

## Düz bir Yüzeve Sürekli ve Eşzamanlı Olarak Çarpan Halkasal ve Dairesel Jetin Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Analizi

Necati Ün<sup>1</sup> , Selma Akçay<sup>\*2</sup> , Ünal Akdağ<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, AKSARAY

<sup>\*2</sup> Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, ÇANKIRI,

<sup>3</sup>Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, AKSARAY

(Alınış / Received: 08.12.2023, Kabul / Accepted: 04.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

### Anahtar Kelimeler

Halkasal Jet,  
Dairesel Jet,  
Jet Çarpması,  
Düz Hedef Yüzeve,  
Isı Transferi İyileştirme

**Öz:** Bu çalışmada, izotermal olarak ısıtılmış düz bir yüzeve üzerine sürekli ve eşzamanlı olarak çarpan halkasal ve dairesel jetin ısı transfer karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, ANSYS Fluent yazılımı ile RNG k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, hedef yüzeve ile jet çıkışı arasındaki iki farklı çarpma mesafesinde (H/D: 2 ve 4) gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, dairesel ve halkasal jetin Reynolds sayıları için  $3000 \leq Re \leq 15000$  aralığındaki farklı kombinasyonları uygulanmıştır. Prandtl sayısı (Pr) ve diğer geometrik parametreler sabit tutulmuştur. Halkasal jet ve dairesel jetin eşzamanlı olarak farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında hedef yüzeve üzerine çarpması sonucu yüzevedeki Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Farklı jet hızları ve H/D mesafeleri için çözüm alanında elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Sayısal sonuçlar, dairesel ve eşzamanlı jetin yüzeve üzerine sürekli ve eş zamanlı uygulanmasının sadece dairesel ve sadece halkasal jet çarpmasına göre ısı transferi iyileştirmede önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Jet-hedef yüzeve arasındaki mesafenin azalması, ısı transferinin artmasına neden olmuştur. En iyi ısı transferi H/D=2 mesafesinde  $Re_{dış}=15000$  ve  $Re_{iç}=15000$  kombinasyonunda  $Nu=374,85$  olarak elde edilmiştir.

## Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristics of Continuously and Simultaneously Annular and Circular Jet Impinging on a Flat Surface

### Keywords

Annular Jet,  
Circular Jet,  
Jet Impingement,  
Flat Target Surface,  
Heat Transfer Enhancement

**Abstract:** In this study, the heat transfer characteristics of annular and annular jets continuously and simultaneously impinging on an isothermally heated flat surface were numerically investigated. The study was carried out using the RNG k-ε turbulence model with ANSYS Fluent software. Examinations were conducted at two different impact distances (H/D: 2 and 4) between the target surface and the jet exit. In the simulations, different combinations were applied for the Reynolds numbers of the circular and annular jet in the range of  $3000 \leq Re \leq 15000$ . Prandtl number (Pr) and other geometric parameters were kept constant. Nusselt numbers on the surface were calculated as a result of the annular jet and the circular jet impinging the target surface simultaneously at different combinations of Reynolds numbers. The velocity and temperature distributions obtained in the solution domain for different jet velocities and H/D distances were presented. The numerical results showed that the continuous and simultaneous application of circular and annular jet on the surface has a significant effect on heat transfer improvement compared to only circular and only annular jet impingement. The decrease in the distance between the jet and the target surface caused an increase in heat transfer. The best heat transfer was obtained as  $Nu=374.85$  in the combination of  $Re_{iç} = 15000$  and  $Re_{dış} = 15000$  at H/D = 2 distance.

\*İlgili Yazar, email: selmaakcay@karatekin.edu.tr

## 1. Giriş

Endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma gibi mühendislik uygulamalarında ısı transferini artırmak amacıyla farklı yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemlerden çarpan jet uygulamaları, ısı transfer kapasitesini artırmada yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Çarpan jetler, gaz türbini kanatlarının ve elektronik devre elemanlarının soğutulması, tekstil, kâğıt, cam, gıda ve kimya endüstrileri, metallerin tavllanması gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle, çarpan jetler, son yıllarda deneysel ve sayısal araştırmaların ilgi odağı olmuştur [3, 4]. Çarpan jet akışı, bir lüle veya kanaldan geçirilen yüksek hızlı bir akışkanın hedef yüzey üzerine püskürtülmesi ile elde edilen akış biçimi olarak tanımlanır [5]. Çarpan jetin çalışma prensibi hedef yüzey üzerinde oluşan termal sınır tabakayı dağıtarak veya incelterek ısı transferini artırma esasına dayanmaktadır. Çarpan jette, akışkan ile hedef yüzey arasında yüksek yerel ısı transfer katsayısı elde edilmesi sonucu, çarpma yüzeyinde ısı ve kütle aktarımı sağlanır. Ayrıca yüksek ısı transferi elde edilirken daha düşük akışkan miktarları kullanılması nedeniyle enerji tasarrufuna önemli katkı sağlamaktadır [5]. Çarpan jetlerin akış ve ısı transferi özellikleri, jet çıkış geometrisi, jet hızı, jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe, jetin laminar ya da türbülanslı olması, hedef yüzey geometrisi, jet ile hedef yüzey arasındaki sıcaklık farkı, akışkan tipi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir [5].

Literatürde sürekli çarpan jet akışları ile ilgili pek çok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir [1, 6, 7]. Bu çalışmalardan bazıları jet geometrisine odaklanmıştır. Lee ve Lee [8] farklı en boy oranlarına sahip elips şeklindeki çarpan jetin hedef yüzey üzerindeki ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Lüle ile plaka mesafesinin  $L/D > 6$  olduğu durum dikkate alındığında, eliptik çarpan jetin dairesel çarpan jete göre daha az ısı transferi sağladığını belirterek eliptik jetlerin ısı transferi uygulamalarında kontrol mekanizması olarak kullanılabilirliklerini bildirmişlerdir. Yasaswy vd. [9] kare kesitli jet geometrisi kullanarak farklı Reynolds sayıları ( $6000 \leq Re \leq 12000$ ) ve farklı nozul-hedef yüzey mesafeleri için ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Kılıç ve Başkaya [10] farklı geometride (kare, üçgen ve silindir) akış yönlendiricileri kullanarak farklı Reynolds sayıları ( $8000 \leq Re \leq 43000$ ) ve  $H/D_h$  parametreleri için çarpan jetin ısı transferini araştırmışlar ve üçgen akış yönlendiricinin, diğer akış yönlendiricilere göre daha yüksek ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Alnak ve Karabulut [11] farklı geometriye sahip nozul kullanarak gıdaların saklama koşullarının iyileştirilmesi üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Laminar hava akışıyla birlikte çarpma bölgesindeki nesneye ısı transferi sağlanarak depolama durumlarında minimum nemlilik oranı elde edilebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca en fazla jet kurutmanın durma noktası bölgesinde olduğunu rapor etmişlerdir. Golda vd. [12] deneysel çalışmalarında dairesel ve silindirik geometriye sahip lüleler kullanarak çarpan jet üzerine araştırma yapmışlardır. Zhong vd. [13] farklı nozul modelleri kullanarak halkasal çarpan jetin ısı transfer karakteristiklerini  $5000 \leq Re \leq 40000$  aralığındaki Reynolds sayıları ve farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler ( $H/D$ : 0.5, 2, ve 4) için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nozul geometrisinin ısı transferini etkilediğini bildirerek Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasında bir korelasyon önermişlerdir.

