



## Düz bir levhaya çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dairesel hava jetlerinde ısı transferi etkilerinin incelenmesi

### Investigation of effects of heat transfer in unconfined and confined impinging circular air jets on flat plate

Haluk Keleş<sup>1,\*</sup>, Yücel Özmen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Artvin Çoruh Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 08100, Artvin, Türkiye

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış türbülanslı dairesel hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çarpma levhası yüzeylerinde termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinden, çarpma levhası orta eksenini boyunca sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. İncelenen tüm akış alanlarında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin artan Reynolds sayısı ile arttığı, artan lüle-levha arası açıklık ile azaldığı görülmüştür. Akış alanlarında sınırlayıcı levhanın varlığı, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltmaktadır. Sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma bölgesindeki Nusselt değerleri sınırlandırılmış jet durumuna kıyasla % 15'e varan oranda daha yüksek elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çarpan dairesel jet, Sınırlayıcı levha, Nusselt dağılımı

#### 1 Giriş

Çarpan jetler, ısıtma, soğutma ve kurutma amaçlı birçok endüstriyel uygulamada, yüksek ısı transfer oranı sağlamları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında, cam ve metal levhaların tavllanması, tekstil ve kağıt ürünlerinin kurutulması, uçak kanatlarında oluşan buzlanmanın giderilmesi ile gaz türbinlerinde, bilgisayarlarda ve elektronik cihazlarda ısınmış bileşenlerin soğutulması yer almaktadır. Çarpan jet akışlarında ısı transferi özellikleri, lüle geometrisi, lüle-levha arası açıklık (H/D), Reynolds sayısı, türbülans koşulları ve akış alanının sınırlanması gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Çarpan jetler, akış alanlarının sınırlandırılma durumuna göre sınırlandırılmamış jet veya sınırlandırılmış jet olarak tanımlanmaktadır. Her iki akış alanı durumu için de literatürde çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, akış alanının lüle çıkış seviyesine yerleştirilen bir sınırlayıcı levha tarafından sınırlandığı geometriler, endüstriyel uygulamalarda daha yaygındır. Küçük lüle-levha arası

#### Abstract

In this study, the heat transfer effects on the impingement surfaces of unconfined and confined turbulent circular air jets impinging a flat surface are investigated experimentally. Temperature distributions along the center axis of the impingement plate were obtained from the temperature measurements performed with a thermal camera on the impingement plate surfaces. From the obtained temperature distributions, the effects of Reynolds number, nozzle-to-plate spacing, and the presence of confinement plate on the Nusselt distributions on the impingement plate were investigated. In all flow fields investigated, it was observed that the Nusselt values on the impingement plate increased with increasing Reynolds number and decreased with increasing nozzle-to-plate spacing. The presence of the confinement plate in the flow fields reduces the Nusselt values on the impingement plate. In the unconfined jet case, the Nusselt values in the impingement region were up to 15 % higher than in the confined jet case.

**Keywords:** Impinging circular jet, Confinement plate, Nusselt distribution

açıklıklarda, sınırlayıcı levha ilavesi akış alanında karmaşık akış yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Büyük lüle-levha arası açıklıklarda ise sınırlayıcı levhanın varlığı çarpma levhası boyunca oluşan duvar jetinin yayılımını geciktirmektedir [1]. Çarpan dairesel jetler konusunda literatürde hem deneysel hem de sayısal çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar çoğunlukla ısı transferi üzerinedir. Schrader [2], çarpan dairesel jetlerde çarpma bölgesinin, lüle çapının 1.2 katına kadar genişlediğini ifade etmiştir. Ho [3], bir levhaya çarpan hava jetinin çarpma bölgesinden sonra yön değiştirerek oluşturduğu duvar jetinde duvar boyunca gelişen sınır tabaka ile serbest akış arasındaki etkileşimi deneysel olarak incelemiştir. Goldstein vd. [4] ısıtılmış bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış dairesel hava jetinde taşınım ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının çarpma levhası ile hava jeti arasındaki sıcaklık farkından etkilendiğini ifade etmişlerdir. Baughn ve Shimizu [5] tarafından yapılan deneysel çalışmada, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hkeles@artvin.edu.tr (H. Keleş)

