Adıyaman University
Journal of Engineering Sciences
Adyü J Eng Sci 2026;13:e260102
Adıyaman Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
Adyü Müh Bil Derg 2026;13:e260102
https://doi.org/10.54365/adyumbd.1748283

Research Article / Araştırma Makalesi

Li-iyon Bataryaların Soğutma Performansına Dairesel ve Halkasal Jetlerin Etkisi

Effect of Circular and Annular Jets on Cooling Performance of Li-ion Batteries

Selma Akçay[1], Sezgin Yaşa [1*]

[1]Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 18100 Çankırı Türkiye

Öz

Bu çalışma çoklu Li-iyon batarya hücreleri içeren bir batarya modülünün soğutma performansına dairesel ve halkasal jetlerin etkisini sayısal olarak incelemektedir. Soğutucu akışkan, T_g=300K sıcaklığına sahip ortam havasıdır. Batarya modülü, 10 adet silindirik Li-iyon batarya hücrelerinden oluşmaktadır. Her bir batarya hücresinin yüzeyi q″ = 800W/m² sabit ısı akısında korunmaktadır. Modülün üzerine yerleştirilen dairesel ve halkasal jetlerin batarya termal yönetimine etkisi 4000≤Re≤16000 aralığındaki Reynolds sayıları için analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları, akışkanın yığın sıcaklığı ve çıkış sıcaklıkları tespit edilmiş ve modüldeki ısı transferi için Nusselt sayısı (Nu) hesaplanmıştır. Ayrıca her iki jet akışı için hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, halkasal jetin dairesel jete göre batarya hücrelerinde daha homojen bir sıcaklık dağılımına neden olduğu ve daha yüksek ısı transferi sağladığı tespit edilmiştir. Artan Reynolds sayısı ile batarya yüzey sıcaklıklarının düştüğü ve ısı transferinin iyileştiği gözlenmiştir. En yüksek ısı transferi Re=16000'de halkasal çarpan jet durumunda Nu=668.99 ve dairesel çarpan jet durumunda Nu=479.62 elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Li-iyon batarya, Batarya termal yönetimi, Halkasal jet, Dairesel jet, Sayısal çalışma*

Abstract

This study numerically investigates the effects of circular and annular jets on the cooling performance of a battery module containing multiple Li-ion battery cells. The coolant is ambient air with a temperature of T_g=300K. The battery module consists of 10 cylindrical Li-ion battery cells. The surface of each battery cell is maintained at a constant heat flux of q″ = 800W/m². The effects of circular and annular jets placed top of the module on the battery thermal management are analyzed for Reynolds numbers in the range of 4000≤Re≤16000. As a result of the analyses, the surface temperatures of the battery cells, the bulk temperature and the outlet temperatures of the fluid are determined and the Nusselt number (Nu) for the heat transfer in the module is calculated. In addition, the velocity and temperature distributions for both jet flows are obtained. The results obtained show that the annular jet causes a more homogeneous temperature distribution in the battery cells and provides higher heat transfer compared to the circular jet. It was observed that the battery surface temperatures decreased and the heat transfer improved with increasing Reynolds number. The highest heat transfer was obtained at Re=16000 with the annular impinging jet at Nu=668.99 and with the circular impinging jet at Nu=479.62.

Keywords: *Li-ion battery, Battery thermal management, Annular jet, Circular jet, Numerical study*

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): sezginyasa@karatekin.edu.tr
Geliş Tarihi (Received):22.07.2025, **Kabul Tarihi (Accepted):** 26.12.2025

1. Giriş

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip elektrokimyasal güç kaynağı sistemleri, hızla gelişen elektronik teknoloji taleplerini karşılamak üzere tasarlanmıştır [1]. Şarj edilebilme özelliğine sahip Li-iyon bataryalar, enerjinin üretimi, depolanması ve harcanması açısından büyük bir öneme sahiptir. Sürekli olarak artmakta olan enerji ve güç yoğunlukları, Li-iyon bataryaların özellikle elektrikli araçlarda yaygın kullanımına olanak sağlamaktadır [2]. Özellikle yüksek akım gerektiren uygulamalar, Li-iyon bataryalarda büyük miktarda ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır [3]. Batarya paketinde oluşabilecek sıcaklık dağılımındaki homojen olmayan durum, modüldeki bataryaların yerleşiminden, dış etkenlerden ve batarya termal yönetiminde kullanılan ısıtma ve soğutma sisteminin türünden kaynaklanabilir. Bir batarya paketindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı hem bataryaların hem de aracın performansının düşmesine neden olacaktır. Bu durum elektriksel olarak dengesiz modüllerin oluşması ile sonuçlanacaktır. Örneğin, Li-iyon bataryaların performanslarının en iyi olduğu sıcaklık aralığı, 25 ile 40 °C arasındadır. Bu sıcaklıklarda, bataryaların performansları ve ömürleri arasında bir denge bulunmaktadır. Modüldeki hücreler arasındaki sıcaklık farklarının 5 °C'den daha düşük olması tercih edilmektedir [4]. Sonuç olarak, bataryaları uygun bir çalışma sıcaklığı arasında tutmak ve böylece performanslarını da artırmak için uygun bir batarya termal yönetim sistemi kullanılmalıdır [5]. Batarya termal yönetim sistemlerinde, yaygın olarak sıvı veya hava gibi soğutucu akışkanların kullanıldığı farklı batarya soğutma sistemleri kategorize edilmektedir [6]

Son yıllarda elektrikli ve hibrit araçlara olan talebin artması, bu araçlarda kullanılan bataryaların etkin soğutulmasını gündeme getirmiştir. Çarpan jetlerin batarya termal yönetiminde kullanılması oldukça yenidir [7–14] ve bu konuda yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Çarpan jetler, ısı transferini iyileştiren en önemli aktif yöntemler arasındadır. Bu nedenle çarpan jetler, pek çok deneysel ve sayısal çalışmaların ilgi odağı haline gelmiştir. Çarpan jetlerin uzun süredir ısıtma, soğutma ve kurutma gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir [15–17]. Bu uygulamalarda, jet geometrisi, jet-hedef yüzey arası mesafe, jet hızı, hedef yüzeyin geometrisi, jet akışkanının özellikleri, hedef yüzeyin sıcaklığı, akış rejimi gibi pek çok parametre incelenmiş ve hedef yüzeyden olan ısı transferinin bu parametrelere bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir [18–21].

Dairesel jetlerin yüzeye olan etkisinin durgunluk noktasında daha etkili olması ve duvar jet bölgesinde jetin etkinliğinin düşmesi, sonraki yapılacak çalışmalarda halkasal jetleri ön plana çıkarmıştır. Bu nedenle tüm yüzeyde etkili olan halkasal jetler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar, halkasal jetlerde elde edilen ısı transferinin, dairesel jetlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir [22–25].