Bazı araştırmacılar halkasal çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [14, 15]. Philippov vd. [15]  $Re=5500$  için türbülanslı halkasal çarpan jetin farklı lüle-hedef yüzey mesafelerinde soğutma etkisini araştırmışlardır. Halkasal jetin iç çapı 3 mm ve dış çapı 22 mm, halkasal lüle ile çarpma yüzeyi arası mesafesi için 0.5, 1, 1.5 değerlerini dikkate alarak halkasal çarpan jetin aerodinamik hareketlerini incelemişlerdir. Çelik [16] ısı transferi açısından en uygun lüle tipini belirlemek için farklı Reynolds sayıları ve jet ile plaka arası mesafeler ( $H/D$ ) için türbülanslı çarpan jet akışını incelemiştir. Çalışma sonucunda, eş eksenli halkasal lüle kullanımının düz dairesel lüleye göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Kalina vd. [17] halkasal çarpan jet ile ilgili deneysel bir çalışmada, çarpma yüzeyine yakın mesafedeki ısı transferi özelliklerine yoğunlaşmışlardır. Halkasal çarpan jetin kullanılması durumunda dairesel çarpan jete göre daha fazla ısı transferi sağladığını belirtmişlerdir. Markal [18] farklı Reynolds sayılarında ( $Re$ : 6688, 9364 ve 12039), lüle-plaka arası uzaklığın 0.8 mm olduğu eş eksenli halkasal ve dairesel çarpan jetin ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Başka bir çalışmada, Aydın ve Markal [19] eş eksenli ikili halkasal jet akışının hedef yüzeye çarpması sonucu meydana gelen ısı transferini farklı lüle ile plaka mesafeleri ( $H/D$ : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5) için incelemişlerdir. Yüzey ile lüle arası mesafe arttıkça Nusselt sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ikili halkasal jet kullanımının ısı transferi yoğunluğu ve homojenliği açısından tek halkasal çarpan jetten daha avantajlı olduğunu bildirmişlerdir. Terekhov vd. [20] jet Reynolds sayıları ( $12000 \leq Re \leq 36000$ ), lüle-çarpma yüzeyi mesafeleri ( $H/D$ : 2, 4 ve 6) ile iç ve dış lüle çapları değiştirilerek halkasal çarpan jet akışını deneysel olarak incelemişlerdir. En yüksek ısı transferinin  $H/D=2$ 'de elde edildiğini belirterek yüzey üzerindeki ısı transferinin %70'e yakın iyileştirdiğini göstermişlerdir. Afroz ve Sharif [21] izotermal olarak ısıtılmış düz bir yüzey üzerine dış çapı 30 mm olan halkasal çarpan jet akışının farklı Reynolds sayılarında ( $5000 \leq Re \leq 35000$ ) ve farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler için ( $0.3 \leq H/D \leq 4$ ) ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Tüm Reynolds sayılarında  $H/D$  mesafesinin azalması ile Nusselt sayısının arttığını ve maksimum ısı transferinin  $H/D=0,4$  olduğu durumda meydana geldiğini bildirmişlerdir. İbrahimov [22] eş eksenli iki farklı

halkasal lüle kullanarak farklı Reynolds sayıları ve farklı mesafelerde ( $H/D=0.5, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ) çarpan jetlerin ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının da arttığını ve hedef yüzey üzerinde en iyi ısı transferinin  $H/D=1$  durumda sağlandığını belirtmişlerdir. Eş eksenli ikili halkasal jetin kullanılması, tekli halkasal jete göre daha iyi ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Dutta ve Chattopadhyay [23] jet-hedef yüzey mesafesinin  $H/D=2$  olduğu durumda, halkasal jet akışında  $10000 \leq Re \leq 50000$  aralığındaki Reynolds sayılarında ısı transferini araştırmışlar ve Reynolds sayısının artmasıyla çarpma bölgesinde Nusselt sayısının da arttığını bildirmişlerdir. Fenot vd. [24] çarpan halkasal jetlerin ısı transferi karakteristiklerini  $D_{iç}/D_{dış}$  oranına göre incelemişler ve iç çapın dış çapa oranının artması ile yüzey üzerindeki ısı transferinin arttığını tespit etmişlerdir. Kılıç vd. [25] dönen jetler kullanarak endüstriyel bir silindirin soğutulmasını, farklı Reynolds sayıları ( $1000 \leq Re \leq 1700$ ), farklı ısı akıları ( $5000-12500 \text{ W/m}^2$ ) ve akışkanın farklı giriş sıcaklıkları ( $5-25^\circ\text{C}$ ) için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda,  $Re=1700$ 'de silindirin iç ve dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının  $Re=1000$  değerine göre %45,4 azaldığını, ısı akısının  $12500 \text{ W/m}^2$  olması halinde sıcaklık farkının  $5000 \text{ W/m}^2$  değerine göre %149,4 oranında arttığını ve akışkanın giriş sıcaklığındaki artışın yüzey sıcaklığını da artırdığını bildirmişlerdir.

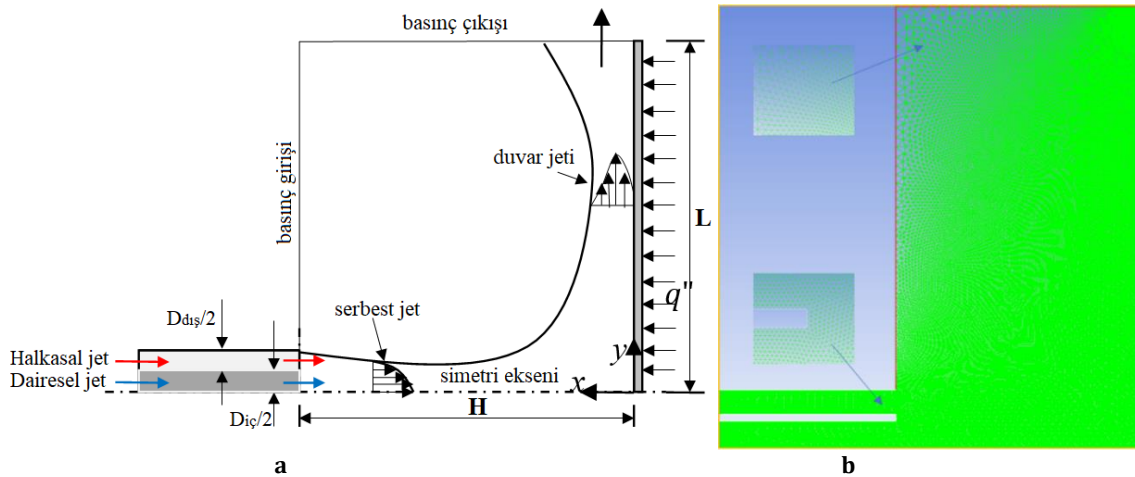
Literatür araştırmasına göre, sayısal ve deneysel araştırmalarla sürekli çarpan jetlerin ısı transferini artırdığı kanıtlanmıştır. Önceki çalışmalardan bazıları ısı transferi üzerinde jet geometrisinin etkilerini incelemişler, bazıları ise halkasal jetler üzerine odaklanmıştır. Bugüne kadar sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan dairesel ve halkasal jetlerin farklı Reynolds sayıları kombinasyonlarında hedef yüzey üzerindeki ısı transferinin araştırılmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışma düz bir hedef yüzey üzerindeki ısı transferini iyileştirmek amacıyla iç içe geçmiş eş eksenli halkasal ve dairesel jetin sürekli ve eş zamanlı olarak hedef yüzey üzerine çarpması sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, iki farklı jet-hedef yüzey mesafelerinin ( $H/D: 2$  ve  $4$ ) ve halkasal ve dairesel jet için farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarının yüzey soğutmadaki etkinliği araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Sayısal model

Çalışmada kullanılan sayısal modelin  $H/D=2$  için iki boyutlu şematiği ve ağ yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Jet çıkış geometrisi olarak iç içe geçmiş eş eksenli halkasal ve dairesel geometriden oluşan lüle tasarımı kullanılmıştır. Kullanılan dairesel lülenin çapı ( $D_{iç}$ ) 19 mm, halkasal lülenin dış çapı ( $D_{dış}$ ) 41 mm olup dairesel ve halkasal lüle arasında  $t=2$  mm et kalınlığı mevcuttur. Lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki mesafe ( $H/D$ ) için 2 ve 4 olarak iki farklı değer alınmıştır. Hedef yüzey, uzunluğu ( $2L$ ) 300 mm olan düz bir levhadır.