Geliş / Received: 05.06.2023 Kabul / Accepted: 26.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1310010

yerel ısı transfer katsayılarının azaldığı ortaya konulmuştur. Mohanty ve Tawfek [6], çarpan dairesel jetlerde, çarpma levhası üzerindeki ısı transfer katsayısının çarpma bölgesinde en büyük değeri aldıktan sonra levha yüzeyi boyunca radyal doğrultuda üstel olarak azaldığını ifade etmişlerdir. Huang ve El-Genk tarafından yapılan benzer çalışmada ortalama Nusselt sayısının  $Re^{0.76}$  ile orantılı olduğu belirtilmiştir [7]. Lytle ve Webb [8], küçük lüle-levha açıklıklarında ( $H/D < 1$ ), çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımlarını termal kamera ile inceledikleri çalışmalarında, durma noktası dışında da ısı transferinde ikincil artışların oluştuğunu belirtmişlerdir. Isı transfer katsayılarındaki bu ikincil artışların, durma noktasından itibaren yönelerek duvar boyunca sınır tabaka oluşturan jet akışının laminardan türbülansa geçişi ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir. Colucci ve Viskanta [9], sınırlanmış çarpan dairesel jet akışında  $0.25 < H/D < 6$  aralığındaki lüle-levha arası açıklıklar için sıvı kristal tekniği ile çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transferi özelliklerini incelemişlerdir. Isı transferi karakteristiklerinin sınırlanmış jet durumunda sınırlanmamış jete göre Reynolds sayısı ve lüle-levha arası açıklıktan daha fazla etkilendiğini belirtmişlerdir. Özmen ve Baydar [10], ısıtılmış bir levhaya çarpan sınırlanmamış dairesel jet akışında akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çarpma yüzeyi üzerinde Nusselt sayısındaki piklerle türbülans şiddetindeki piklerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Herrero ve Buchlin [11], lüle geometrisinin çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transferi dağılımına etkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, lüle içerisine eklenen farklı geometrik ilavelerin yerel ısı transferi dağılımını etkilediğini belirtmişlerdir. Chandratilleke vd. [12], ısıtılmış bir yüzey üzerine gönderilen titreşimli jet akışı ile jet eksenine dik doğrultuda gönderilen çapraz akış arasındaki ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çapraz akışın jetin ısı performansını etkilediğini ifade etmişlerdir. Ai vd. [13], hareketli bir lüleden çıkan çarpan jet akışında çarpma levhası üzerindeki ısı transferi etkilerini farklı ısı akıları ve jet çıkış hızları için deneysel olarak incelemişlerdir. Hareketli lüleden ısı transferini % 40 düzeyinde artırdığını ifade etmişlerdir. Gradeck vd. [14], hareketli bir yüzey üzerine çarpan dairesel jet akışında ısı transferi etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. k-ε türbülans modelini ve iyileştirilmiş duvar yaklaşımını kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada elde ettikleri sonuçların deneysel verilerle örtüştüğü belirtilmiştir. Sevindir [15], çapraz akışlı çarpan dairesel sıcak jet akışında ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Miranda ve Campos [16], sınırlanmamış ve sınırlanmış çarpan laminar jet akışını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Aynı Reynolds sayısında, sınırlanmış jet durumunda akış alanındaki girdap bölgelerinin daha uzun olduğunu belirtmişlerdir. Behnia vd. [17] tarafından yapılan sayısal çalışmada, sınırlanmamış ve sınırlanmış jet akışı durumları incelenmiş, sınırlanmanın genel olarak çarpma yüzeyindeki ortalama ısı transferinde azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Sınırlanmanın ısı transferi üzerindeki olumlu etkisinin

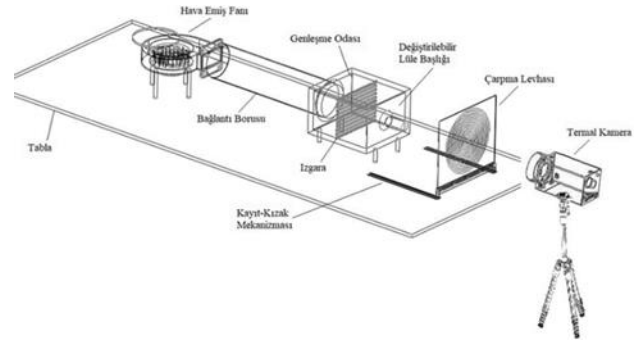
sadece çok küçük lüle-levha açıklıklarında ( $H/D < 0.25$ ) olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlanmamış ve sınırlanmış türbülanslı dairesel hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, termal kamera kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, sınırlanmamış ve sınırlanmış çarpan jet durumlarının birlikte incelenmesi ve sınırlayıcı levha etkisinin deneysel olarak belirlenmesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

