

Dalgalı Bir Yüzeye Çarpan Dairesel ve Halkasal Jetin Isı Transfer Analizi

Selma AKÇAY^{1*}, Metehan AVCI², Hüseyin Can TANRISEVSİN³

^{1,2,3}Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı

¹<https://orcid.org/0000-0003-2654-0702>

²<https://orcid.org/0009-0001-3204-3385>

³<https://orcid.org/0009-0005-8439-9737>

*Sorumlu yazar: selmaakcay@karatekin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 24.01.2025

Kabul tarihi: 02.05.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar kelimeler:

Dalgalı hedef yüzey

Dairesel jet

Halkasal jet

Isı transferi

ÖZ

Bu çalışma, dalgalı bir hedef yüzey üzerine eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetin yüzey soğutma performansını sayısal olarak analiz etmektedir. Sayısal çalışma, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak RNG k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Jet-hedef yüzey arasındaki mesafesi $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur. Dairesel ve halkasal jetin farklı Reynolds sayılarında ($4000 \leq Re \leq 12000$) kombinasyonları ile hedef yüzey üzerindeki ısı transferi hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma, sadece dairesel jetin ve sadece halkasal jetin aktif olduğu durumlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, farklı Reynolds sayılarında elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Elde edilen bulgular, dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı hedef yüzeye çarpmasının sadece dairesel ve sadece halkasal jete göre daha yüksek ısı transferi sağladığını göstermiştir. Dairesel jet Reynolds sayısı $Re_{iç}=12000$ ve halkasal jet Reynolds sayısı $Re_{dış}=4000$ kombinasyonu için dairesel jete göre ısı transferinin 2,49 oranında, halkasal jete göre ise 1,53 oranında iyileştiği gözlenmiştir. Sonuçlar, eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetin dalgalı bir yüzeyin soğutulmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Heat Transfer Analysis of Circular and Annular Jet Impinging on a Wavy Surface

Research Article

Article History:

Received: 24.01.2025

Accepted: 02.05.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Wavy target surface

Circular jet

Annular jet

Heat transfer

ABSTRACT

This study numerically analyzes the surface cooling performance of circular and annular jets simultaneously impinging on a wavy target surface. The numerical study was carried out with RNG k-ε turbulence model by the ANSYS Fluent software. The jet-target surface distance was kept constant as $H/D=2$. The heat transfer on the target surface was calculated with the combinations of circular and annular jets at different Reynolds numbers ($4000 \leq Re \leq 12000$). In addition, the study was compared with the cases where only the circular jet and only the annular jet were active. As a result of the study, the velocity and temperature distributions obtained at different Reynolds numbers were presented. The findings showed that the simultaneous impingement of the circular and annular jets on the target surface provided higher heat transfer compared to only the circular and only the annular jets. For the combination of circular jet Reynolds number $Re_{in}=12000$ and annular jet Reynolds number $Re_{out}=4000$, it was observed that the heat transfer was improved by 2.49 compared to the circular jet and by 1.53 compared to the annular jet. The results show that the simultaneously

Giriş

Çarpan jetler, pek çok alanda ısıtma, kurutma ve soğutma gibi proseslerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çarpan jetler, özellikle elektronik devre elemanlarının ve gaz türbini kanatlarının soğutulmasında, gıdaların kurutulmasında, metallerin tavlansında, tekstil, kimya, cam ve kâğıt gibi pek çok sektörde ısı transferini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir (Celik ve Turgut, 2012; Kalifa ve ark., 2016; Ün ve ark., 2024).

Çarpan jetler, bir kanal ya da lüleden geçen yüksek hızlı akışkanın hedef yüzey üzerine çarpması ile elde edilir. Hedef yüzey üzerine çarpan jetler, yüzey üzerindeki ısı sınır tabakayı incelterek ya da yok ederek ısı transferine olan direnci düşürme esasına göre çalışır (Akdağ ve ark., 2023). Sürekli çarpan jetler, pek çok deneysel ve sayısal çalışmaların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu çalışmalarda, 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 önemli derecede değiştiği bildirilmiştir (Yasaswy ve ark., 2014; Akdağ ve ark., 2024a; Akdağ ve ark., 2024b).

İlk önceki çalışmalarda jet geometrisi dairesel olarak düşünülmüş ve dairesel jetlerin hedef yüzey üzerindeki ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir (Frosella ve ark. 2018; Chitsazan ve ark., 2021; Ekkad ve Singh, 2021). Sonraki çalışmalarda farklı jet geometrilerinin ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Deneysel bir çalışmada, Yasaswy ve ark. (2014) kare geometriye sahip bir jetin ısı transferine etkisini farklı jet hızlarında ($6000 \leq Re \leq 12000$) ve farklı jet-hedef yüzey mesafelerinde araştırmışlar ve hedef yüzey üzerindeki ısı transferinin jet parametrelerine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Lee ve Lee (2000) deneysel çalışmalarında elips geometriye sahip çarpan jetlerin, farklı en boy oranlarının ısı transferine etkilerini dairesel jetler ile karşılaştırarak incelemişlerdir. Jet-hedef yüzey mesafesi $L/D > 6$ durumunda elips geometriye sahip jetlerin dairesel jetlere göre daha düşük ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Kılıç ve Başkaya (2017) silindir, kare ve üçgen şeklinde akış yönlendiricileri kullanarak $8000 \leq Re \leq 43000$ aralığındaki Reynolds sayıları için hedef yüzeyin soğutma performansını incelemişler ve akış yönlendiriciler arasında, üçgen akış yönlendiricileri ile daha yüksek ısı transferi elde edildiğini bulmuşlardır. Alnak ve Karabulut (2019) gıdaların kurutulması üzerine yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarında, farklı lüle geometrilerinin

etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda jet geometrisine bağlı olarak kurutma karakteristiklerinin değiştiğini ve en yüksek kurutmanın durgunluk noktasında meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Dairesel jetlerin hedef yüzey üzerinde durgunluk noktasında daha etkili olması ve duvar jet bölgesinde jetin etkisinin azalması nedeniyle daha sonraki çalışmalarda halkasal jetlerin yüzeyi soğutmadaki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalarda, halkasal jetlerin, dairesele jetlere göre daha yüksek ısı transferi sağladığı kanıtlanmıştır (Philippov ve ark., 2021; Ün ve ark., 2024). Markal (2018) yaptığı çalışmada eş eksenli halkasal çarpan jet ile dairesele çarpan jetin ısı transferini karşılaştırmış ve halkasal jetlerin dairesele jetlere göre ısı transferini iyileştirdiğini tespit etmiştir. Çelik (2006) yaptığı çalışmada eş eksenli halkasal lülenin dairesele lüleye göre daha yüksek ısı transferi sağladığını bildirmiştir. Kalinina ve ark. (2015) deneysel çalışmalarında, halkasal çarpan jetin ısı transferinin dairesele jete göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Sayısal bir çalışmada, Zhong ve ark. (2022) farklı jet geometrileri kullanarak halkasal jetlerin 0.5, 2 ve 4 olmak üzere üç farklı jet-hedef yüzey arası mesafelerde ve farklı jet Reynolds sayılarında ($5000 \leq Re \leq 40000$) ısı transferini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, jet Reynolds sayısı ile Nusselt sayısı arasında bir bağıntı önermişlerdir. Markal ve Aydın (2018) farklı jet-hedef yüzey mesafelerinde eş eksenli ikili halkasal jetin, tek halkasal jete göre ısı transferini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, jet hedef yüzey arasındaki mesafe arttıkça ısı transferinin azaldığını ve ikili halkasal jetin tek halkasal jete göre hedef yüzey üzerinde daha homojen bir ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Terekhov ve ark. (2018) farklı jet hızlarında ($12000 \leq Re \leq 36000$) ve üç farklı jet-hedef yüzey mesafeleri ($H/D=2, 4, 6$) için halkasal jetin iç ve dış çaplarını değiştirerek ısı transferini incelemişler ve $H/D=2$ için ısı transferinin %70 oranında arttığını bulmuşlardır. Afroz ve Sharif (2018) sayısal çalışmalarında, farklı jet hızlarında ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafelerde halkasal çarpan jetin soğutma performansını araştırmışlar ve çalışılan tüm jet hızlarında, jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin azalması ile daha yüksek ısı transferinin sağlandığını bildirmişlerdir. Dutta ve Chattopadhyay (2021) çalışmalarının sonucunda, farklı jet hızları için halkasal çarpan jetlerin $H/D=2$ durumunda jet hızının artması ile çarpma bölgesindeki ısı transferinin de arttığını bildirmişlerdir. Fenot ve ark. (2021) halkasal çarpan jetlerin iç ve dış çap oranlarının ısı transferine etkilerini araştırmışlar ve jetin iç çapının dış çapa oranının artması ile daha yüksek ısı transferi elde edildiğini bildirmişlerdir. Ün ve ark. (2024) düz bir yüzeye çarpan eş eksenli halkasal ve dairesele jetin ısı transferini farklı jet Reynolds sayıları ve jet-hedef yüzey arası mesafeler için sayısal olarak incelemişlerdir. Jet hızının artması ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin azalması ile hedef yüzeyden olan ısı transferinin iyileştiğini göstermişlerdir.

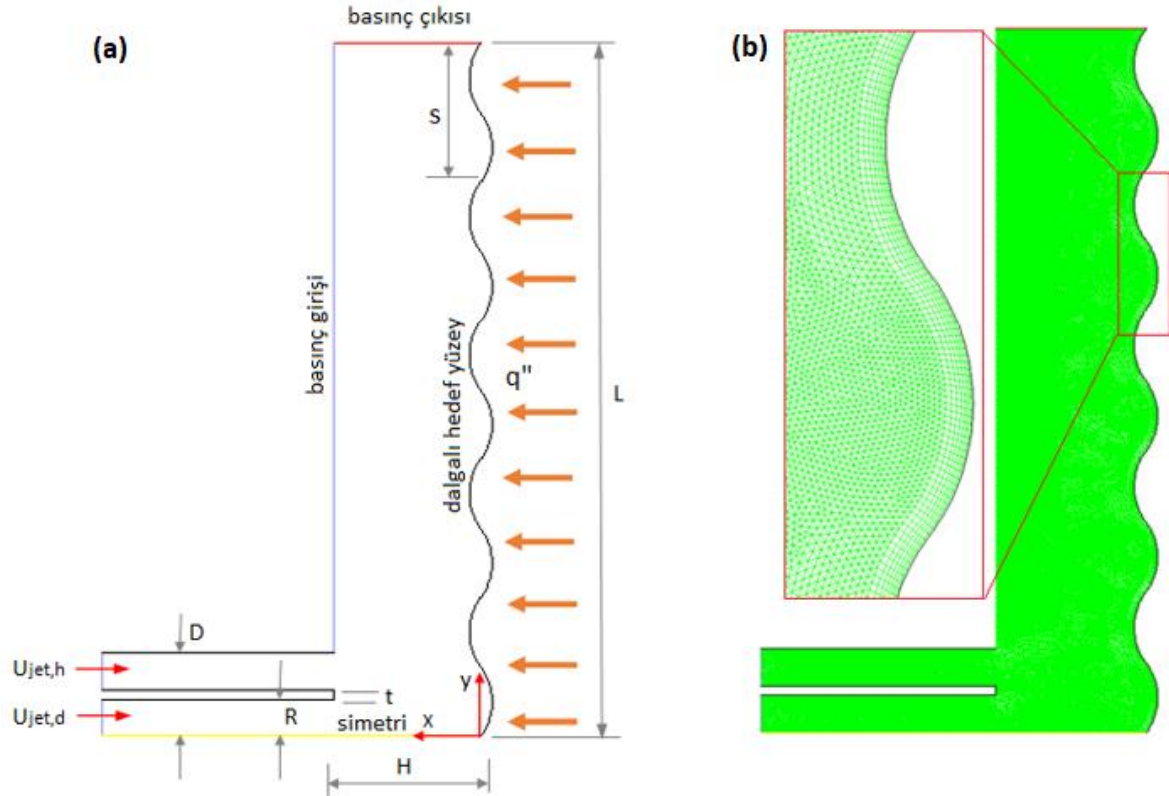
Son yıllarda, bazı araştırmacılar çarpan jet uygulamalarında hedef yüzeyin geometrisi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalarda, düz bir hedef yüzey yerine genellikle içbükey veya dışbükey eğrisel yüzey geometrilerinin soğutma performansı araştırılmıştır. Baghel ve ark. (2021) eğrisel yüzeylerde serbest çarpan su jetinin etkisini deneysel olarak incelemişler ve ısı transferinin, eğriliğin çapına ve Reynolds sayısına bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir. Dhruw ve ark. (2025) iki farklı eğrilik yarıçapı için iç bükey bir yüzeye çarpan dairesel jetin ısı transfer karakteristiğini $10000 \leq Re \leq 75000$ aralığındaki Reynolds sayılarında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yüzeyin eğriliğinin jet akışını kısıtladığını ve ısı transferini azalttığını bildirmişler ve Nusselt sayısı için yeni bir korelasyon önermişlerdir. Selimefendigil ve Oztop (2025) piezoelektrik enerji toplayıcısı kullanarak kısmen elastik bir hedef yüzey üzerinde türbülanslı çoklu çarpan jetin hem eğimli hem düz yüzeyler için soğutma davranışını sonlu eleman metodu ile araştırmışlardır. Çalışmalarında, jet Reynolds sayısının, jet-hedef yüzey arası mesafenin ve jetler arası mesafenin etkilerini dikkate almışlardır. Çalışmaların sonucunda, test edilen en yüksek Reynolds sayısında ($Re=30000$) ısı transferinin eğimli yüzey için 5,89 kat, düz yüzey için 4,3 kat iyileştiğini bildirmişlerdir ve ayrıca ortalama ısı transferi için bir korelasyon geliştirmişlerdir. Hashiehbafe ve ark. (2025) deneysel çalışmalarında yarı silindirik dışbükey bir yüzeye çarpan eksenel simetrik türbülanslı jetlerin soğutma performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında Reynolds sayısını ($Re=30000$) sabit tutarak yüzey eğriliğinin ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak jet-hedef yüzey mesafesinin nozul çapına oranı arttıkça dışbükey yüzeyin eğriliği tarafından jet akışının sürüklendiğini tespit etmişler ve jetin durgunluk noktasından olan mesafesi azaldıkça baskın girdap yapılarının eşit dağılım gösterdiğini bulmuşlardır.