Sayısal çalışma, türbülanslı akış koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sürekli dairesel ve halkasal çarpan jetin eş zamanlı farklı Reynolds sayılarındaki kombinasyonlarının hedef yüzey soğutmadaki etkilerini gözlemleyebilmek için analizler  $3000 \leq Re \leq 15000$  aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. a) Sayısal modelin 2d şematiği, b)  $H/D=2$  için çözüm alanının ağ yapısı

### 2.2. Korunum denklemleri

Sayısal çalışmada, jet akışkanı havadır. Akışkanın ideal gaz olduğu, fiziksel özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir. Jet akışı, sürekli şartlarda türbülanslı rejim altında hedef yüzeye çarpmaktadır. Hedef yüzeyle çevre arasında ısı ışınım ihmal edilmiştir. Yerçekimi gibi gövde kuvvetlerinin etkisi hesaplamaya dahil edilmemiştir. Viskoz yayılım etkisi ihmal edilerek korunum denklemleri Eşitlik 1-3'te verilmiştir.

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

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

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

Burada  $u, v$  sırasıyla  $x, y$  yönündeki hız bileşenlerini göstermektedir. Sıcaklık  $T$  ve dinamik basınç  $p$  ile gösterilmiştir. Matematiksel formülde  $u', T'$  vb. terimler türbülans gerilmelerini,  $\rho$  yoğunluk,  $c_p$  özgül ısı ve  $k$  ise ısı iletim katsayısını göstermektedir.

Literatürde çarpan jet akışları için RNG  $k-\varepsilon$  türbülans modeli sıklıkla kullanılmıştır. Türbülanslı halkasal çarpan jet akışlarında bu modelin başarılı ve hızlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir [21, 26]. Bu nedenle, sayısal çalışmada viskoz model olarak RNG  $k-\varepsilon$  türbülans modeli seçilmiştir.

### 2.3 Akış ve ısı transfer hesaplamaları

Bu çalışmada, jet Reynolds sayısı, akışın karakteristiğini belirleyen önemli bir parametredir. Çalışmada dairesel ve halkasal jet için farklı Reynolds sayısı tanımlanmıştır.  $Re_{iç}$  dairesel jete ait Reynolds sayısını (Eşitlik 4),  $Re_{dış}$  halkasal jete ait Reynolds sayısını (Eşitlik 5) temsil etmektedir.

$$Re_{iç} = \frac{(U_{j,d})(D_{h,dairesel})}{\nu} \quad (4)$$

$$Re_{dış} = \frac{(U_{j,h})(D_{h,halkasal})}{\nu} \quad (5)$$

Burada  $D_{h,dairesel}$  ve  $D_{h,halkasal}$  sırasıyla dairesel ve halkasal jetin hidrolik çaplarını göstermektedir.  $U_{j,d}$  ve  $U_{j,h}$  ise sırasıyla dairesel ve halkasal jet çıkış hızlarıdır,  $\nu$  kinematik viskoziteyi gösterir.

Jet akışında, hedef yüzeyde elde edilen ısı transferi, ortalama Nusselt sayısı ( $Nu_{ort}$ ) ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 6).

$$Nu_{ort} = \frac{hL}{k} \quad (6)$$

Burada  $L$  hedef yüzeyin karakteristik uzunluğunun,  $k$  akışkanın ısı iletim katsayısını ve  $h$  ise ısı taşınım katsayısını göstermektedir.

Isı taşınım katsayısı ( $h$ ) Eşitlik (7) ile elde edilmektedir.

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_\infty)} \quad (7)$$

Burada  $q''$  hedef yüzeye uygulanan ısı akısını,  $T_s$  ve  $T_\infty$  ise sırasıyla hedef yüzeyin sıcaklığını ve ortam sıcaklığı göstermektedir.

Jet-hedef yüzey arasındaki mesafe  $H$  olmak üzere boyutsuz mesafe ( $B$ ) Eşitlik 8 ile tanımlanmıştır.

$$B = \frac{H}{D} \quad (8)$$

### 2.4 Sayısal yöntem ve sınır şartları

Bu çalışmada, sayısal çözüm alanının oluşturulması ve hücelere bölünmesi GAMBİT yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Homojen dağılım elde etmek için üçgen ağ yapısı kullanılmış olup çözüm alanına ait ağ yapısı Şekil 1b'de gösterilmiştir. Yapılandırılmamış üçgen ağ yapısı, sınır tabakada daha sık olmak üzere, uzaklaşan bölgelerde sıklığı azalacak şekilde oluşturulmuştur (Şekil 1b). Lüle girişinde ve sınır tabakada, çok daha ince ağ yapısı kullanılmıştır. Çalışmada, çözümlerin hücre sayısından etkilenmediği ağ yapısını belirlemek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bunun için  $Re_{iç}=15000$  ve  $H/D=2$  parametrelerinde dairesel jet kullanılarak farklı eleman sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. 77.315 eleman sayısından

sonra Nusselt sayısının değişiminin oldukça düşük (%2) olmasından dolayı çözüm alanına 77.315 eleman sayıları uyarlanmıştır.

**Tablo. 1** Eleman sayıları ile Nusselt sayılarının değişimi ( $Re=15000$ ,  $H/D=2$ , dairesel jet)

Eleman sayısı	Nusselt sayısı	Değişim
12.426	201,846	-
49.300	212,521	0,050
77.315	212,932	0,020
118.630	218,123	0,005

Sayısal analizler, sonlu hacim metoduna göre çözüm yapan FLUENT (16.0) yazılımı ile çözülmüştür. Çözümlerde, ayrık çözüm algoritması kullanılmıştır. Basınç ve momentum denklemleri ikinci dereceden ileri fark şeması ile ayrıştırılmıştır. Hız ve basınç arasındaki bağıntı için SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması kullanılmıştır. Eşitliklerin çözümünde, ardışık iki iterasyon arasında bağıl hatanın azalmasıyla birlikte çözümler yakınsamaktadır. Bu çalışmada yakınsama kriteri olarak enerji denklemi için  $10^{-9}$  momentum ve kütle korunum denklemleri için ise  $10^{-6}$  değeri dikkate alınmıştır.

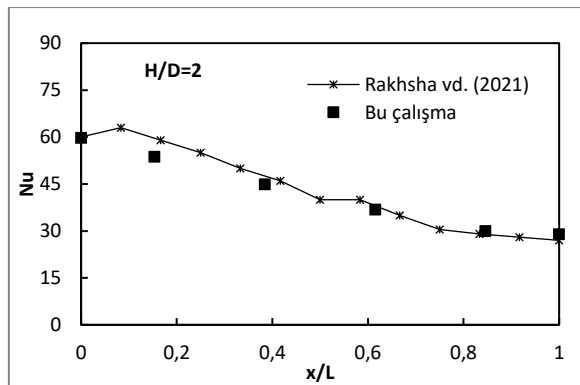
Çözüm alanına uygulanan sınır şartlar Şekil 1a'da ve Tablo 2'de verilmiştir. Dairesel ve halkasal jet girişinde "hız girişi" sınır şartı tariflenmiştir. Dairesel ve halkasal jet için farklı Reynolds sayılarının kombinasyonları uygulanmıştır.  $Re_{iç}$  dairesel jet hızını ve  $Re_{dış}$  halkasal jet hızını temsil eden Reynolds sayılarını ifade etmektedir. İki boyutlu çalışmada, akışın aksel simetrik olması nedeniyle, eşitlikler aksel simetrik şartlarında çözülmüştür. Düz hedef yüzey üzerine "sabit ısı akısı" uygulanmıştır. Tüm hesaplamalarda, hedef yüzey  $q'' = 1200$  W/m<sup>2</sup> sabit ısı akısında korunmuştur. Jet çıkışındaki serbest yüzey, "basınç girişi" sınır şartı ile tanımlanmıştır. Duvar jet bölgesi çıkışı için "basınç çıkışı" sınır şartı uygulanmıştır.