Song ve ark. [9] elektrikli araçlarda kullanım için Li-iyon batarya termal yönetimini iyileştiren, jet çarpması tekniğini, daldırma soğutma teknikleriyle birlikte sinerjik olarak optimize ederek soğutma tasarımı uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemi kullanılarak dağıtılmış yinelemeli optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, ısı transferindeki verimliliği iyileştirmeyi ve toplamdaki girdi maliyetini düşürmeyi hedeflemiştir. Sonuç olarak, üç girişli ve bir çıkışlı modelin, bataryalar için optimum termal performans sağladığını göstermiştir. Bu tasarım, en yüksek batarya sıcaklığını ve ortalama batarya sıcaklığını sırasıyla %17.61 ve %15.05 oranında düşürmüştür. Bu çalışma ile jet çarpma ve daldırma soğutma yöntemlerinin batarya termal yönetiminde önemli etkisinin olduğunu bildirmişlerdir.

Shi ve ark. [10] manifold jet çarpmalı bir daldırma soğutma batarya modülü geliştirmişlerdir. Çok amaçlı optimizasyon için parçacık sürüsü algoritması (PSO) kullanılmış ve 280 Ah bataryaların, batarya deşarj süreçlerindeki ısı üretimi, 4 ısı kaynaklı bir elektro-termal model ile simüle edilmiştir. Geleneksel bir daldırma soğutma modülüyle karşılaştırıldığında, manifold jet çarpmalı modülün, maksimum sıcaklığı daha çok düşürdüğünü ve sıcaklık homojenliğini artırdığını tespit etmişlerdir.

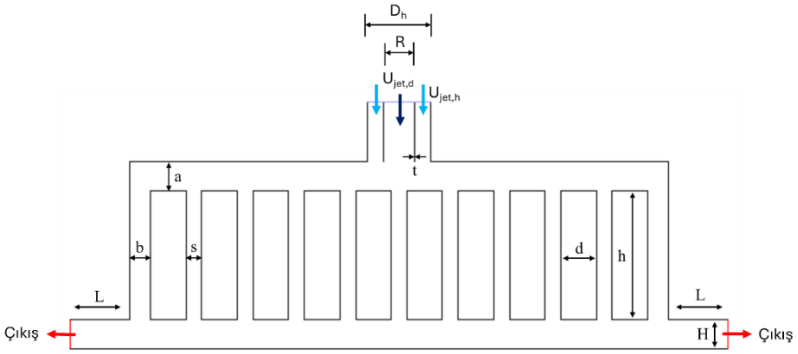
Kaewchoothong ve ark. [14] elektrikli araçlardaki batarya termal yönetimi iyileştirmesi için yenilikçi bir konsept olarak çarpan spiral jet dizisi soğutma yöntemini uygulamışlardır. Dikdörtgen bir kanaldaki çarpan spiral jet dizilerinin, çapraz akışlı ve çapraz akış olmayan sistemdeki kapsamlı akış ve ısı transfer davranışlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, 5000 ile 20000 aralığında değişen jet Reynolds sayılarında ve türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, tüm koşullardaki jet Reynolds sayısının artışıyla ortalama Nusselt sayısının arttığını göstermiştir. Çapraz akış durumunda ortalama ısı transfer hızının, çapraz akışın olmadığı duruma göre %7.8'den daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Batarya termal yönetimi konusunda çarpan jetleri içeren bugüne kadar yapılan çalışmalarda, tekli veya çoklu jet dizilerinin kullanıldığı, çoklu jetlerde kademeli ve sıralı düzenlemelerin kullanıldığı ve jet geometrisinin ise genellikle dairesel olduğu görülmektedir. Açık literatürde halkasal jetlerin batarya soğutma performansına etkilerini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, çoklu Li-iyon bataryaların termal yönetimi üzerinde dairesel ve halkasal jetin etkileri $4000 \leq Re \leq 16000$ aralığındaki Reynolds sayıları için sayısal olarak analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Sayısal Çalışma

Sayısal modelin iki boyutlu geometrisi ve sınır şartları Şekil 1'de gösterilmiştir. Dairesel jetin çapı (R) 16mm'dir. Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h) ise dairesel jetin çapına eşittir. Jetler modülün üzerine yerleştirilmiştir. Akışkan, modülün alt kısmının sağında ve solunda bulunan iki adet çıkış ile modülü terketmektedir. Batarya modülünde toplam 10 adet silindirik 18650 model Li-iyon batarya yerleştirilmiştir. Bataryaların yüzeyi 800W/m² sabit ısı akısında korunmuştur. Sayısal modele ait diğer geometrik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Sayısal modelin geometrisi

Tablo 1. Sayısal modele ait geometrik parametreler

Geometrik parametreler	Sayısal değeri
Dairesel jetin çapı (R)	16mm
Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h)	16mm
Jetin bataryalara olan mesafesi (a)	15mm
Bataryalar arası mesafe (s)	8mm
İlk ve son bataryanın modüle olan mesafesi (b)	10,5mm
Dairesel jet ile halkasal jet arasında et kalınlığı (t)	2mm
Bataryaların çapı (d)	18mm
Bataryaların yüksekliği (h)	65mm
Batarya yüzeyine uygulanan ısı akısı (q")	800W/m²
Çıkış kanalının yüksekliği (H)	15mm
Çıkış kanalının uzunluğu (L)	30 mm

2.2. Matematiksel Model

Çalışmada soğutucu akışkan havadır. Havanın sıkıştırılamaz ve Newton tipi olduğu kabul edilmiştir. Akışkan, türbülanslı akış şartlarında sürekli olarak akmaktadır. Akışkan özelliklerinin değişmediği varsayılmıştır. Yerçekimi ve ışınımla ısı transferi dikkate alınmamıştır. Bu kabuller altında korunum denklemleri aşağıda verilmiştir (Eşitlik 1-3):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\,\overline{u_i' u_j'}\right] \tag{2}$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_i T)}{\partial x_i}\right] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u_i' T'}\right) \tag{3}$$

Burada u akışkan hızıdır, i ve j alt indisleri ise sırasıyla x ve y yönündeki hız bileşenlerini ifade etmektedir. Basınç p ve sıcaklık T ile gösterilmiştir. Formüldeki $\overline{u_i' u_j'}$ ve $\overline{u_i' T'}$ ifadeleri zaman ortalamalı türbülans gerilmelerini temsil eder. C_p, k ve ρ sırasıyla akışkanın özgül ısısını, ısıl iletkenliğini ve yoğunluğudur.

RNG k-ε türbülans modeli için türbülans kinetik enerji parametresi (k) ve türbülans yayınım parametresine (ε) ait eşitlikler aşağıda verilmiştir (Eşitlik 4-7):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k + \rho \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_{2\varepsilon}^{*}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

$$C_{2\varepsilon}^{*} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \tag{6}$$

$$\eta = \frac{SK}{\varepsilon} \quad \text{ve} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \tag{7}$$

Çalışmada, halkasal jet Reynolds sayısı Re_h olarak, dairesel jet Reynolds sayısı Re_d olarak tanımlanmıştır. Halkasal ve dairesel jet Reynolds sayısı 4000≤Re≤16000 aralığında değiştirilmiştir.