Yukarıdaki literatür çalışmasından anlaşıldığı gibi bugüne kadar halkasal ve dairesel jetler üzerinde yapılan çalışmalarda, jet geometrisi, jet-hedef yüzey arasındaki mesafe, jet hızı gibi farklı parametreler kullanılarak ısı transferi davranışı araştırılmıştır. Araştırılan eğrisel hedef yüzeyin geometrisi ise içbükey ya da dışbükey geometriden oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda, halkasal ve dairesel jetlerin eş zamanlı olarak farklı Reynolds sayılarının kombinasyonunda sinüzoidal dalgalı bir yüzeydeki soğutma performansının incelenmediği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sabit bir jet-hedef yüzey mesafesi ($H/D=2$) için farklı jet Reynolds sayısı ($4000 \leq Re \leq 12000$) kombinasyonlarında halkasal ve dairesel jetin eş zamanlı olarak dalgalı bir yüzey üzerine çarpması sonucunda ısı transferi sayısal olarak araştırılmıştır.

Sayısal Çalışma

Sayısal Model

Sayısal modelin iki boyutlu geometrisi ve sınır şartları Şekil 1a’da gösterilmiştir. Dairesel jetin yarıçapı R 8mm’dir. Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h) ise dairesel jetin çapına eşittir. Hedef yüzey, sinüsoidal dalgalı bakır bir levhadır. Hedef yüzey üzerine 1200W/m^2 sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Jet ve hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe (H/D) 2 olarak sabit tutulmuştur. Sayısal modele ait diğer geometrik özellikler Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. a) Sayısal modelin 2d geometrisi ve sınır şartları, b) Çözüm alanının ağ yapısı

Tablo 1. Sayısal modele ait geometrik parametreler

Geometrik parametreler	Sayısal değeri
Dairesel jetin yarıçapı R	8mm
Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h)	16mm
Hedef yüzeyin dalga boyu (s)	30mm
Hedef yüzeyin dalga genliği	5mm
Hedef yüzeyin toplam uzunluğu ($2L$)	300mm
Dairesel jet ile halkasal jet arasında et kalınlığı (t)	2mm
Jet ve hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe (H/D)	2
Hedef yüzey üzerine uygulanan ısı akısı (q'')	1200W/m^2

Matematiksel Model

Çalışmada iş yapan akışkan havadır. İdeal gaz olarak kabul edilen hava, sıkıştırılmaz ve Newtoniyen özelliktedir. Jet akışı, türbülanslı akış rejiminde sürekli şartlarında akmaktadır. Akışkan özelliklerinin sıcaklık ve basınçla değişmediği kabul edilmiştir. Yerçekimi gibi gövde kuvvetler ve ışınlama ısı transferi dikkate alınmamıştır. Bu varsayımlar altında korunum denklemleri aşağıda verilmiştir (Eşitlik 1-3):

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

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

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

Burada u_i ve u_j sırasıyla x ve y yönündeki hız bileşenleridir. Sıcaklık T ve dinamik basınç p ile gösterilmiştir. Formüldeki $\overline{u'_i u'_j}$ ve $\overline{u'_i T'}$ ifadeleri zaman ortalamalı türbülans gerilmelerini ifade etmektedir. C_p , ρ ve k sırasıyla akışanın özgül ısısı, yoğunluğu ve ısıl iletkenliğini temsil etmektedir.

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

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

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

Burada

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

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

Çalışmada, halkasal jet Reynolds sayısı $Re_{dış}$ olarak, dairesel jet Reynolds sayısı $Re_{iç}$ olarak tanımlanmıştır. Halkasal jet Reynolds sayısı $4000 \leq Re_{dış} \leq 12000$ aralığında ve dairesel jet Reynolds sayısı $4000 \leq Re_{iç} \leq 12000$ aralığında değiştirilmiştir.

Halkasal jet Reynolds sayısı, $Re_{dış}$ Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır:

$$Re_{dış} = \frac{\rho U_{jet,h} D_h}{\mu} \quad (8)$$

Dairesel jet Reynolds sayısı, $Re_{iç}$ Eşitlik 9 ile hesaplanmıştır:

$$Re_{iç} = \frac{\rho U_{jet,d} D_h}{\mu} \quad (9)$$

Burada $U_{jet,h}$ halkasal jetin hızını, $U_{jet,d}$ dairesel jetin hızını, D_h hidrolik jet çapını, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ ise akışkanın viskozitesini göstermektedir.

Ortalama Nusselt sayısı Eşitlik 10 ile elde edilmiştir:

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (10)$$

Burada k ısı iletkenliği, h ise ısı taşınım katsayısını temsil etmektedir

Isı taşınım katsayısı h , Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır:

$$h = \frac{q''}{\Delta T} \quad (11)$$

Burada q'' dalgali hedef yüzeye uygulanan sabit ısı akısını ifade etmektedir.

$$\Delta T = (T_s - T_\infty) \quad (12)$$

Burada ΔT ise hedef yüzeyin sıcaklığı (T_s) ve ortam sıcaklığı (T_∞) arasındaki farkı göstermektedir.