**Tablo. 2** Sayısal modele uygulanan başlangıç ve sınır şartlar

Geometrik sınırlar	Sınır şartın tanımı
Dairesel jet girişi	Hız giriş sınır şartı ( $U=U_{j,d}$ ve $T=T_{\infty}$ )
Halkasal jet girişi	Hız giriş sınır şartı ( $U=U_{j,h}$ , $T=T_{\infty}$ )
Hedef yüzey	Sabit ısı akısı ( $q''=1200$ W/m <sup>2</sup> )
Jet çıkışındaki serbest yüzey	Basınç girişi sınır şartı
Duvar jet bölgesi çıkışı	Basınç çıkışı sınır şartı
Jet-hedef yüzey sınırı	Eksenel simetrik sınır şartı

### 3. Tartışma ve Sonuçlar

Sayısal çözümlerin doğrulanması için bu çalışma, Rakhsha vd. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve  $x/L$  boyunca Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Şekil 2'de her iki çalışmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilerek sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir.



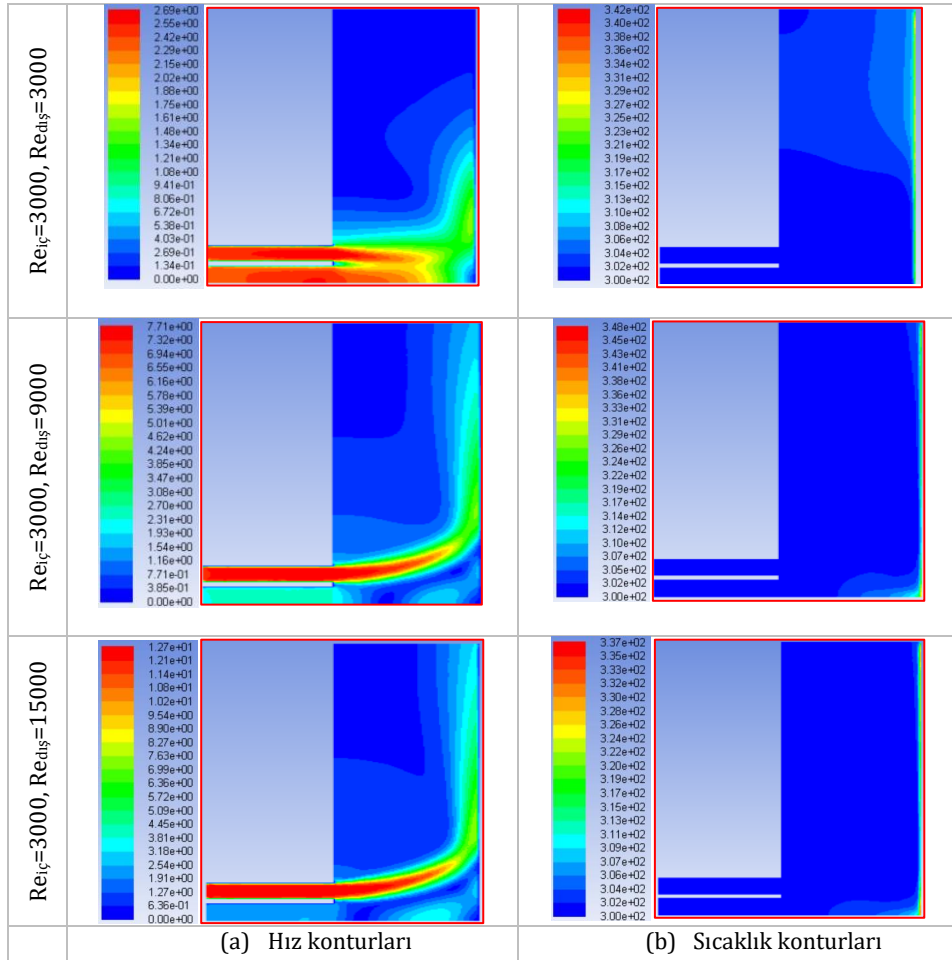
**Şekil 2.** Sayısal sonuçların doğrulanması

Bu bölümde, iki farklı jet-hedef yüzey mesafesine ve farklı Reynolds sayılarına bağlı olarak sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan eş aksel halkasal ve dairesel jetlerden elde edilen Nusselt sayıları elde edilmiştir. Sayısal çözümlerle elde edilen hız ve sıcaklık görüntüleri ile eşzamanlı sürekli çarpan halkasal ve dairesel jetin akış ve ısı transfer mekanizması tartışılmıştır. Yapılan çalışmada ısı akısı, Prandtl sayısı, jet geometrisi sabit tutularak farklı

$Re_{iç}$  (daireysel jet için  $Re$ ) ve  $Re_{dış}$  (halkasal jet için  $Re$ ) kombinasyonları için akış parametrelerinin ısı transferine etkileri araştırılmıştır.

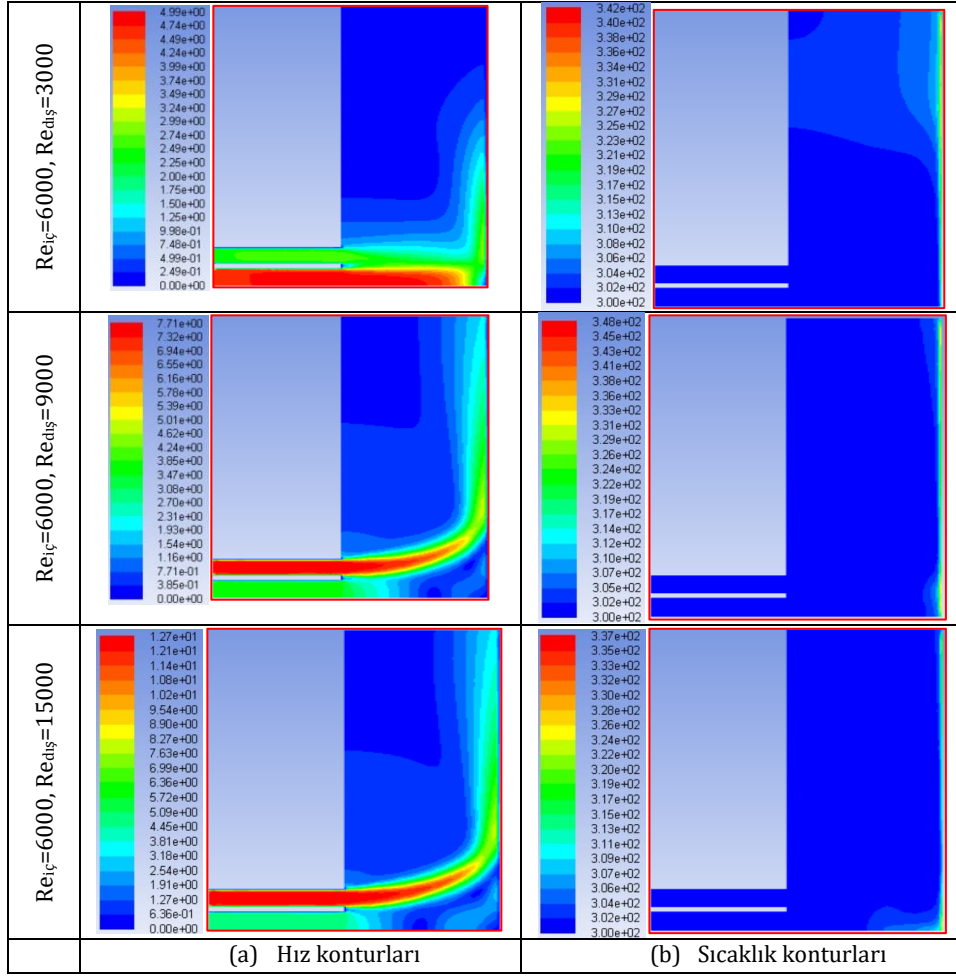
### 3.1. Jet hızlarının akış ve sıcaklık alanlarına etkisi

