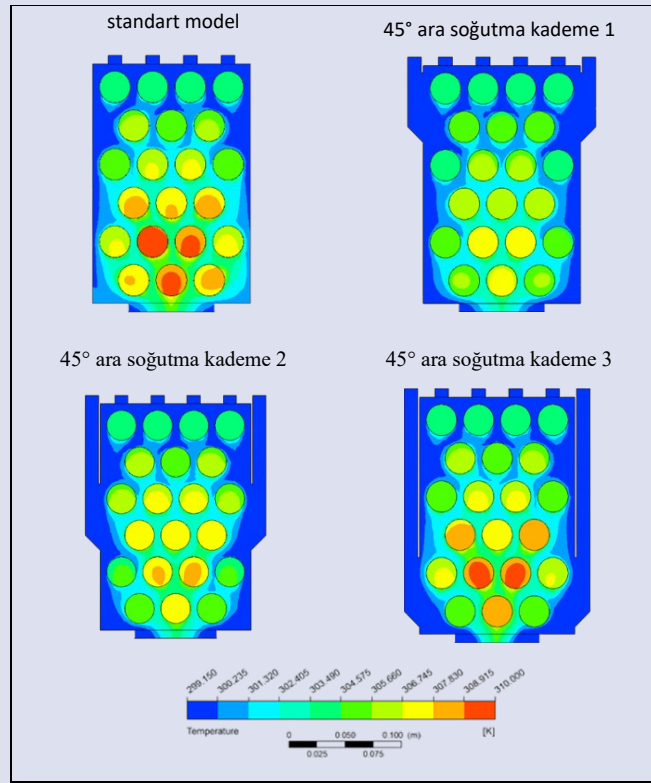
Şekil 6. Re-Nu değişim grafiği.
Figure 6. Re-Nu change graph.



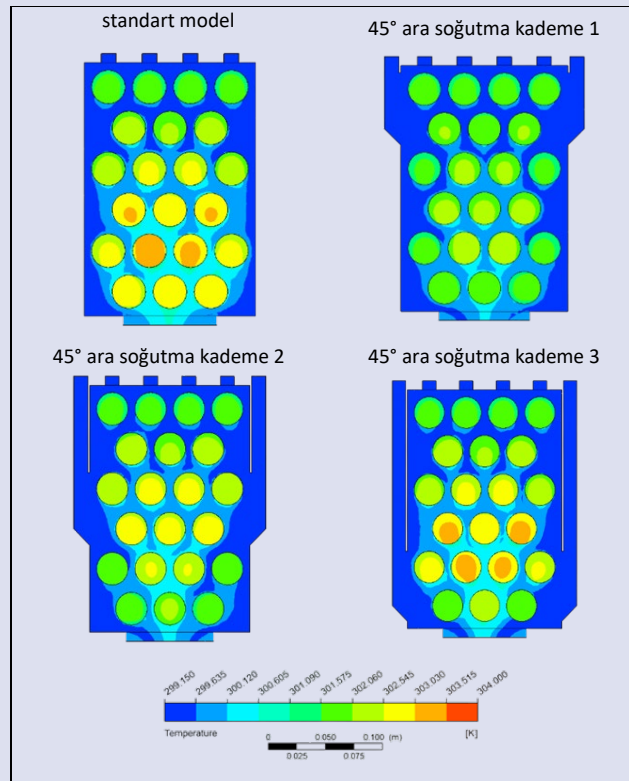
Şekil 7. Re- ΔP değişim grafiği.
Figure 7. Re- ΔP change graph.



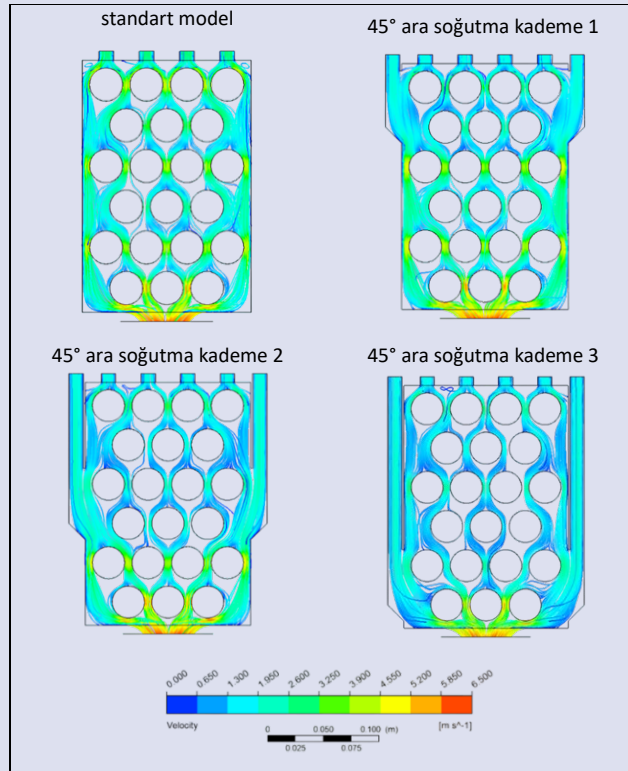
Şekil 8. Re-f değişim grafiği.
Figure 8. Re-f change graph.