Hedef yüzeyin soğutma performansını belirlemek için relatif Nusselt sayısı tanımlanmıştır. Dairesel jetin referans olarak alınması halinde relatif Nusselt sayısı ($Nu_{rel,d}$) Eşitlik 13 ile elde edilmiştir:

$$Nu_{rel,d} = \frac{Nu}{Nu_d} \quad (13)$$

Halkasal jetin referans olarak alınması halinde relatif Nusselt sayısı ($Nu_{rel,h}$) ise Eşitlik 14 ile hesaplanmıştır:

$$Nu_{rel,h} = \frac{Nu}{Nu_h} \quad (14)$$

Burada Nu_d ve Nu_h sırasıyla dairesel jet ve halkasal jet için elde edilen Nusselt sayılarını temsil etmektedir.

Sayısal Yöntem

Sayısal çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent programı yardımıyla çözülmüştür. Çözüm alanı Gambit yazılımı ile hücrelere bölünmüştür. Hedef yüzey üzerindeki sınır tabakayı yakalamak ve $y^+ < 1$ değerini sağlamak amacıyla dalgali hedef yüzey üzerine yapılandırılmış sınır tabaka ağ yapısı uygulanmış ve diğer çözüm alanında yapılandırılmamış üçgen elemanlar kullanılmıştır. Çözüm alanının ağ yapısı ve detayı Şekil

1b’de gösterilmiştir. Çalışmada, çözümlerin ağ yapısından etkilenmediği eleman sayısını tespit etmek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bu amaçla, dairesel jet için $Re=12000$ ’de farklı eleman sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmıştır. 79572 eleman sayısından sonra Nusselt sayısındaki değişimin çok küçük (%1) olması nedeniyle çözümlerde 79572 eleman sayısının yeterli olduğu düşünülmüştür. Ağ bağımsızlık testi için farklı eleman sayıları ile Nusselt sayısının değişimi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Ağ bağımsızlık testi (Dairesel jet, $Re=12000$).

Eleman sayısı	Nusselt sayısı	Fark, %
38724	202,82	-
51622	207,61	2,4
79572	209,58	1
121854	209,93	0,17

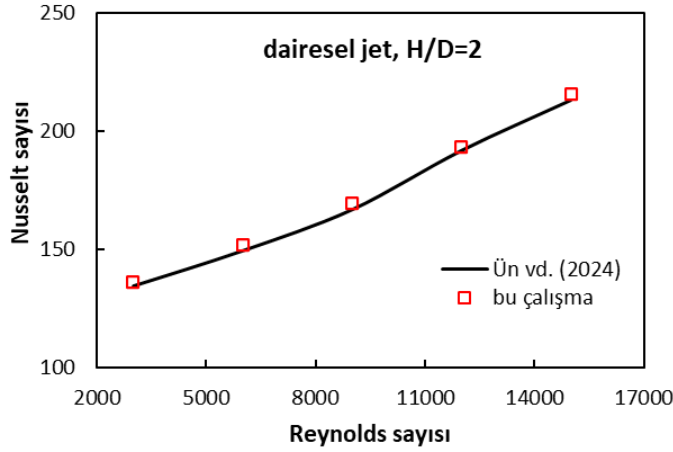
Sayısal çalışmada, taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılmıştır. Hız ile basınç arasındaki bağıntı için SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Viskoz model olarak RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modelinin halkasal çarpan jetlerde başarılı sonuçlar verdiği ve hızlı yakınsamaya neden olduğu bildirilmiştir (Afroz ve Sharif, 2018; Ün ve ark., 2024). Bu nedenle çözümlerde viskoz model olarak RNG k- ϵ türbülans modeli tercih edilmiştir. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitliğinde 10^{-7} , diğer eşitliklerde 10^{-5} kabul edilmiş ve çözümlerin bu değerlerde yakınsadığı görülmüştür.

Sınır Şartlar ve Çözümlerin Doğrulanması

Çözümlere başlamadan önce sayısal modele bazı sınır şartlar tariflenmiştir. Jet akışının olduğu lüle girişinde, halkasal jet ve dairesel jet için sırasıyla $U_{jet, h}$ ve $U_{jet, d}$ olmak üzere hız giriş sınır şartı tariflenmiştir. Akışkan lüleye $T_{\infty}=300K$ ortam sıcaklığında girmektedir. Dalgalı hedef yüzey üzerine $1200W/m^2$ üniform sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Hedef yüzeyin karşısındaki yüzeylere basınç girişi sınır şartı, duvar jet bölgesi çıkışındaki yüzeylere ise basınç çıkışı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer yüzeylere duvar sınır şartı girilmiştir. Tüm yüzeyler, kaymaz sınır şartlarına sahiptir. Çözüm zamanını düşürmek için dairesel jetin ekseni simetri sınır şartı olarak tariflenmiş ve çözüm alanının yarısı için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sayısal modele uygulanan sınır şartlar Şekil 1a’da gösterilmiştir.

Sayısal çözümlerin doğruluğunu belirlemek için elde edilen sonuçlar, önceki çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Doğrulama için Ün ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma

referans alınmış ve aynı hidrolik çapa sahip dairesel bir jetin düz bir hedef yüzey üzerinde elde edilen Nusselt sayıları ile bu çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki çalışma sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir.