Sabit bir jet-hedef yüzey arası mesafede ( $H/D=2$ ) ve sabit bir dairesel jet Reynolds sayısında ( $Re_{iç}=3000$ ) değişen halkasal jet Reynolds sayılarına ( $Re_{dış}$ ) göre akış alanındaki hız alanlarının değişimi Şekil 3a'da ve sıcaklık alanlarının değişimi Şekil 3b'de gösterilmiştir. Halkasal jet hızının düşük olduğu durumda ( $Re_{dış}=3000$ ), jetin hedef yüzeye çarpması ile durma noktası etrafında etkili olduğu ve jetin levha yüzeyine tam olarak yayılmaması nedeniyle duvar jet bölgesinde daha az etkili olduğu görülmektedir. Hedef yüzeye çarptıktan sonra jetin etkisi azalmakta ve levhanın uç kısımlarında önemini kaybetmektedir. Artan  $Re_{dış}$  değerlerinde ( $Re_{dış} \geq 9000$ ) ise halkasal jet, durma noktasında daha az etkili olurken, duvar jet bölgesinde jetin önemi artmaktadır (Şekil 3a). Şekil 3b'de düşük  $Re_{dış}$  değerlerinde hedef yüzey üzerindeki durma noktasında sıcaklık gradyanı daha düşükken artan  $Re_{dış}$  değerlerinde durma noktasındaki sıcaklık gradyanının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca  $Re_{dış}$  değerinin artması ile hedef yüzey sıcaklığının azaldığı gözlenmektedir. Dairesel ve halkasal jetin, eş zamanlı ve sürekli olarak farklı hızlarda hedef yüzeye çarpması ile hız ve sıcaklık alanlarının oldukça değiştiği görülmektedir. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzeye çarpması, özellikle halkasal jet hızlarının yüksek olması durumunda tüm levha üzerinde etkili olmasına neden olmuştur.



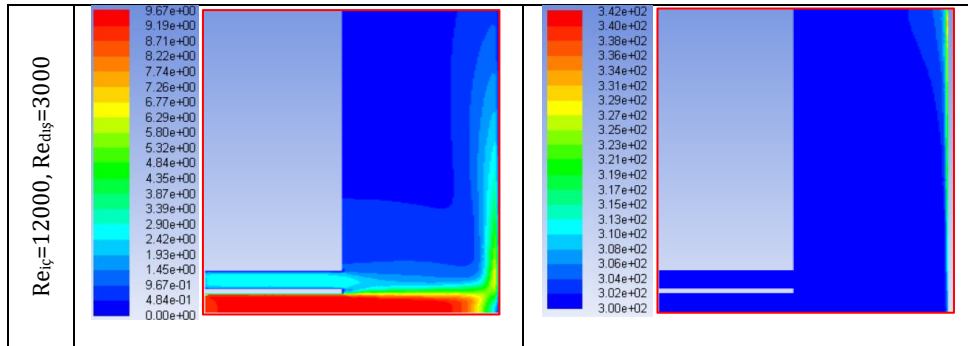
Şekil 3. Sabit  $H/D=2$  ve  $Re_{iç}=3000$  için farklı  $Re_{dış}$  değerlerinde (a) hız alanları ve (b) sıcaklık alanları

$H/D=2$  ve  $Re_{iç}=6000$  olduğu durumda farklı  $Re_{dış}$  değerleri için hız alanlarının değişimi Şekil 4a'da ve sıcaklık alanlarının değişimi Şekil 4b'de gösterilmiştir. Şekil 3'te olduğu gibi, Şekil 4'te de dairesel jetin, hedef yüzeye çarptığı durgunluk noktasına yakın bölgelerde etkili olduğu, halkasal jetin ise duvar jeti bölgesinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Dairesel ve halkasal jet hızının artması, levha yüzeyine çarpan akışkanın debisini artırması nedeniyle daha fazla miktardaki akışkanın levha boyunca yayılmasını sağlamaktadır. Her iki jetten çıkan daha soğuk akışkan, ısıtılmış düz hedef yüzey üzerine çarpıp levha boyunca ilerlerken akışkan ve hedef yüzey arasındaki taşınım ile ısı transfer hızını artırmaktadır. Hem dairesel jet hem de halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzey üzerine çarpması, yüzeyde oluşan ısıl sınır tabakayı bozarak termal direnci azaltmaktadır. Bu durum akışkan ile levha arasındaki ısı taşınım katsayısının artmasına neden olmaktadır. Böylece ısıtılmış olan hedef yüzeyin sıcaklığında önemli bir düşüş meydana gelecektir.

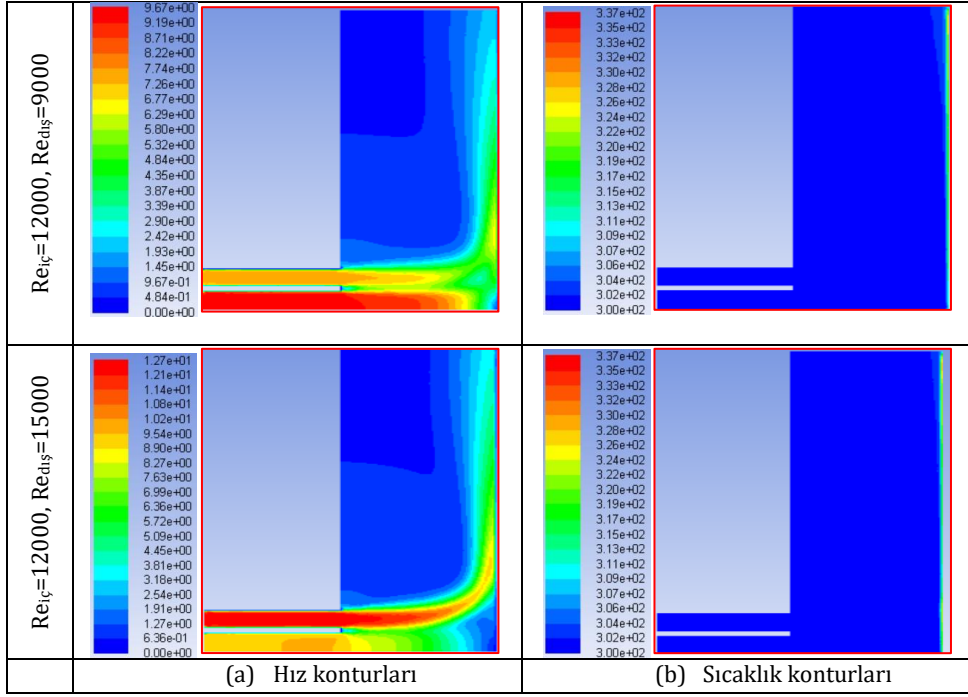


Şekil 4.  $H/D=2$  ve  $Re_{iç}=6000$  için farklı  $Re_{dış}$  değerlerinde (a) hız alanları ve (b) sıcaklık alanları

Şekil 5'te,  $H/D=2$  ve  $Re_{iç}=12000$  olduğu durumda, farklı  $Re_{dış}$  değerleri için çözüm alanındaki hız (a) ve sıcaklık (b) dağılımları gösterilmiştir. Daha yüksek dairesel jet hızında, halkasal jet hızının artması levhanın hem durgunluk bölgesinde hem de duvar jeti bölgesindeki akışı indüklemektedir. Dolayısıyla eş zamanlı olarak levha üzerine sürekli çarpan dairesel ve halkasal jetler, tüm levha yüzeyinde etkisini göstermektedir. Şekil 3a ve 4a'da halkasal jetin hedef yüzeye çarpması, belirli bir açı ile durgunluk bölgesinden daha uzakta meydana gelirken Şekil 5a'da daha dik bir açıyla durma bölgesine yakın çarpması dikkat çekmektedir. Jet hızlarının artmasından kaynaklanan bir durumdur. Özellikle  $Re_{iç}=12000$  ve  $Re_{dış}=15000$  durumunda, yüksek hızlardaki daha soğuk jet akışı, ısıtılmış hedef yüzeye çarptıktan sonra yüzey üzerini tamamen kaplamaktadır. Bu durum ısıtılmış olan hedef yüzeyin sıcaklığının kayda değer şekilde düşmesine yardımcı olmaktadır.