Halkasal jet Reynolds sayısı, Re_h Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır:

$$Re_h = \frac{\rho U_{jet,h} D_h}{\mu} \tag{8}$$

Dairesel jet Reynolds sayısı, Re_d Eşitlik 9 ile hesaplanmıştır:

$$Re_d = \frac{\rho U_{jet,d} D_h}{\mu} \tag{9}$$

Burada $U_{jet,h}$ halkasal jet hızını, $U_{jet,d}$ dairesel jet hızını, μ ise dinamik viskoziteyi göstermektedir.
Isı transferi, ortalama Nusselt sayısı ile hesaplanmıştır (Eşitlik 10):

$$Nu = \frac{h\,D_h}{k} \tag{10}$$

Burada h ise ısı taşınım katsayısını ifade etmektedir. Nusselt sayısının hesabında tüm bataryaların yüzeyleri dikkate alınmıştır.

Isı taşınım katsayısı h, Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır:

$$h = \frac{q''}{\Delta T} \tag{11}$$

Burada q″ bataryaların yüzeyine uygulanan ısı akısını ifade etmektedir.

$$\Delta T = (T_s - T_b) \tag{12}$$

Eşitlik 12 ile verilen ΔT, batarya yüzey sıcaklığı (T_s) ve yığın akışkan sıcaklığı (T_b) arasındaki farktır.

Yığın (bulk) akışkan sıcaklığı (T_b) Eşitlik 13 ile hesaplanmıştır:

$$T_b = \frac{(T_g + T_ç)}{2} \tag{13}$$

Burada T_g ve $T_ç$ sırasıyla akışkanın modüle giriş ve çıkış sıcaklıklarını göstermektedir.

2.3. Sayısal Yöntem

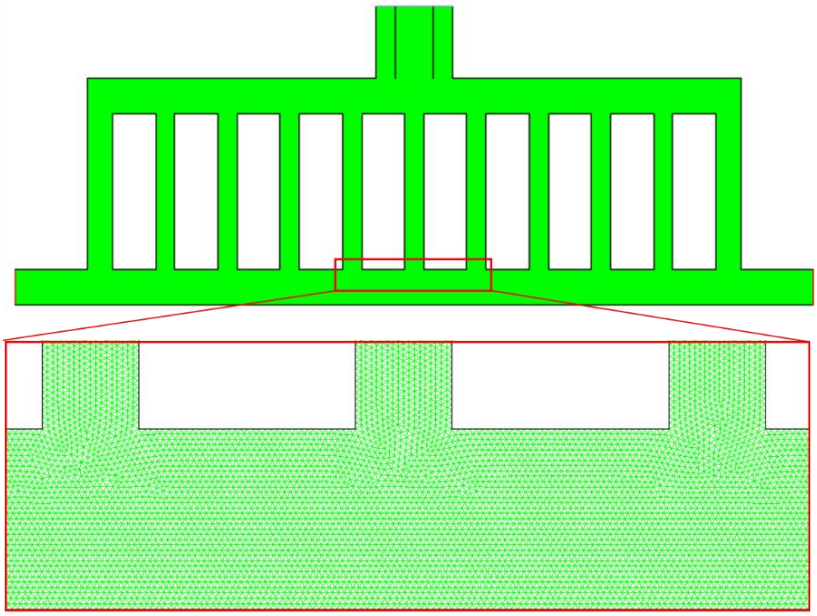
Sayısal çözümler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelin oluşturulmasında ve hücrelere ayrılmasında Gambit yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modele uyarlanan ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Çözüm alanının ağ yapısında, yapılandırılmamış üçgen elemanlar tercih edilmiştir. Şekil 2'den anlaşıldığı gibi üçgen elemanlar sayısal geometriye çok küçük ve çok sık bir şekilde uyarlanmıştır. Bu nedenle mesh yapısında sınır tabaka ağ yapısı kullanılmamıştır. Çalışmada y+<1 olmasından dolayı ilk ağ katmanının sınır tabaka içinde kaldığı anlaşılmıştır.

Tablo 2. Ağ bağımsızlık testi (Dairesel jet, Re=16000).

Eleman sayısı	Yığın akışkan sıcaklığı (K)	Fark %
82120	316.71	-
117644	321.64	1.53
146672	324.85	0.98
189346	325.94	0.33

Çalışmada, çözümlerin eleman sayısından etkilenmediğini belirlemek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bunun için dairesel jet akışında değişen eleman sayıları kullanılarak bu eleman sayılarına karşılık gelen akışkanın yığın sıcaklığı elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. 146672 eleman sayısından sonra akışkanın yığın sıcaklığının değişiminin %1'den düşük olması nedeniyle analizlerde bu eleman sayısının yeterli olduğuna karar verilmiştir.

Korunum eşitliklerinde, taşınım terimleri ikinci dereceden ileri fark şeması ile ayrıklaştırılmıştır. Hız ile basınç bağıntısında SIMPLE modeli kullanılmıştır. Çözümlerde viskoz model RNG k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Bu türbülans modelinin halkasal çarpan jetlerde başarılı sonuçlar verdiği ve hızlı yakınsamaya neden olduğu önceki çalışmalarla bildirilmiştir [26,27] Yakınsama değeri, enerji eşitliğinde 10^{-7}, diğer eşitliklerde ise 10^{-5} alınmıştır.

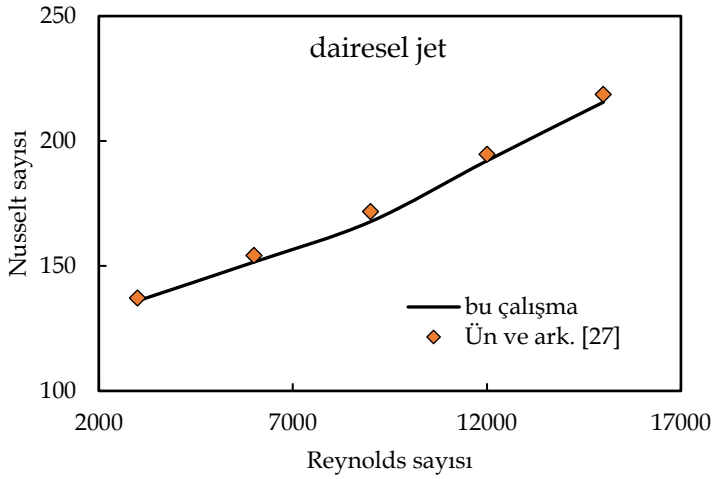


Şekil 2. Sayısal modelin eleman yapısı

2.4. Sınır Şartlar ve Çözümlerin Doğrulanması

Analizlere başlamadan önce sayısal modele bazı sınır şartları tariflenmiştir. Soğutucu akışkan, modülün üzerinde oluşturulan bir nozuldan geçerek bataryaların üzerinden akmaktadır. Jet akışının oluştuğu nozul girişinde, halkasal jet ve dairesel jet için sırasıyla $U_{jet,h}$ ve $U_{jet,d}$ olmak üzere hız giriş sınır şartı tariflenmiştir. Akışkan nozula T_g=300K ortam sıcaklığında girmektedir. Bataryaların yüzeyi q″=800W/m^2 üniform sabit bir ısı akısında korunmuştur. Akışkan, iki ayrı koldan basınç çıkış sınır şartı ile modülü terketmektedir. Diğer yüzeylere duvar sınır şartı uyarlanmıştır. Ayrıca tüm yüzeyler kaymama şartına sahiptir.