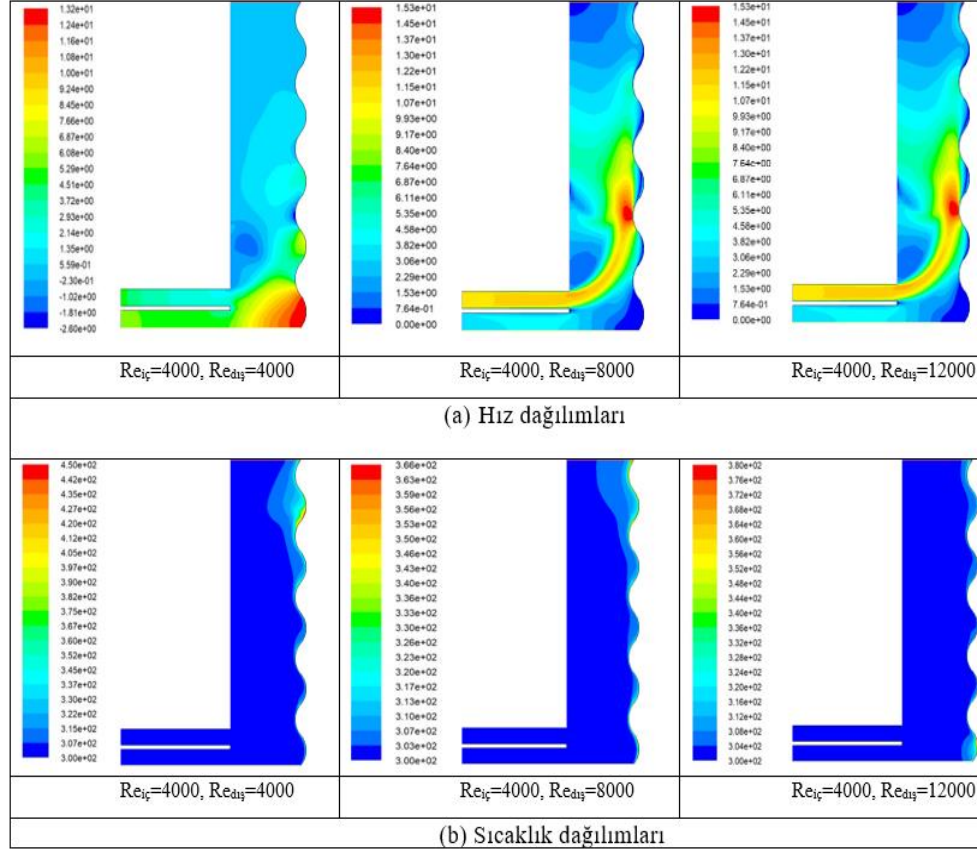
Şekil 2. Sayısal çözümlerin doğrulanması (Ün ve ark., 2024).

Tartışma ve Sonuçlar

Önceki çalışmalarda, jet-hedef yüzey arası boyutsuz mesafenin azalması ile ısı transferinin iyileştiği, özellikle bu mesafenin 2 olduğu durumda en iyi soğutma performansının sağlandığının bildirilmesi üzerine, bu çalışmada jet-hedef yüzey arası boyutsuz mesafe $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur (Terekhov ve ark. 2018; Ün ve ark. 2024). Halkasal ve dairesel jet Reynolds sayılarının $4000 \leq Re \leq 12000$ aralığındaki farklı kombinasyonlarında dalgalı hedef yüzey üzerine çarpması sonucunda, yüzeydeki soğutma performansı incelenmiştir. Jet Reynolds sayısının bu aralıkta seçilmesinin nedeni çözümlerin doğrulanmasında referans alınan çalışmaya (Ün ve ark. 2024) bağlı kalmak ve türbülanslı akış şartlarında ısı transferinin daha fazla iyileşmesidir. Farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında yüzey üzerindeki akış ve ısı transfer davranışını gözlemlemek amacıyla değişen $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ için hız ve sıcaklık kontur görüntüleri elde edilmiş ve tartışılmıştır.

Şekil 3’te $Re_{iç}=4000$ sabit dairesel jet Reynolds sayısı için farklı $Re_{dış}$ halkasal jet Reynolds sayısı kombinasyonlarının hız görüntüleri (a) ve sıcaklık görüntüleri (b) sunulmuştur. Şekil 3a’dan $Re_{dış}$ arttıkça jetin dalgalı yüzey üzerine daha iyi yayıldığı gözlenmiştir. Bu durum jetin levha yüzeyi boyunca etkili olmasına neden olmuştur. $Re_{iç}=4000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda dalgalı yüzeyin sıcaklık gradyanının levha sonuna doğru arttığı görülmektedir (Şekil 3b). Artan $Re_{dış}$ değerlerinde jetin tüm levha üzerinde etkili olmasından dolayı tüm yüzey boyunca sıcaklık gradyanı azalmıştır. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzeye çarpması yüzey üzerinde oluşan ısıl sınır tabakayı bozarak ısıl direncin

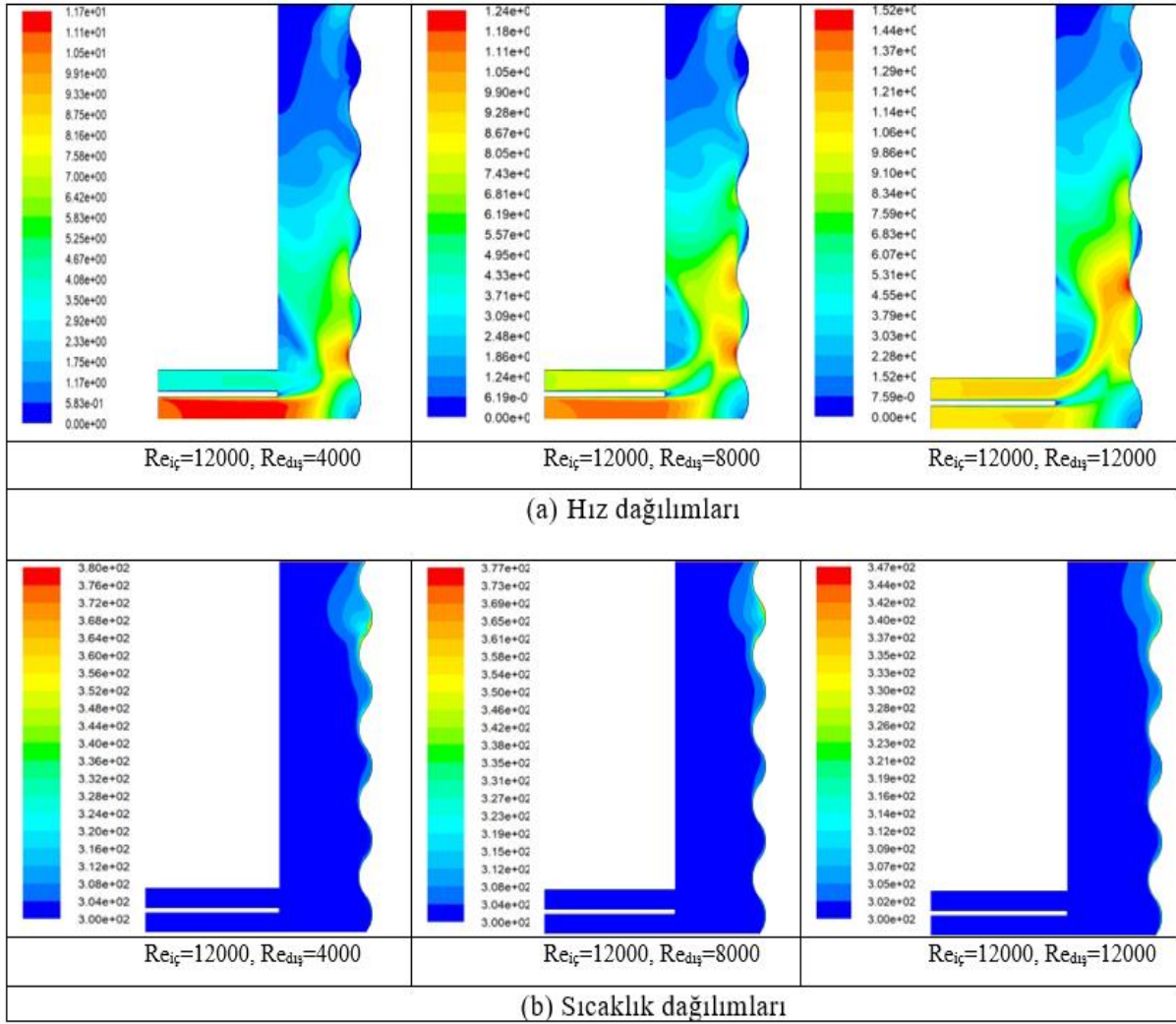
azalmasına neden olmaktadır. Bu durum yüzey üzerinde meydana gelen ısı transferini artıracaktır. $Re_{iç}=4000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda jetin hedef yüzeye çarptığı durgunluk noktasında sıcaklık artışı gözlenmiştir. Bunun nedeni dairesel jet Reynolds sayısının halkasal jet Reynolds sayısından oldukça düşük ($Re_{iç}=4000 \leq Re_{dış}=12000$) olmasıdır.