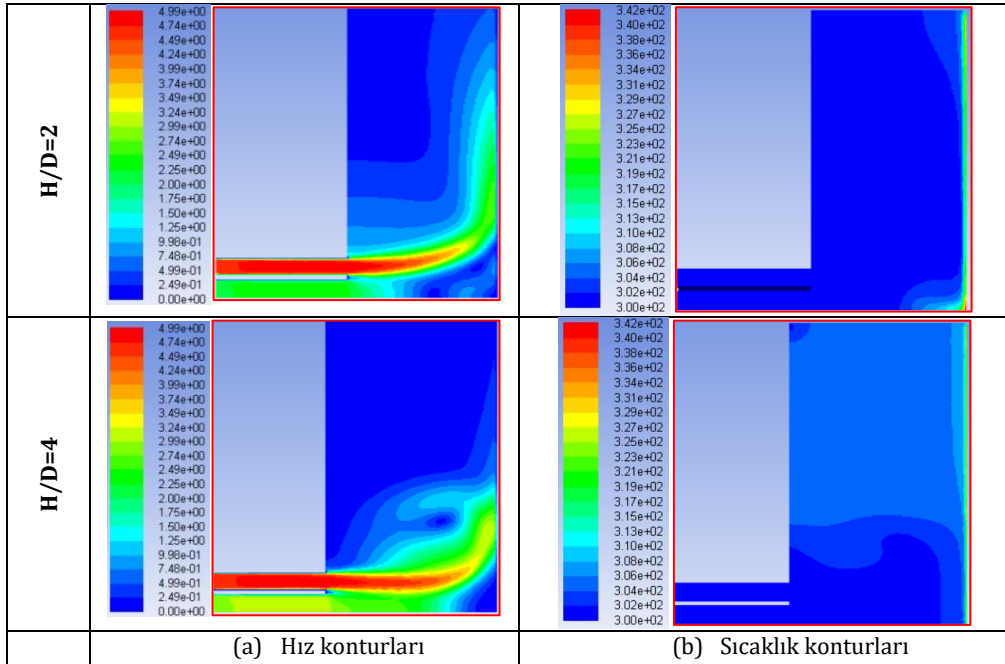




Şekil 5.  $H/D=2$  ve  $Re_{iç}=12000$  için farklı  $Re_{dış}$  değerlerinde (a) hız alanlarının ve (b) sıcaklık alanlarının değişimi

### 3.2. Jet-hedef yüzey mesafesinin hız ve sıcaklık alanlarına etkisi

Bu bölümde, düz bir hedef yüzeye eşzamanlı ve sürekli olarak çarpan dairesel ve halkasal jetin farklı  $Re_{iç}$  ve  $Re_{dış}$  değerleri için  $H/D=2$  ve  $H/D=4$  değerlerinde yüzey üzerindeki akış ve sıcaklık alanları karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da  $Re_{iç}=3000$  ve  $Re_{dış}=6000$  için iki farklı  $H/D$  oranlarına göre hız ve sıcaklık alanları verilmiştir. Jetin hedef yüzeye olan mesafesinin azalması ( $H/D=2$ ) akışkanın levha yüzeyine yayılmasına ve duvar jet bölgesi boyunca akmasına neden olmuştur. Jetin hedef yüzeye olan mesafesinin artması ( $H/D=4$ ) ise jetten çıkan akışkanın durma noktası etrafında yoğunlaşmasını ve akışın dağılmasını sağlamıştır. Bu nedenle  $H/D=4$  durumunda durma noktası etrafındaki sıcaklık gradyanı,  $H/D=2$  durumuna göre daha düşüktür. Duvar jet bölgesinde ise  $H/D=4$  durumunda levha yüzey sıcaklığının  $H/D=2$  durumuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Jet-hedef yüzey arasındaki mesafe, akış ve sıcaklık alanlarını dolayısı ile ısı transferini etkileyen önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

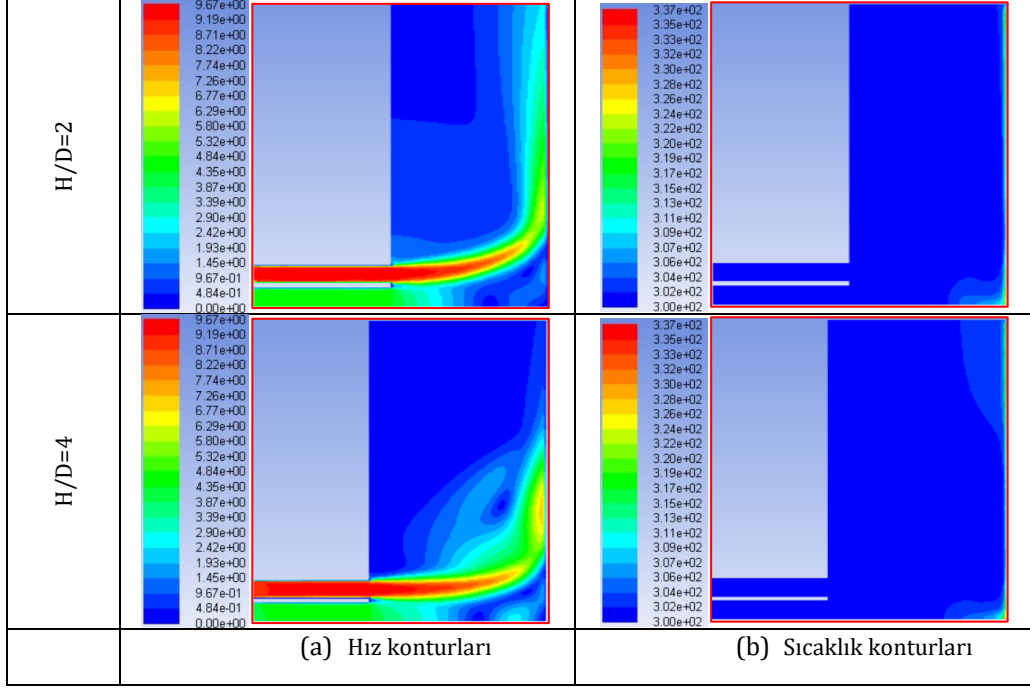


Şekil 6.  $Re_{iç}=3000, Re_{dış}=6000$  için farklı  $H/D$  için hız ve sıcaklık alanları

Şekil 7'de ise  $Re_{iç}=6000$  ve  $Re_{dış}=12000$  için iki farklı  $H/D$  oranlarının levha üzerindeki hız ve sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Artan halkasal jet Reynolds sayısının akış alanlarını her iki  $H/D$  oranları için oldukça etkilediği



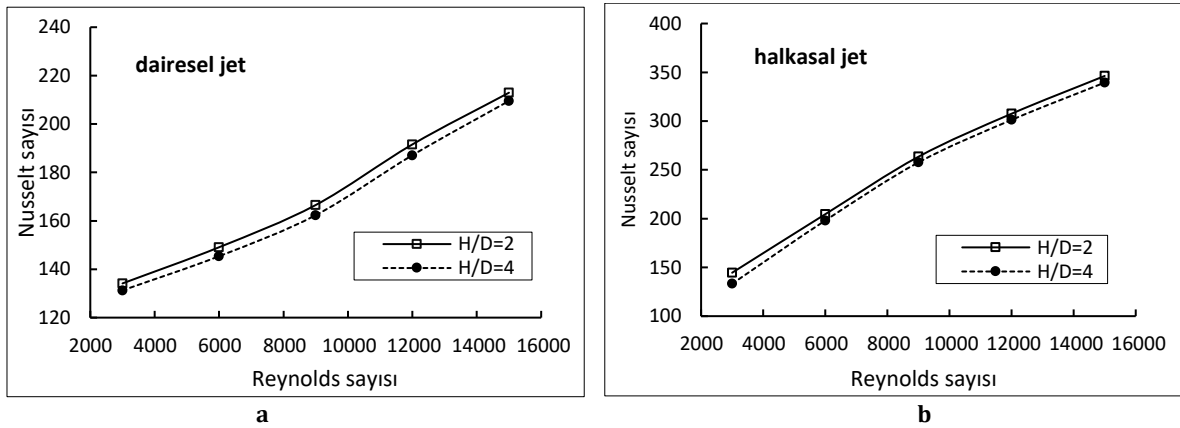
gözlenmiştir. Jet hızının artması, halkasal jetten çıkan kütleli debi miktarının artmasına neden olmaktadır. Yüksek debideki akışkan, düşük H/D mesafesinde hedef yüzeye çarptığında, akış levha boyunca etkisini göstermektedir. Yüksek jet hızlarında ve düşük jet-hedef yüzey mesafesinde ( $H/D=2$ ) jetten çıkan yüksek debideki soğuk akışkanın sıcak hedef yüzey üzerini tamamen kapladığı görülmektedir. Bu nedenle,  $H/D=2$  durumunda levha yüzey sıcaklığının daha düşük olduğu görülmektedir. Dairesel ve halkasal jet hızlarının artması, akışkanın tüm levha yüzeyi boyunca etkili olmasını sağlayamamaktadır. Çünkü  $H/D=4$  durumunda jet, sadece levhanın yarısına kadar etkisini gösterirken levhanın uç kısımlarında etkisi azalmaktadır. Dolayısı ile hedef yüzeyin soğumasında dairesel ve halkasal jet hızlarının yanında jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin de oldukça önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 7.  $Re_{iç}=6000$ ,  $Re_{dış}=12000$  için farklı H/D oranlarına göre hız ve sıcaklık alanları.