Çözümlerden elde edilen sonuçlar, Ün ve ark. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ün ve ark. [27] ısıtılmış düz bir yüzeye çarpan ve bu çalışma ile aynı hidrolik çapa sahip dairesel ve halkasal jetin ısı transfer karakteristiklerini 3000≤Re≤15000 aralığındaki Reynolds sayıları için incelemişlerdir. Dairesel jet için, bu çalışma ile referans çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3'te verilmiştir. Her iki sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bu sonuçların çözümlerin doğruluğunu sağladığı tespit edilerek simülasyonlara devam edilmiştir.

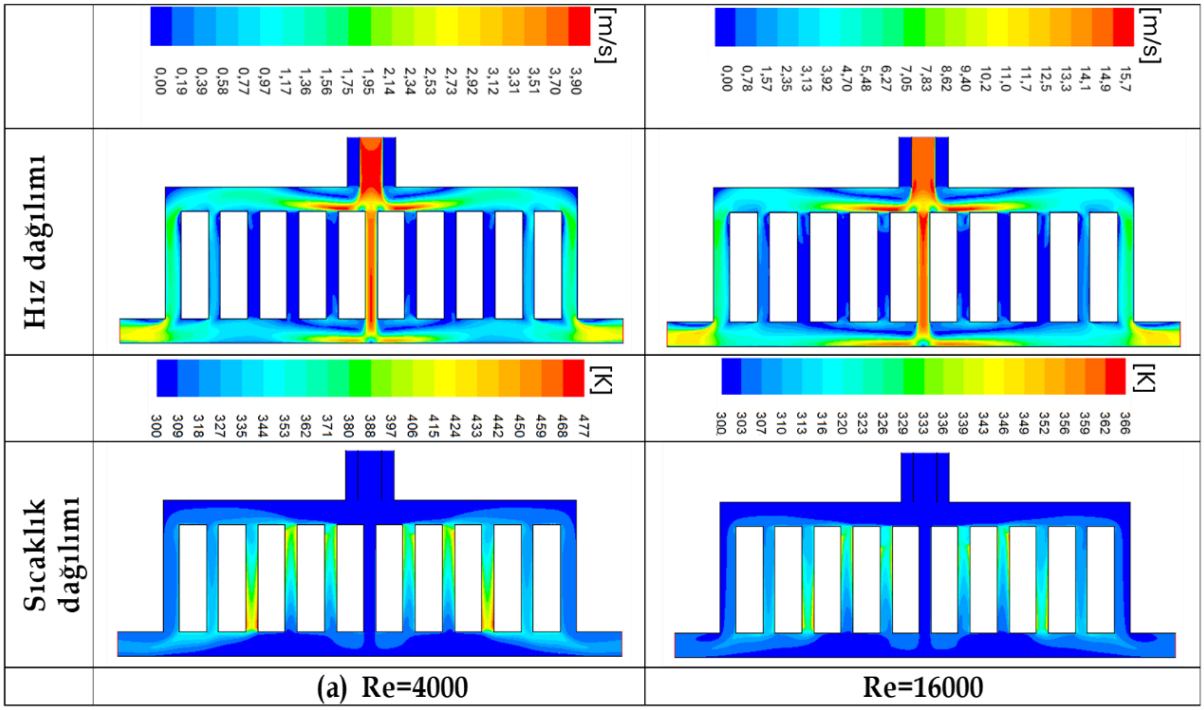


Şekil 3. Sayısal Çözümlerin Doğrulanması (Ün ve ark. [27])

3. Bulgular ve Tartışma

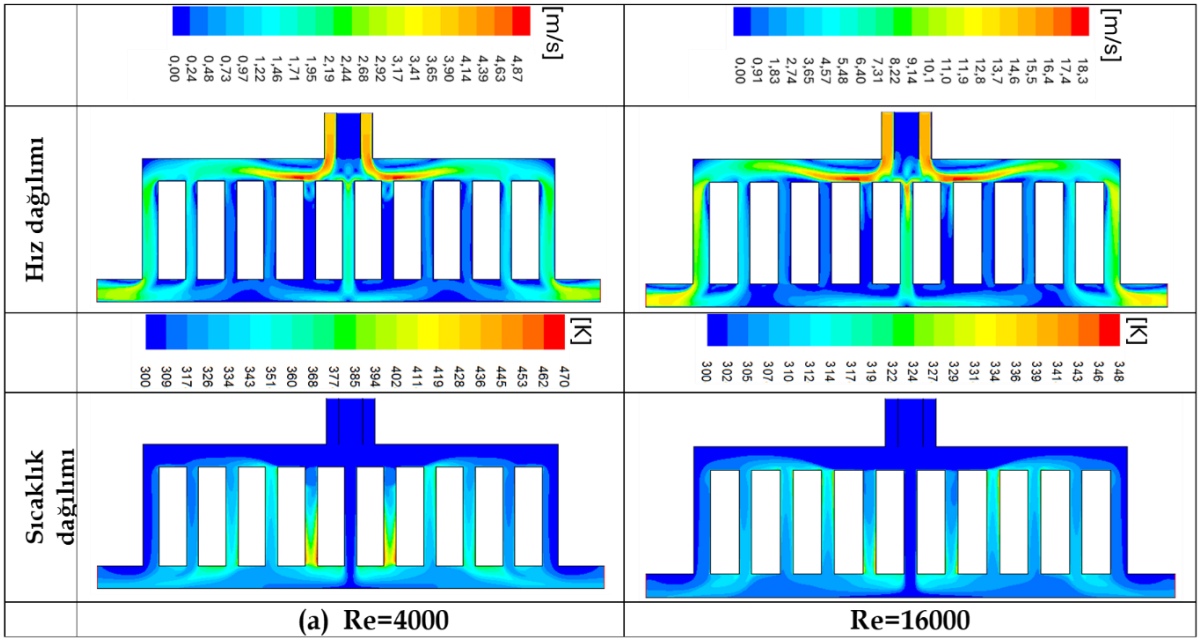
Bu bölümde, batarya termal yönetiminde dairesel jet ve halkasal jetin etkileri farklı Reynolds sayılarında araştırılmıştır. Dairesel ve halkasal jet akışı için hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve tartışılmıştır. Her iki jet akışında batarya hücrelerinin ortalama yüzey sıcaklıkları, akışkanın yığın sıcaklığı ve çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir. Daha sonra modülden olan ısı transferi Nusselt sayısı ile hesaplanmıştır.