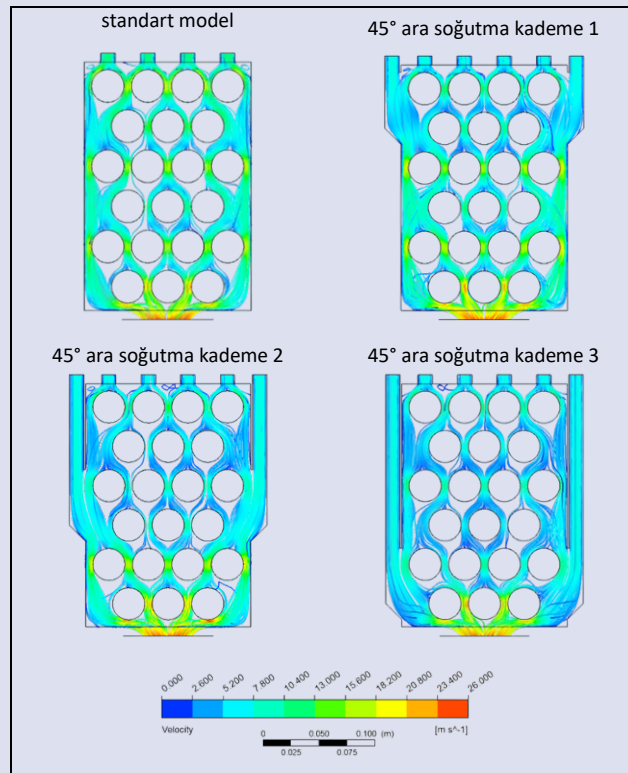
Şekil 9. $Re= 10000$ değerinde sıcaklık konturları.
Figure 9. Temperature contours at $Re= 10000$.



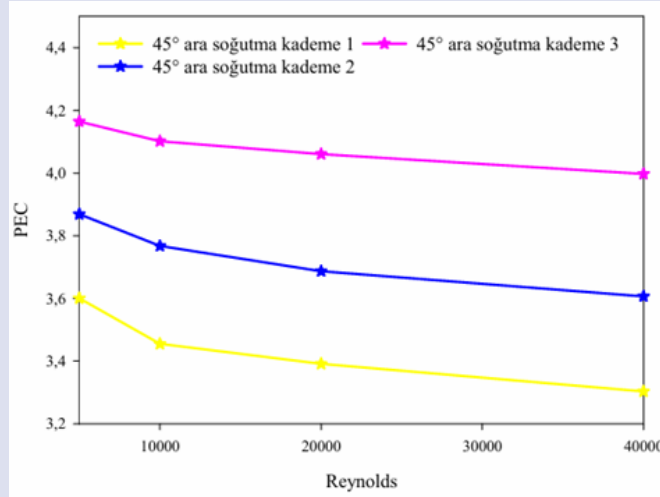
Şekil 10. $Re= 40000$ değerinde sıcaklık konturları.
Figure 10. Temperature contours at $Re= 40000$.



Şekil 11. $Re=10000$ değerinde hız akış çizgileri.
Figure 11. Velocity streamlines at $Re=10000$.



Şekil 12. $Re=40000$ değerinde hız akış çizgileri.
Figure 12. Velocity streamlines at $Re=40000$.



Şekil 13. PEC-Re değişim grafiği.

Figure 13. PEC-Re change graph.

Tartışma

Nusselt sayısı bir akışkan yüzeyi üzerindeki taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferinin ne kadar iyileştiğini ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Nusselt sayısının büyüklüğü ısı transferinin iyileşmesi ile doğru orantılıdır. Reynolds sayısı arttıkça Şekil 6'ya göre her modelde Nusselt sayısı bir artış göstermiştir. Standart modele göre ara soğutma modellerinin ısı transferini iyileştirdiği kaydedilmiştir. Basınç düşüşü giriş basıncı ile çıkış basıncı arasındaki farktır ve ne kadar düşük olursa sistem o kadar verimli çalışmaktadır. Şekil 7'de standart model diğer modellere kıyasla daha düşük değerler göstermiştir. Ara soğutma kanalları eklenen modeller türbülansı arttırdığı için basınç düşüşünü yükseltmiştir. 45° kademe 3 modelinin en yüksek değeri vererek soğutma performansını arttırdığı ancak enerji verimliliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Sürtünme faktörü akış direncini ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Şekil 8'de Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün tüm modellerde azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sürtünme faktörü değeri 45° ara soğutma kademe 1 modelinde kaydedilmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 ve 3 modellerinde ise türbülansın artmasıyla sürtünme faktörü değerlerinin de kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da sıcaklık konturları incelendiğinde standart modelin ısı yönetiminin yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 modelinin diğer modellerle kıyaslandığında en dengeli sıcaklık dağılımlarını gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de hız akış çizgileri incelendiğinde standart modelde akışın düzenli olduğu ve sadece piller arası bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Bu durum soğutma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer modellere kıyasla 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin daha dengeli akış profili gösterdiği kaydedilmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 modelinde oluşan türbülansın kabul edilebilir seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. PEC sayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörüne bağlı olarak ısı transferi performansının bir ölçütüdür. PEC sayısının 1' den büyük olması basınç düşüşüne rağmen ısı transferinin arttığını göstermektedir (Koca ve Güder,