Şekil 3. Sabit dairesel jet Reynolds sayısında ($Re_{iç}=4000$) farklı $Re_{dış}$ için, a) hız dağılımları, b) sıcaklık dağılımları.

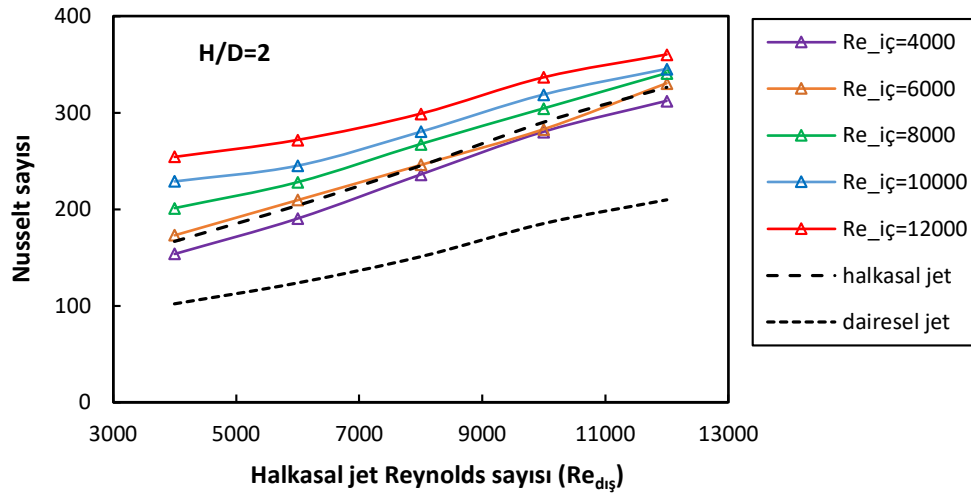
Şekil 4'te sabit dairesel jet Reynolds sayısı ($Re_{iç}=12000$) için farklı halkasal jet Reynolds sayısı ($Re_{dış}$) kombinasyonlarının hız dağılımları (a) ve sıcaklık dağılımları (b) verilmiştir. $Re_{iç}$ değerinin yüksek olması, levhanın durgunluk noktasında oluşan hız sınır tabakasının bozulmasına neden olmaktadır. Dairesel jetin bu bölgeye daha iyi nüfuz etmesinden dolayı jetin durgunluk noktasında daha etkili olduğu söylenebilir. Artan $Re_{dış}$ değerlerinde, jetin hedef yüzey üzerinde duvar jet bölgesinden daha ileri gittiği görülmektedir (Şekil 4a). Şekil 4b'de, $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda dalgalı yüzeyin sıcaklığının $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonundan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Hem dairesel jet hem de halkasal jet Reynolds sayısında artış yüzey sıcaklığını kayda değer şekilde düşürmektedir. Yüksek jet hızları, dairesel jetin hedef yüzey üzerindeki durgunluk noktasında, halkasal jetin ise duvar jet bölgesi boyunca etkili olmasına neden olur ve bu durum tüm yüzeyin soğutma performansını olumlu yönde etkileyecektir. Düşük halkasal jet hızlarında jetin, durgunluk

bölgesi etrafında daha etkili olduğu ve levhanın dış kısımlarına ulaşmadığı gözlenmiştir.



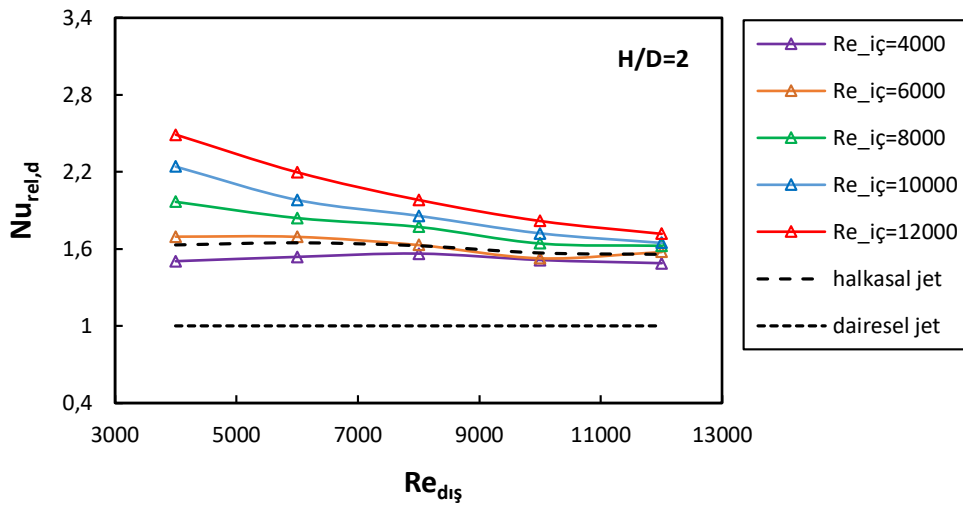
Şekil 4. Sabit dairesel jet Reynolds sayısında ($Re_{\text{ç}}=12000$) farklı $Re_{\text{dış}}$ için, a) hız dağılımları, b) sıcaklık dağılımları.