Şekil 4, dairesel jetin (a) Re=4000 ve (b) Re=16000 için hız ve sıcaklık dağılımlarını sunmaktadır. Soğutucu havanın batarya paketine dar bir kanaldan girmesi jet etkisi oluşturmuştur. Soğutucu akışkan daha sonra batarya hücreleri üzerinden geçerek çıkışa yönelmiştir. Ortadaki ve kenarlardaki hücreler hariç diğer bataryaların arasında durgun akışkan bölgelerin varlığı görülmektedir. Reynolds sayısındaki artış, akışkanın kütlesel debi ve atalet etkilerinde artışa neden olmakta ve böylece hücrelerin soğuk akışkanla olan temasını artırmaktadır. Re=16000'de artan akış hızı nedeniyle modüle daha fazla soğutucu akışkan girmektedir. Ayrıca artan Re ile türbülans etkileri de artmaktadır. Bu etkiler, batarya hücrelerinin soğutma performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum sıcaklık konturları arasında da farklılıklara neden olmaktadır ve artan Reynolds sayısı ile bataryalar arasındaki sıcaklık gradyanlarının düştüğü görülmektedir.



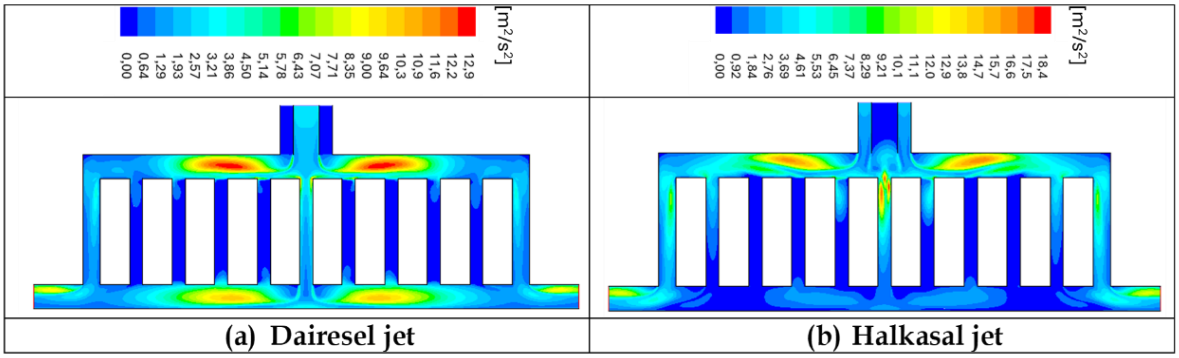
Şekil 4. Dairesel jetin hız ve sıcaklık dağılımları, (a) Re=4000, (b) Re=16000

Şekil 5, halkasal jetin (a) Re=4000 ve (b) Re=16000 için hız ve sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Re=4000 ve Re=16000 için modüldeki hız konturları arasındaki büyük fark görülmektedir. Soğutucu havanın batarya paketine halkasal bir kanaldan girmesi jetin daha geniş bir alana dağılmasına neden olmuştur. Böylece artan Re ile tüm bataryaların arasına soğutucu akışkanın nüfuz ettiği görülmektedir. Şekil 4'e benzer şekilde ortadaki hücreler arasında durgun akışkan bölgelerin varlığı görülmekle birlikte halkasal jet sisteminde bu bölgelerin azaldığı tespit edilmiştir. Sıcaklık konturlarında bu durum artan akış hızı ile sıcaklık gradyanları arasındaki farkın azalmasına neden olmakta ve böylece, bataryaların yüzey sıcaklıklarının düşmesini sağlamaktadır. Dairesel jete göre, halkasal jetin bataryalar etrafında daha homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu görülmektedir.



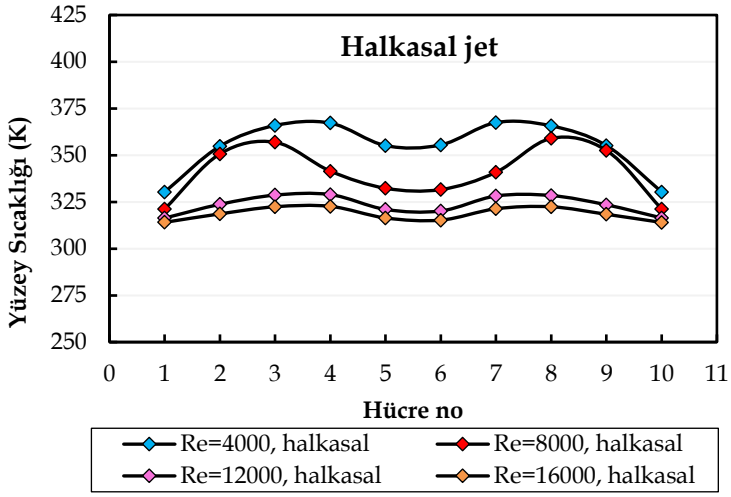
Şekil 5. Halkasal jetin hız ve sıcaklık dağılımları, (a) Re=4000, (b) Re=16000

Şekil 6, dairesel jetin (a) ve halkasal jetin (b) Re=16000 için kinetik enerji dağılımlarını göstermektedir. Soğutucu havanın batarya paketine halkasal kanaldan girmesi, jetin daha geniş bir alanda etkisini artırdığı için soğutucu havanın türbülans kinetik enerjisinin arttığı görülmektedir. Dairesel jette sadece modülün üzerinde kinetik enerjide artış görülmesine rağmen halkasal jette modülün üst ve alt kısımlarında kinetik enerji dağılımının yoğunlaştığı gözlenmektedir. Halkasal jetin türbülans kinetik enerji dağılımının, dairesel jete oranla daha yüksek olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, dairesel jetin daha dar bir alana etki etmesi, halkasal jetin ise daha geniş bir alana etki etmesi olarak yorumlanabilir.



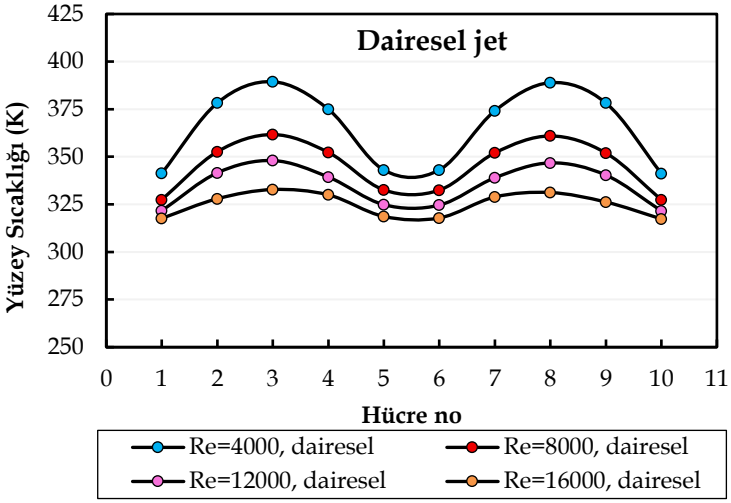
Şekil 6. Re=16000 için türbülans kinetik enerji dağılımları, (a) Dairesel jet, (b) Halkasal jet