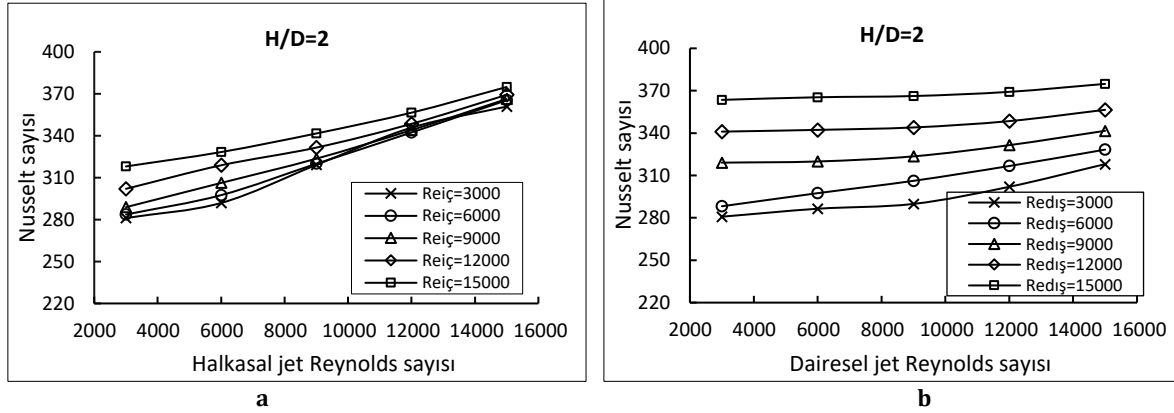
### 3.3. Hedef yüzeyden ısı transferi

Şekil 8'de, dairesel jetin (a) ve halkasal jetin (b) münferit olarak farklı jet-hedef yüzey arasındaki mesafeler ( $H/D$ ) ve farklı jet hızları için plaka üzerine çarpması sonucunda elde edilen Nusselt sayıları verilmiştir. Her iki jet çarpması durumunda ve her iki  $H/D$  oranları için Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısının arttığı gözlenmiştir. Ancak her iki jet çarpmasında,  $H/D=2$  durumunda elde edilen Nusselt sayısı  $H/D=4$ 'ten daha yüksektir. Jet-levha arası mesafenin azalması ısı transferini artırmaktadır. Halkasal jet akışında dairesel jete göre daha yüksek Nu değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla ısı transferi açısından halkasal jetin dairesel jetten daha etkili olduğu söylenebilir. Dairesel jet ve halkasal jet için en yüksek ısı transferi  $Re=15000$  ve  $H/D=2$  durumunda sırasıyla  $Nu=212,93$  ve  $Nu=346,25$  olarak elde edilmiştir.



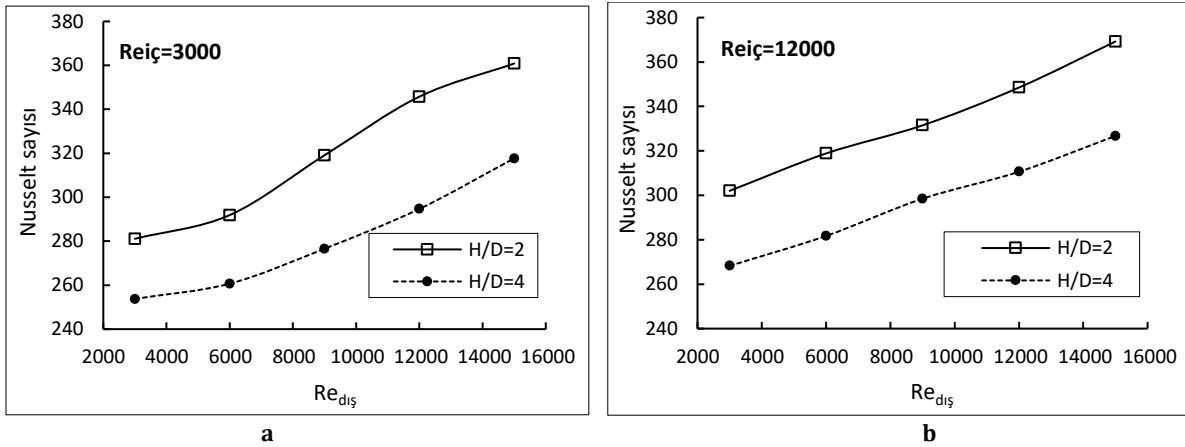
Şekil 8. Farklı H/D için Re ile Nu değişimi, (a) Dairesel jet (b) Halkasal jet

Şekil 9'da, dairesel ve halkasal jetin farklı  $Re_{iç}$  (a) ve  $Re_{dış}$  (b) kombinasyonları için sürekli ve eş zamanlı olarak sabit bir jet-hedef yüzey arasındaki mesafede ( $H/D=2$ ) levhaya çarpması durumunda elde edilen Nusselt sayıları gösterilmektedir. Şekil 9a ve b'den artan  $Re_{iç}$  ve  $Re_{dış}$  değerleri ile Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Dairesel ve halkasal jetin yüksek hızlarda eş zamanlı olarak hedef yüzeye çarpması ısı transferini önemli derecede artırdığı görülmüştür.  $H/D=2$ 'de en yüksek ısı transferi  $Re_{iç}=15000$  ve  $Re_{dış}=15000$  kombinasyonunda  $Nu=374,85$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 9.  $H/D=2$ 'de farklı  $Re_{iç}$  (a) ve  $Re_{dış}$  (b) değerlerinde Nusselt sayısının değişimi

Şekil 10'da  $Re_{iç}=3000$  (a) ve  $Re_{iç}=12000$  (b) olmak üzere sabit bir dairesel jet akışında, farklı  $Re_{dış}$  değerleri için sürekli eş zamanlı olarak hedef yüzeye farklı mesafelerde çarpan jetlerin Nusselt sayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 10a ve b'den sabit bir  $Re_{iç}$  değerleri ( $Re_{iç}=3000$  ve  $Re_{iç}=12000$ ) için çalışılan tüm  $Re_{dış}$  değerlerinde jet-hedef yüzey arasındaki mesafe azaldıkça ısı transferinin arttığı görülmektedir.  $Re_{iç}=3000$  için  $H/D=2$  ve  $H/D=4$ 'te en yüksek ısı transferi  $Re_{dış}=15000$  değerinde sırasıyla  $Nu=360,84$  ve  $Nu=317,68$  olarak elde edilmiştir.  $Re_{iç}=12000$  için  $H/D=2$  ve  $H/D=4$ 'te en yüksek ısı transferi yine  $Re_{dış}=15000$  değerine sırasıyla  $Nu=369,22$  ve  $Nu=326,72$  olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Farklı  $H/D$  değerlerinde,  $Re_{dış}$  ile  $Nu$  değişimi (a)  $Re_{iç}=3000$ , (b)  $Re_{iç}=12000$

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, dairesel ve halkasal jetin sürekli ve eş zamanlı olarak sabit ısı akısına sahip ( $q'' = 1200 \text{ W/m}^2$ ) düz bir yüzeye çarpmasının, hedef yüzeydeki soğutma karakteristiği sayısal olarak incelenmiştir. İncelemeler, iki farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler ( $H/D: 2$  ve  $4$ ) için gerçekleştirilmiştir. Dairesel ve halkasal jetin, farklı Reynolds sayılarının kombinasyonları ile hedef yüzeyden ısı geçişi hesaplanmıştır. Sayısal çalışmada farklı parametreler için hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir ve sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli bulgular aşağıda listelenmiştir:

- Sürekli halkasal jet akışı, dairesel jet akışına göre daha iyi ısı transferi sağlamıştır.
- Sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan halkasal ve dairesel jetin, hedef yüzeye olan mesafesi ( $H/D$ ) azaldıkça ısı transferinin arttığı gözlenmiştir.
- Halkasal ve dairesel jetlerin eş zamanlı uygulanması yüksek  $Re_{dış}$  değerlerinde levha boyunca etkili olduğu, fakat düşük jet hızlarında durma noktası bölgesinde daha belirgin bir etki gösterdiği tespit edilmiştir.