Şekil 5'te sabit jet-hedef yüzey mesafesi ($H/D=2$) için farklı $Re_{\text{ç}}$ ve $Re_{\text{dış}}$ kombinasyonlarında Nusselt sayısının değişimini göstermektedir. Ayrıca sonuçlar sadece dairesel ve sadece halkasal jet akışı ile karşılaştırılmıştır. $Re_{\text{ç}}$ ve $Re_{\text{dış}}$ değerlerinin her ikisinin de artması Nusselt sayısını artırmıştır. Tüm kombinasyonlarda elde edilen Nusselt sayıları dairesel jet akışında elde edilen Nusselt sayısından oldukça yüksek bulunmuştur. $Re_{\text{ç}}=4000$ ve $Re_{\text{ç}}=6000$ değerleri hariç diğer kombinasyonlarda elde edilen Nusselt sayılarının halkasal jet akışından yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca $Re_{\text{dış}}$ değerlerinin artması ile elde edilen Nusselt sayılarının birbirine yaklaştığı gözlenmiştir. En yüksek ısı transferi, $Re_{\text{ç}}=12000$ ve $Re_{\text{dış}}=12000$ kombinasyonunda $Nu=360,19$ olarak elde edilmiştir.



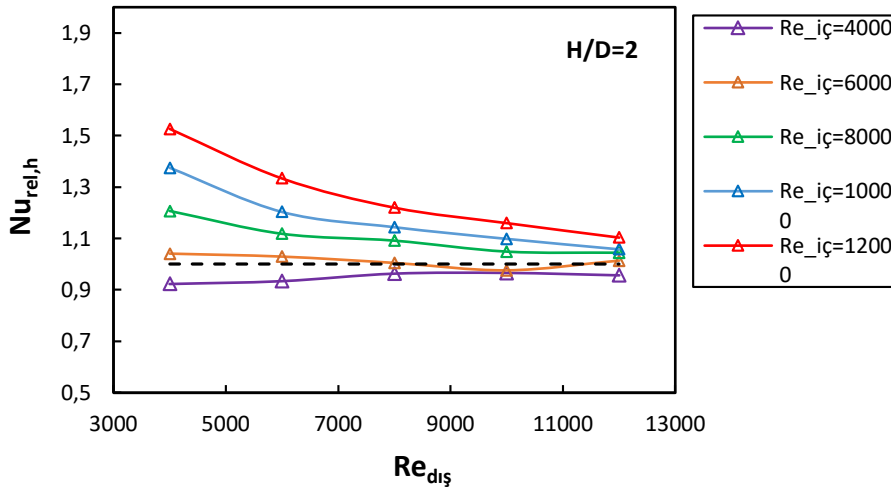
Şekil 5. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile Nusselt sayısının değişimi

Şekil 6'da $H/D=2$ jet-hedef yüzey mesafesinde, farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ kombinasyonlarında hedef yüzeyden ısı transferinin dairesel jete göre iyileşmesini ifade eden relatif Nusselt sayısının ($Nu_{rel,d}$) değişimini göstermektedir. Dairesel jet referans olarak alınmış ve değeri 1 olarak gösterilmiştir. Bütün jet akışlarında elde edilen $Nu_{rel,d}$ değerlerinin, referans değer (dairesel jet akışı) üzerinde olduğu tespit edilmiştir. $Re_{iç}$ değerleri arttıkça $Nu_{rel,d}$ değerleri de artmaktadır. Artan $Re_{dış}$ değerlerinde $Nu_{rel,d}$ değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni artan jet Reynolds sayısında dairesel jetin ısı transferinin de artmasından kaynaklanmaktadır. Dairesel jete göre en yüksek iyileşme oranı ($Nu_{rel,d}$), $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda 2,49 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile relatif Nusselt sayısının değişimi (dairesel jet referans alındığında).

Şekil 7, $H/D=2$ sabit değerinde farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ kombinasyonlarında ısı transferinin halkasal jete göre iyileşmesini ifade eden relatif Nusselt sayısının ($Nu_{rel,h}$) değişimini vermektedir. Halkasal jet referans olarak alınmıştır. Düşük dairesel jet Reynolds sayısı ($Re_{iç}=4000$) hariç, diğer jet kombinasyonlarında elde edilen $Nu_{rel,h}$ değerleri referans değer üzerinde. $Re_{iç}$ değerleri arttıkça $Nu_{rel,h}$ değerlerinin de arttığı görülmektedir. $Re_{dış}$ değerlerinin artması ile $Nu_{rel,h}$ değerleri azalma eğilimindedir. Artan jet Reynolds sayısında halkasal jetin Nusselt sayısının artması iyileşme oranını düşürmektedir. Halkasal jete göre en yüksek iyileşme oranı ($Nu_{rel,h}$), $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda 1,53 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile relatif Nusselt sayısının değişimi (halkasal jet referans alındığında).

Çalışma sonuçları, Ün ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 3). Aynı Reynolds sayısı kombinasyonunda, Ün ve ark. (2024) düz yüzeyde Nusselt sayısını $Nu=348,5$ elde ederken bu çalışmada sinüzoidal dalgalı yüzeyde Nusselt sayısı $Nu=360,19$ olarak bulunmuştur. Bu durum, dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı dalgalı bir hedef yüzeye çarpması, düz yüzeylere göre daha fazla ısı transferi artışına neden olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Çalışma sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

	$Re_{iç}$	$Re_{dış}$	Hedef yüzey geometrisi	H/D	Nu
Ün ve ark. (2024)	12000	12000	Düz yüzey	2	348,50
Bu çalışma	12000	12000	Sinüzoidal dalgalı yüzey	2	360,19

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, sadece halkasal ve sadece dairesel jet akışına göre sürekli eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetlerin farklı kombinasyonlarının dalgali yüzeyin soğutma performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu yöntem, hedef yüzeyin düz olmadığı ticari ve endüstriyel pek çok uygulamalarda (ısıtma, soğutma, kurutma prosesleri ve türbin kanadının soğutulması vb.) yüzeyden ısı transferinin iyileştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç

Bu sayısal çalışma, halkasal ve dairesel jetin farklı Reynolds sayısı kombinasyonlarında, sabit ısı akışına sahip dalgali bir yüzeye çarpması sonucu, hedef yüzeyden olan ısı transferini incelemiştir. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı sinüzoidal dalgali bir yüzeye farklı hız kombinasyonlarında çarpması ile hedef yüzeyin soğutulması bu çalışmanın özgünlüğüdür. Analizlerde, jet-hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca çalışma sadece halkasal ve sadece dairesel çarpan jet akışı ile karşılaştırılmıştır. Farklı jet Reynolds sayılarının kombinasyonlarında hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Çalışmanın önemli bulguları aşağıda özetlenmiştir:

- Halkasal çarpan jet akışında, dairesel çarpan jete göre daha yüksek Nusselt sayısı elde edilmiştir. Halkasal ve dairesel jetin farklı Reynolds sayılarının kombinasyonunda eş zamanlı dalgali hedef yüzeye çarpması, sadece dairesel ve sadece halkasal jet çarpmasına göre daha yüksek ısı transferi sağlamıştır.
- Halkasal jet ve dairesel jetin eş zamanlı ve sürekli olarak dalgali yüzeye çarpması tüm levha boyunca ısı transferinin iyileşmesine neden olmuştur.
- Dairesel jet, çarpma bölgesinde, halkasal ise jet duvar jet bölgesinde etkili olurken, halkasal ve dairesel jetin eş zamanlı olarak hedef yüzeye çarpması tüm levha yüzeyinde etkili olduğu görülmüştür.
- Dairesel jet ve halkasal jetin özellikle yüksek Reynolds sayılarında kombinasyonu dalgali hedef yüzeyin soğutma performansını önemli derecede artırmıştır.
- En yüksek Nusselt sayısı, $Re_{iç} = 12000$ ve $Re_{dış} = 12000$ kombinasyonunda $Nu = 360,19$ olarak elde edilmiştir.
- $Re_{iç} = 12000$ ve $Re_{dış} = 4000$ kombinasyonunda dalgali hedef yüzey üzerindeki ısı transferi dairesel jete göre 2,49 kat iyileşmiştir.
- $Re_{iç} = 12000$ ve $Re_{dış} = 4000$ kombinasyonunda, halkasal jete göre hedef yüzeyin ısı transferinin 1,53 kat arttığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209A 2023 yılı 2. dönem kapsamında 1919B012318148 numaralı başvuru ile destek almaya hak kazanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Selma Akçay: Metodoloji, veri analizi, kavramsallaştırma, yazma, danışmanlık; Metehan Avcı: Sayısal çözümler, görüntüleme; Hüseyin Can Tanrısevsin: Sayısal çözümler, görüntüleme konularında katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Afroz F, Sharif MAR., 2018. Numerical study of turbulent annular impinging jet flow and heat transfer from a flat surface. *Applied Thermal Engineering*, 138: 154-172.

Akdağ Ü, Akçay S, Karabayır ML., 2023. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a pulsating impinging jet on a flat surface. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2): 889-899.

Akdağ U, Akçay S, Kilic M, Gungor B., 2024b. 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*, 159: 108103

Akdağ U, Akçay S, Un N, Danismaz M., 2024a. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a synthetic annular jet impingement on a flat surface. *Experimental Heat Transfer*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/08916152.2024.2356165>

Alnak DE, Karabulut K., 2019. Hava jeti çarpmalı kurutma için farklı dairesel nemli nesne geometrilerinin ısı ve kütle transferi üzerindeki etkisinin araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1): 51-62.

Baghel K, Sridharan A, Murallidharan JS., 2021. Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164: 120487.

Çelik N., 2006. Optimum lüle şeklinin çarpan jet üzerinde etkilerinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 267s, Elâzığ.

Celik N, Turgut E., 2012. Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method. *Heat Mass Transfer*, 48: 1407–1413.

Chitsazan A, Klepp G, Glasmacher B., 2021. Review of jet impingement heat and mass transfer for industrial application, *Heat Transfer Research*, 52(9): 61-91.

Dhruw L, Ansari S, Kothadia HB, Jangir A, Gupta G., 2025. Jet Impingement on circular curved surfaces: local heat transfer analysis and correlation development, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Published Online: 3 Jan 2025 <https://doi.org/10.2514/1.T7078>

Dutta P, Chattopadhyay H., 2021. Numerical analysis of transport phenomena under turbulent annular impinging jet. *Computational Thermal Sciences*, 13(2): 1-19.

Ekkad SV, Singh P., 2021. A modern review on jet impingement heat transfer methods. *The American Society of Mechanical Engineers Journal of Heat and Mass Transfer*, 143(6): 064001.

Fenot M, Dorignac E, Lantier R., 2021. Heat transfer and flow structure of a hot annular impinging jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 170: 107091.

Frosella T, Frippa M, Gutmarkb E., 2018. Dynamics of the impingement region of a circular turbulent jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91: 399-409.

Hashiehbaf A, Romano G, Agrawal A., 2025. Experimental investigation on axisymmetric turbulent jets impinging on a convex surface using particle image velocimetry. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, doi: 10.1615/JFlowVisImageProc.2024054727

Kalifa RB, Habli S, Said NM, Bournot H, Palec GL., 2016. Parametric analysis of a round jet impingement on a heated plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57: 11–23.

Kalinina SV, Terekhov VI, Sharov KA., 2015. Special features of flow in an annular jet impinging on a barrier. *Fluid Dynamics*, 50(5): 665–671.

Kılıç M, Başkaya Ş., 2017. Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akımlı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3): 693-707.

Lee J, Lee SJ., 2000. The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 555-575.

Markal B, Aydın O., 2018. Experimental investigation of coaxial impinging air jets. *Applied Thermal Engineering*, 141: 1120-1130.

Markal B., 2018. Experimental investigation of heat transfer characteristics and wall pressure distribution of swirling coaxial confined impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124: 517-532.

Philippov MV, Chokhar IA, Terekhov VV, Terekhov VI, Baranov IN., 2021. Experimental investigation of heat and mass transfer of an annular impinging jet. *Journal of Physics*, 2039: 012028.

Selimefendigil F, Oztop HF., 2025. 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*, 11(8): e43052.

Terekhov VI, Kalinina SV, Sharov KA., 2018. Convective heat transfer at annular jet impingement on a flat blockage. *High Temperature*, 56: 217-222.

Ün N, Akçay S, Akdağ U., 2024. Düz yüzeye çarpan eş eksenli halkasal ve dairesel jetin ısı transfer karakteristiklerinin sayısal analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 40(1): 56-67.

Yasaswy NS, Saroj S, Hindasageri V, Prabhu SV., 2014. Local heat transfer distribution of an impinging air jet through a crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 79: 250-259.

Zhong Y, Zhou C, Shi Y., 2022. Effect of the nozzle geometry on flow field and heat transfer in annular jet impingement. *Energies*, 15: 4271.