Şekil 7'de farklı Reynolds sayılarındaki halkasal jet ile soğutma durumu için modüldeki her bir batarya hücresinin ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi görülmektedir. Reynolds sayısının Re=4000'den Re=16000'e artmasıyla birlikte, bütün hücrelerde ortalama yüzey sıcaklıklarının düştüğü belirlenmiştir. Sıcaklık düşüşü özellikle modülün orta ve kenarlarına yakın hücreler için düşük Reynolds sayılarında (Re≤8000) oldukça fazladır. Ayrıca, Reynolds sayısının Re=12000 ve Re=16000' e artmasıyla birlikte hücreler arasındaki sıcaklık farklarının önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Hücrelerdeki en düşük ortalama yüzey sıcaklık değerleri, Reynolds sayısının Re= 16000 olduğu jet hızında, 1 ve 10 numaralı hücrelerde yaklaşık 314 K olarak gerçekleşmiştir.



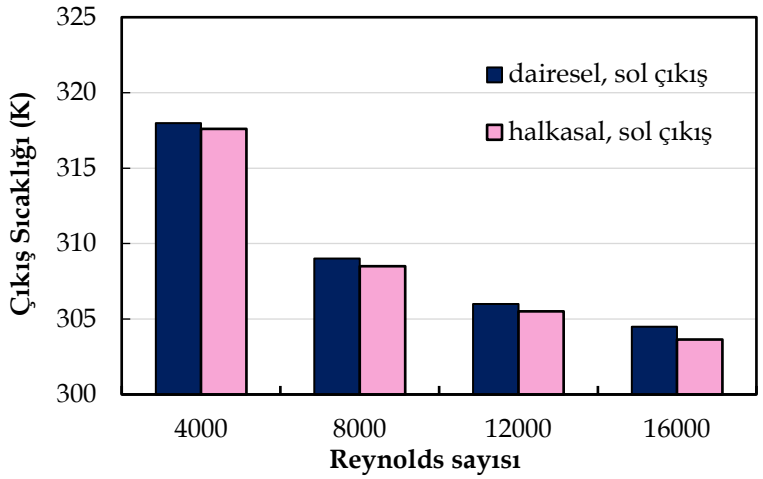
Şekil 7. Farklı Re'de halkasal jet için hücrelerin ortalama yüzey sıcaklıkları

Şekil 8'de farklı Reynolds sayılarındaki dairesel jet ile soğutma durumları için batarya hücrelerinin ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi görülmektedir. Reynolds sayısının Re=4000'den Re=16000'e artması, halkasal jette olduğu gibi bütün hücrelerdeki ortalama yüzey sıcaklık değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Sıcaklık düşüşü, özellikle Re=4000 ve Re=8000 aralığında oldukça yüksektir Ayrıca, Reynolds sayısının Re=12000 ve Re=16000'e artmasıyla birlikte hücreler arasındaki sıcaklık farkının azaldığı gözlenmiştir. Hücrelerdeki en düşük ortalama yüzey sıcaklık değerleri, Reynolds sayısının Re=16000 olduğu jet akışında, modülün kenarlarındaki hücrelerde yaklaşık 317 K olarak belirlenmiştir. Dairesel jet akışında modülün ortasındaki hücrelerin yüzey sıcaklıklarında belirgin bir düşüş tespit edilmiştir. Bu durum dairesel jetin modülün ortasındaki hücrelerin soğutulması üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Hücrelerin ortalama sıcaklık değerleri halkasal jet ile kıyaslandığında dairesel jette daha yüksek olduğu görülmektedir. Halkasal jet ile yapılan batarya soğutma sisteminin, hem hücreler arasındaki homojen sıcaklık dağılımları hem de en düşük ortalama yüzey sıcaklıkları açısından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



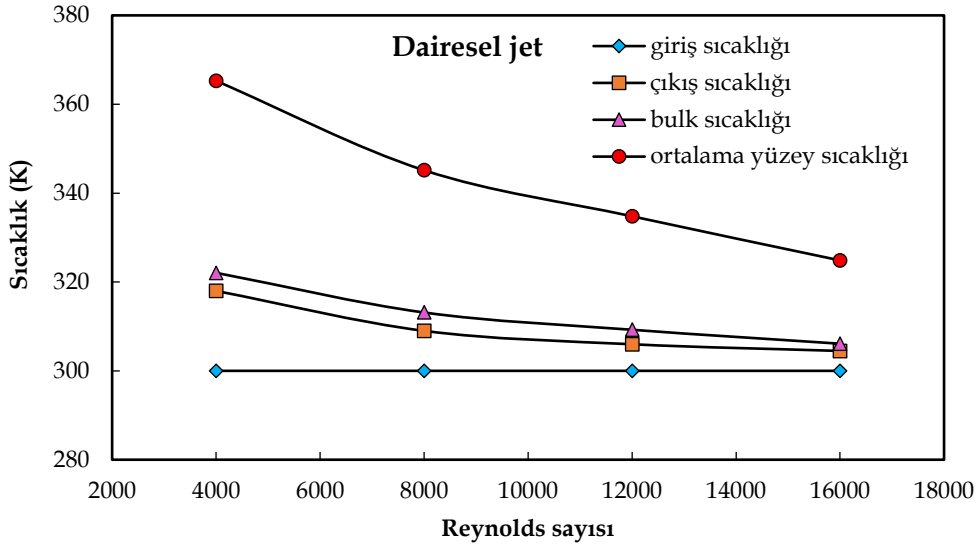
Şekil 8. Farklı Re'de dairesel jet için hücrelerin ortalama yüzey sıcaklıkları

Şekil 9'da farklı Reynolds sayılarında dairesel ve halkasal jet için soğutucu havanın batarya paketinden çıkış sıcaklıkları gösterilmiştir. Her iki jet akışında, Reynolds sayısının Re=4000'den Re=16000'e doğru artmasıyla birlikte, çıkış sıcaklıklarının azaldığı ve bu değerlerin halkasal jet durumunda daha düşük olduğu belirlenmiştir. En düşük çıkış sıcaklığı Re=16000'de halkasal jet durumunda 303.63 K değerine, dairesel jet durumunda 304.47 K değerine ulaşmıştır. En yüksek hava çıkış sıcaklığı ise Re=4000'de yaklaşık 318 K olarak dairesel jet ile yapılan soğutma sisteminde gerçekleşmiştir.