- En yüksek ısı transferi,  $H/D=2$  konumunda,  $Re_{iç}=15000$  ve  $Re_{dış}=15000$  jet hızlarında  $Nu=374,85$  olarak elde edilmiştir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, eş eksenli halkasal ve dairesel jetin, farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında, eş zamanlı olarak düz bir yüzeve çarpması sonucu yüzeve soğutmada önemli bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir.
- İleriki çalışmalarda, hedef yüzeyin etkili soğutulması amacıyla sürekli ve eşzamanlı çarpan jet akışlarında, jet sayısı, akışkan tipi, akış rejimi, hedef yüzey geometrisi, jet geometrik parametreleri değiştirilerek akış ve ısı transferi incelenebilir. Elde edilecek çalışma sonuçları, ısıtma, soğutma ve kurutma gibi ısı transfer uygulamalarıyla ilgilenen araştırmacılar ve farklı sektörler için önemli bir rol gösterici olacaktır. Elde edilecek daha yüksek ısı transfer hızı nedeniyle enerjinin etkin kullanımı dolayısıyla enerji tasarrufu sağlanacaktır.

### Semboller dizini

B	Boyutsuz jet-hedef yüzey arası mesafe	Pr	Prandtl sayısı
$C_p$	Özgül ısı (kJ/kgK)	$Re_{dış}$	Halkasal jet Reynolds sayısı
$D_h$	Hidrolik çap (m)	$Re_{iç}$	Dairesel jet Reynolds sayısı
H	Jet-hedef yüzey arası mesafe (m)	$T_s$	Yüzey sıcaklığı (K)
h	Isı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)	$T_{\infty}$	Ortam sıcaklığı (K)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)	u	Ortalama hız (m/s)
L	Levha yarıçapı (m)	P	Dinamik basınç (Pa)
Nu	Nusselt sayısı	$\mu$	Dinamik viskozite (Pa.s)
q"	Isı akısı (W/m <sup>2</sup> )	$\rho$	Akışkan yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )

### Teşekkür

Bu çalışma, Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ASÜ-BAP 2023-05 nolu proje) kapsamında desteklenmiştir. Sağlanan desteğe teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- [1] Celik, N. ve Turgut, E. 2012. Design Analysis of an Experimental Jet Impingement Study by Using Taguchi Method. *Heat Mass Transfer*, 48, 1407-1413.
- [2] Kalifa, R.B., Habli, S., Said, N.M., Bournot, H. Palec, G.L. 2016. Parametric Analysis of a Round Jet Impingement on a Heated Plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57, 11-23.
- [3] Nuntadusit, C., Wae-Hayee, M., Bunyajitradulya, A., Eiamsa-ard, S. 2012. Visualization of Flow and Heat Transfer Characteristics for Swirling Impinging Jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 640-648.
- [4] Friedrich, B.K., Ford, T.D., Glaspell, A.W., Choo, K. 2017. Experimental Study of the Hydrodynamic and Heat Transfer of Air-Assisted Circular Water Jet Impinging a Flat Circular Disk. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 804-809.
- [5] Akdağ, Ü., Akçay, S., Karabayır, M.L. 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.
- [6] Hosain, M.L., Fdhila, R.B. Daneryd, A. 2016. Heat Transfer By Liquid Jets Impinging on Hot Flat Surface. *Applied Energy*, 95(164), 934-943.
- [7] 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.
- [8] Lee, J., Lee, S.J. 2000. The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heattransfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 555-575.
- [9] Yasaswy, N.S, Saroj, S., Hindasageri, V., Prabhu, S.V. 2014. Local Heat Transfer Distribution of an Impinging Air Jet Through a Crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 79, 250-259.
- [10] Kılıç, M., Başkaya, Ş. 2017. Farklı Geometride Akış Yönlendiriciler ve Çarpan Jet Kullanarak Yüksek Isı Akılı Bir Yüzeyden Olan Isı Transferinin İyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 693-707.
- [11] Alnak, D.E Karabulut, K. 2019. Hava Jeti Çarpmalı Kurutma için Farklı Dairesel Nemli Nesne Geometrilerinin Isı ve Kütle Transferi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (1), 51-62.
- [12] Golda, P., Lettner, N., Schießl, R. Maas, U. 2021. Experimental Investigation of The Cryogenic Ln2-Cooling Performance for an Impinging Jet Configuration for Different Inflow Conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121776.

- [13] Zhong, Y., Zhou, C. ve Shi, Y. 2022. Effect of the Nozzle Geometry on Flow Field and Heat Transfer in Annular Jet Impingement. *Energies*, 15, 4271.
- [14] Ryzhenkov, V. Mullyadzhanov, R. 2017. Large-eddy Simulations of the Near Field of a Turbulent Annular Jet, *Journal of Physics, Conf. Series*, 899, 022014.
- [15] Philippov, M.V., Chokhar, I.A., Terekhov, V.V., Terekhov, V.I., Baranov, I.N. 2021. Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer of an Annular Impinging Jet. *Journal of Physics*, 2039, 012028.
- [16] Celik, N., 2006. Optimum Lüle Şeklinin Çarpan Jet Üzerinde Etkilerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 267s, Elâzığ.
- [17] Kalinina, S.V., Terekhov, V.I. Sharov, K.A. 2015. Special Features of Flow in an Annular Jet Impinging on a Barrier. *Fluid Dynamics*, 50(5), 665–671.
- [18] 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.
- [19] Aydin, O., Markal, B. 2018. Experimental Investigation of Coaxial Impinging Air Jets. *Applied Thermal Engineering*, 141, 1120-1130.
- [20] Terekhov, V.I., Kalinina, S.V., Sharov, K.A. 2018. Convective Heat Transfer at Annular Jet Impingement on a Flat Blockage. *High Temperature*, 56, 217-222.
- [21] Afroz, F., Sharif, M.A.R. 2018. Numerical Study of Turbulent Annular Impinging Jet Flow and Heat Transfer from a Flat Surface. *Applied Thermal Engineering*, 138, 154-172.
- [22] Ibramiov, U. 2019. İkili Çarpan Jet Akışında Akış ve Isı Transferi Parametrelerinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- [23] Dutta, P., Chattopadhyay, H. 2021. Numerical Analysis of Transport Phenomena under Turbulent Annular Impinging Jet. *Computational Thermal Sciences*, 13(2), 1–19.
- [24] 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.
- [25] Kılıç, M., Şahin, M., Iqbal, M., Demircan, T., Kılınc, Z., Ullah, A. 2023. Numerical Investigation of Cooling an Industrial Roller by Using Swirling Jets. *ECJSE*, 10 (1), 147–159.
- [26] Ahmed, Z.U., 2016. An Experimental and Numerical Study of Surface Interactions in Turbulent Swirling Jets, Edith Cowan University, School of Engineering, Doctoral Thesis, 234 pp, Australia.
- [27] Rakhsha, S., Zargarabadi, M.R., Saedodin, S. 2021. Experimental and Numerical Study of Flow and Heat Transfer from a Pulsed Jet Impinging on a Pinned Surface. *Experimental Heat Transfer*, 34(4), 376-391.