2022; Koca ve Zabun, 2021; Yıldız, Koca ve Can, 2024). Şekil 13'te 45° ara soğutma kademe 3 modelinde diğer modellere göre daha verimli ısı transferi sağlandığı gözlemlenmiştir. Isıl ve hidrolik performansın bir arada ele alındığı PEC sayısına göre kademe 3 modeli ön plana çıkmaktadır. Batarya modüllerinde göz ardı edilmemesi gereken en önemli parametrelerden birisi de homojen ısıl dağılımının elde edilmesidir. Hız konturlarından bu homojenliğin kademe 2 modelinde daha fazla sağlandığı görülmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, 21 adet 18650 tipi lityum-iyon pilden oluşan bir batarya paketinde, ısı transferini artırmak amacıyla yerleştirilen ara soğutma kanallarının etkisi incelenmiştir. Standart model ve 45° açıda üç farklı kademeye sahip toplam 4 farklı model tasarlanmıştır. Soğutma akışkanı olarak hava seçilmiştir. Lityum-iyon piller için sabit ısı üretimi uygulanmıştır. Isı transferi $Re=5000, 10000, 20000$ ve 40000 değerlerinde analiz edilmiştir. Analizler sonucunda ara soğutma kanalları eklenen batarya modellerinde Nusselt sayıları standart modele kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir. 45° ara soğutma kademe 1 modelinde ısı transferinin en iyi düzeyde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanalları kullanılan modellerin oluşturduğu türbülansa bağlı olarak basınç kayıpları yükselmiştir. En yüksek basınç kaybı 45° ara soğutma kademe 1 modelinde gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanallarının var olduğu modellerde basınç kaybının en az olduğu model kademe 3 modelidir. Enerji verimliliği ve ısı transferi birlikte değerlendirildiğinde, PEC sayısı ele alınmış ve en iyi performansı gösteren 45° ara soğutma kademe 3 modeli ortaya çıkmıştır. Batarya modüllerinde göz ardı edilmemesi gereken en önemli parametrelerden birisi de homojen ısıl dağılımının elde edilmesidir. Hız konturlarından bu homojenliğin kademe 2 modelinde daha fazla sağlandığı görülmektedir. Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde ara soğutma kanallarının elektrikli araç teknolojilerinde batarya soğutma uygulamaları için önemli potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Kaynaklar

- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020). Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 227, 227–238. <https://doi.org/10.31590/ejosat.779720>
- Bulut, E. (2022). *Elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemlerinin optimum tasarımı* (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Celen, A., & Kaba, M. Y. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasının parametrik incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 49–61.
- Chung, Y., & Kim, M. S. (2019). Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 196, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.082>
- Eğin, G. (2019). *Elektrikli araçların batarya sistemlerinde ısı yönetimi* (Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Elmi, M. A., & Zhao, P. (2024). Review of thermal management strategies for cylindrical lithium-ion battery packs. *Batteries*, 10, 50. <https://doi.org/10.3390/batteries10020050>
- E, J., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., Zhang, F., Wen, M., Zhang, B., & Kang, S. (2018). Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*, 144, 231–241.
- Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Biswas, N., & Mohammed, H. I. (2023). Thermal performance assessment for an array of cylindrical lithium-ion battery cells using an air-cooling system. *Applied Energy*, 346, 121354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121354>
- Hamurcu, M., Çakır, E., & Eren, T. (2021). Kullanıcı perspektifli çok kriterli karar verme ile elektrikli araçlarda batarya seçimi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (International Journal of Engineering Research and Development)*, 13(2), 733–749. <https://doi.org/10.29137/umagd.906805>
- Kim, C., Han, J., & Hong, S. (2022). Evaluation of spoiler model based on air cooling on lithium ion battery pack temperature uniformity. *Processes*, 10(3), 505. <https://doi.org/10.3390/pr10030505>
- 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. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03489-7>
- Koca, F., & Zabun, M. (2021). The effect of outlet location on heat transfer performance in micro pin-fin cooling used for a CPU. *The European Physical Journal Plus*, 136, 1115. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02113-4>
- Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., & Tan, N. (2021). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemleri üzerine bir derleme çalışması [A review study on battery management systems in electric vehicles]. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(2), 581–594. <https://doi.org/10.24012/dumf.941851>
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110, 377–382.
- Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium ion battery thermal management system by using mini channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.063>
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>
- Tuğan, V., & Yardımcı, U. (2023). Numerical study for battery thermal management system improvement with air channel in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 72, 108515. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108515>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>
- Yildiz, E., Koca, F., & Can, I. (2024). Optimal design and analysis of the cooled turbine blade in gas turbines with CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 18(1), 60–72. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.1.2853>