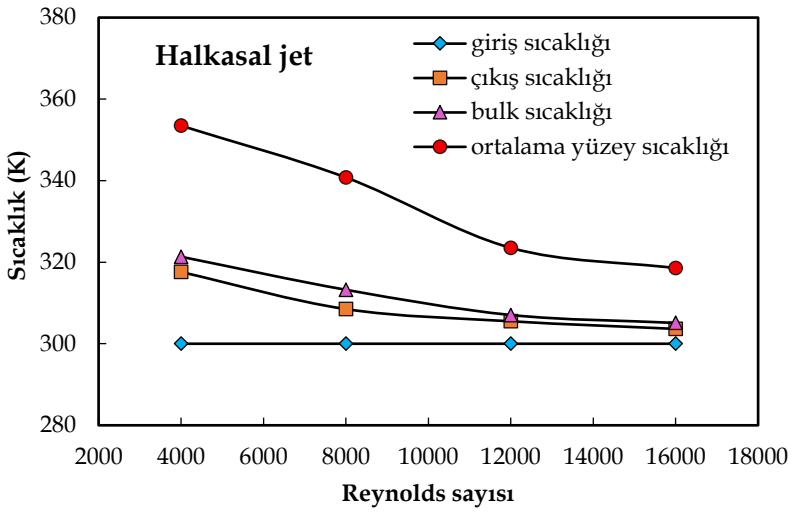
Şekil 9. Reynolds sayıları ile akışkanın çıkış sıcaklıklarının değişimi

Şekil 10'da farklı Reynolds sayılarındaki dairesel jet ile yapılan soğutma durumları için soğutucu havanın batarya paketine giriş ve çıkış sıcaklıkları, yığın akışkan (bulk) sıcaklığı ve ortalama yüzey sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Akışkan giriş sıcaklığı tüm Reynolds sayılarında 300 K olarak sabit kalmaktadır. Reynolds sayısının Re=4000'den Re=16000'e doğru artmasıyla birlikte, çıkış sıcaklıklarının, bulk sıcaklıklarının ve ortalama yüzey sıcaklıklarının azaldığı tespit edilmiştir. Artan Re değerlerinde batarya yüzey sıcaklıklarında belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Bu durum, soğutucu havanın akış hızının artmasının sıcaklık değerleri üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Dairesel jet akışında en düşük ortalama yüzey sıcaklığı Re=16000'de 324.85 K olduğu tespit edilmiştir.



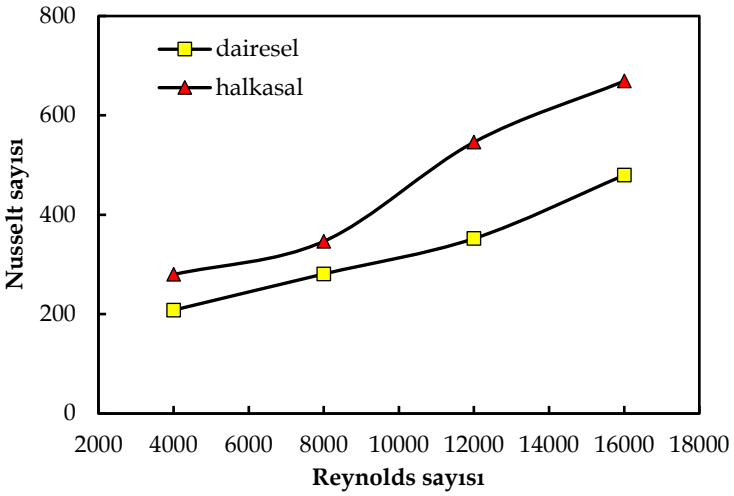
Şekil 10. Dairesel jet için Reynolds sayıları ile sıcaklık değişimleri

Şekil 11'de farklı Reynolds sayılarındaki halkasal jet durumu için havanın batarya paketine giriş ve batarya paketinden çıkış sıcaklıkları, bulk sıcaklıkları ve ortalama yüzey sıcaklıkları gösterilmiştir. Reynolds sayısının Re=4000'den Re=16000'e doğru artması ile giriş sıcaklığı hariç bütün sıcaklık değerlerinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Tüm akış hızlarında giriş sıcaklığı 300 K olarak sabit kalmaktadır. Çıkış sıcaklığı ve bulk sıcaklığı arasındaki fark yüksek Reynolds sayılarında (Re≥12000) azalmaktadır. Halkasal jet akışında en düşük ortalama yüzey sıcaklığı Re=16000'de 318.54 K olduğu tespit edilmiştir. Halkasal jet ile yapılan soğutma durumu ile dairesel jet ile yapılan soğutma kıyaslandığında sıcaklık değerlerinin halkasal jet için daha düşük olduğu ve halkasal jet ile yapılan soğutmanın daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 11. Halkasal jet için Reynolds sayıları ile sıcaklık değişimleri

Şekil 12, farklı Reynolds sayılarında halkasal ve dairesel jet durumları için Nusselt saysındaki değişimi sunmaktadır. Her iki jet akışı için, Reynolds sayısının artması Nusselt sayısının artmasına neden olmuştur. Nusselt sayısındaki artış konvektif ısı transferinin arttığını göstermektedir. Halkasal jet ile yapılan soğutma durumunda ısı transferinin dairesel jete göre daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek ısı transferi, Re=16000 için dairesel jet ve halkasal jet için sırasıyla Nu=479.62 ve Nu=668.99 olarak belirlenmiştir. Dolayısı ile en yüksek Re değerinde halkasal jet akışında dairesel jete göre yaklaşık %40 daha yüksek ısı transferi elde edilmiştir.



Şekil 12. Dairesel ve halkasal jetler için Reynolds sayıları ile Nusselt sayılarının değişimi

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, silindirik Li-iyon bataryaların soğutma performansı dairesel ve halkasal jet akışı için sayısal olarak araştırmıştır. Çalışmada, 10 adet batarya hücresinden oluşan bir modül kullanılmıştır. Soğutucu olarak hava kullanılmış ve hava girişi dairesel ve halkasal jet nozulları ile sağlanmıştır. Akışkan hızı, 4000≤Re≤16000 Reynolds sayısı aralığında belirlenmiştir. Dairesel ve halkasal jetin etkileri gözlemlemek için farklı Re değerlerinde akış ve hız dağılımları elde edilmiştir. Her iki jetin soğutma performansını karşılaştırmak için modülün çıkış sıcaklığı, akışkanın yığın (bulk) sıcaklığı ve bataryaların ortalama yüzey sıcaklığı tespit edilmiştir. Ayrıca her iki jet durumunda farklı Reynolds sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Elde edilen temel bulgular aşağıda listelenmiştir:

- Her iki jet akışında, Reynolds sayısındaki artış batarya yüzey sıcaklıklarını, yığın (bulk) sıcaklıklarını ve soğutucu havanın batarya modülünden çıkış sıcaklıklarını düşürmüştür.
- Halkasal jet durumunda batarya yüzey sıcaklıkları dairesel jete göre daha düşük bulunmuştur.
- Dairesel jetin modülün ortasındaki bataryaların soğuması üzerinde daha etkili olduğu, halkasal jetin ise tüm bataryalar üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle halkasal jet ile yapılan soğutma daha homojen bir sıcaklık dağılımı ve batarya soğutma performansı sağlamıştır.
- Batarya hücrelerindeki en düşük sıcaklık değerleri, modülün kenarlarında konumlanan hücrelerde elde edilmiş ve Re=16000'de halkasal jet ve dairesel jet için bu hücrelerin en düşük sıcaklıkları sırasıyla 314 K ve 317 K olarak bulunmuştur.
- Halkasal jet ile yapılan soğutma durumunda ısı transferinin dairesel jete göre daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek ısı transferi, Re=16000 için dairesel jet ve halkasal jet için sırasıyla Nu=479.62 ve Nu=668.99 olarak belirlenmiştir.
- En yüksek Re değerinde (Re=16000) halkasal jet akışında dairesel jete göre yaklaşık %40 daha yüksek ısı transferi elde edilmiştir.
- Bu çalışma ile çarpan jetlerin batarya termal yönetiminde etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. İleriki çalışmalarda modüldeki bataryaların yerleşimi, jet geometrisi, akış ve akışkan tipi gibi parametreler değiştirilerek bu parametrelerin batarya termal yönetime etkileri araştırılabilir.

Katkı Beyanı

Bu çalışmada ''Selma AKÇAY'' Araştırma tasarımı, literatür taraması ve değerlendirilmesi, veri toplama, veri analizi, verilerin ve analizlerin doğrulanması, bulguların yorumlanması, makalenin yazılmasına ve ''Sezgin YAŞA'', bulguların yorumlanması, veri analizi, literatür taraması ve değerlendirilmesi, makalenin yazılması alanlarına katkı sağlamıştır

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazar/yazarları, çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve finansal çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

[1] Contestabile M, Panero S, Scrosati B. A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. J Power Sources 2001;92:65–69.

[2] Zheng M, You Y, Lu J. Understanding materials failure mechanisms for the optimization of lithium-ion battery recycling. Nat Rev Mater 2025;10:355–368.

[3] H. Behi, D. Karimi, J. Jaguemont, F.H. Gandoman, T. Kalogiannis, M. Berecibar, J. Van Mierlo, Novel thermal management methods to improve the performance of the Li-ion batteries in high discharge current applications. Energy 2021;224:120165.

[4] Pesaran AA, Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. J Power Sources 2002;110:377–382.

[5] Zhang S B, He X, Long N C, Shen Y J, Gao Q. Improving the air-cooling performance for lithium-ion battery packs by changing the air flow pattern. Appl Therm Eng 2023;221:119825.

[6] Li X, Zhang Z, Zhao X, Liu S, Li H, Wang Y. How to select cooling methods for Li-ion batteries? –A review from the perspective of heat flux. J Energy Storage 2025;108:115072.

[7] Kaood A, Elhagali IO, Hassan MA. Investigation of high-efficiency compact jet impingement cooling modules for high-power applications. International Journal of Thermal Sciences 2023;184:108006.

[8] Fu J, Li Y, Cao Z, Sundén B, Bao J, Xie G. Effect of an impinging jet on the flow characteristics and thermal performance of mainstream in battery cooling of hybrid electric vehicles. Int J Heat Mass Transf 2022; 183:122206.

[9] Song C, Kong B, Zeng Z, Yuan N, Shi H. Innovative coupled cooling strategy for enhanced battery thermal management: Synergistic optimization of jet impingement and immersion cooling. Int J Heat Mass Transf 2024; 232:125963.
[10] Shi Q, Liu Q, Zhang B, Yao X, Zhu X, Ju X, et al. Multi-objective optimization of an immersion cooling battery module with manifold jet impingement: Based on precision model for high-capacity batteries. International Communications in Heat and Mass Transfer 2025; 161:108448.
[11] Zhou H, Li W, Yang W, Guo X, Cui L, Liu T. A hybrid battery thermal management strategy that couples internal PCM with external air-jet cooling. J Energy Storage 2024; 98:113127.
[12] Javidan M, Moghadam AJ. Experimental investigation on thermal management of a photovoltaic module using water-jet impingement cooling. Energy Convers Manag 2021; 228:113686.
[13] Zhou H, Niu J, Guo X, Xu L, Song Z, Yin X. Thermal performance of a hybrid thermal management system based on the half helical coil coupled with air jet cooling for cylindrical Lithium-ion battery. Appl Therm Eng 2023; 225:120231.
[14] Kaewchoothong N, Tanthanuch S, Nuntadusit C, Sengchuai K. Flow and Heat Transfer Behaviors of Impinging Spiral Jet Arrays in a Rectangular Channel Based on Battery Cooling Technique. Heat Transfer Engineering 2026:47(1):39-56.
[15] Akdag U, Akcay S, Un N, Danismaz M. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a synthetic annular jet impingement on a flat surface. Experimental Heat Transfer 2025;38:465–84.
[16] Chitsazan A, Klepp G, Glasmacher B. Review of jet impingement heat and mass transfer for industrial application. Heat Transf Res 2021;52:61–91.
[17] Frosell T, Fripp M, Gutmark E. Dynamics of the impingement region of a circular turbulent jet. Exp Therm Fluid Sci 2018;91:399–409.
[18] Akdağ Ü, Akçay S, Karabayir Ml. Düz bir yüzeye çarpan pulsatif jetin ısı transferi karakteristiğinin deneysel incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2022;38:889–900.
[19] Akdag U, Akcay S, Kilic M, Gungor B. Flow and heat transfer analysis of submerged multiple synthetic jet impingement in a square channel with forced-flow. International Communications in Heat and Mass Transfer 2024;159:108103.
[20] Ekkad S V., Singh P. A Modern review on jet impingement heat transfer methods. J Heat Transfer 2021;143(6): 064001.
[21] Selimefendigil F, Oztop HF. Energy harvesting and forced convective heat transfer features of multiple slot jet impingement cooling of partly elastic flat and curved surfaces having double piezo-energy harvesters. Heliyon 2025;11:e43052.
[22] Dutta P, Chattopadhyay H. Numerical analysis of transport phenomena under turbulent annular impinging jet. Computational Thermal Sciences: An International Journal 2021;13(2):1–19.
[23] Fénot M, Dorignac E, Lantier R. Heat transfer and flow structure of a hot annular impinging jet. International Journal of Thermal Sciences 2021;170:107091.
[24] Philippov M V, Chokhar IA, Terekhov V V, Terekhov VI, Baranov IN. Experimental investigation of heat and mass transfer of an annular impinging jet. J Phys Conf Ser 2021:012028.
[25] Zhong Y, Zhou C, Shi Y. Effect of the Nozzle Geometry on Flow Field and Heat Transfer in Annular Jet Impingement. Energies (Basel) 2022;15:4271.
[26] Afroz F, Sharif M A R. Numerical study of turbulent annular impinging jet flow and heat transfer from a flat surface. Appl Therm Eng 2018;138:154–172.
[27] Ün N, Akçay S, Akdağ Ü. Düz Yüzeye Çarpan Eş Eksenli Halkasal ve Dairesel Jetin Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Analizi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi 2024;40: 56–67.