## 2 Materyal ve metot

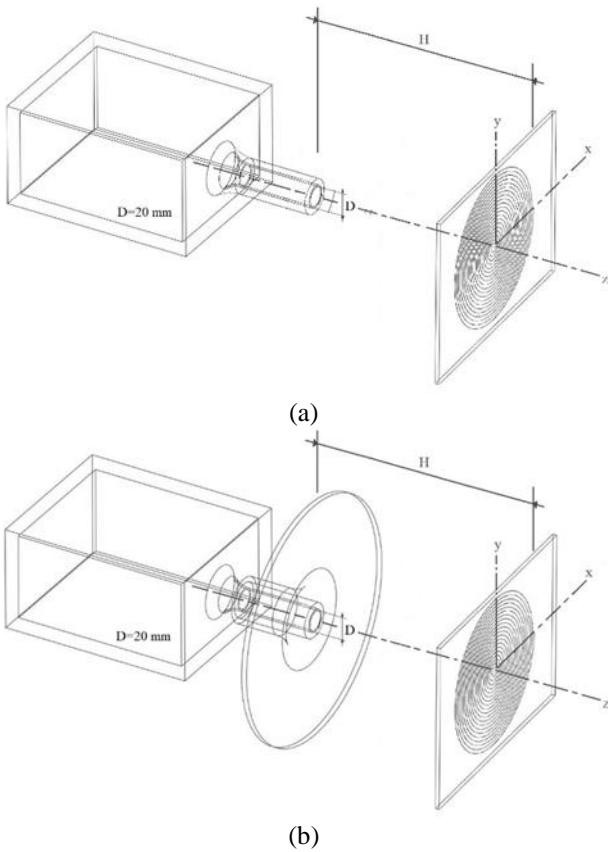
### 2.1 Deneysel düzenekleri

Çarpan dairesel jet akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki ısı transferi etkilerini incelemek amacıyla yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği imal edilmiştir. Şekil 1a ve b'de sırasıyla şematik görüntüsü ve fotoğrafı verilen deney düzeneğinde, fan yardımıyla emilen ortam havası yatay şekilde konumlanmış bağlantı borusundan geçerek genişleme odasına ulaşmaktadır. Lüleden çıkan yatay hava jeti elektrikli olarak ısıtılmış dairesel çarpma levhasına çarpmaktadır. Düşey olarak konumlanmış olan ısıtılmış çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizmasıyla yatay doğrultuda hareket ettirilerek lüle-levha arası açıklık değiştirilmektedir. Fan girişine yerleştirilmiş kapağın açıklığı değiştirilerek farklı debiler elde edilmektedir. Sıcaklık ölçümleri, epoksi levhanın arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği (a) Şematik görünüm (b) Fotoğraf görünüm

Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğinde, genişleme odası çıkışına yerleştirilmiş dairesel kesitli lüle ile sınırlandırılmamış jet, dairesel kesitli lüle çıkışına yerleştirilmiş sınırlayıcı levha ile ise sınırlandırılmış jet akış şartları oluşturulmuştur. Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğinde oluşturulan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dairesel jete ait akış alanları şematik olarak sırasıyla Şekil 2a ve b'de verilmiştir. Dairesel jette lüle çapı  $D=20$  mm olarak gerçekleştirilmiştir. Lüleden çıkan hava jeti, sınırlayıcı levhanın ucundan itibaren  $H$  mesafesi kadar uzakta olan ve lüle eksenine dik doğrultuda yerleştirilen elektriksel olarak ısıtılan düz levhaya çarpmaktadır.



Şekil 2. Çarpan dairesel jet akış düzeneğinde akış alanlarının şematik görünümü (a) Sınırlandırılmamış jet (b) Sınırlandırılmış jet

$H$ , lüle-levha arası açıklığı ve  $D$ , dairesel kesitli lüle çapını göstermek üzere, sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet akış alanlarında,  $0.5 \leq H/D \leq 10$  lüle-levha arası açıklık ve  $20000 \leq Re \leq 30000$  Reynolds sayısı aralıklarında çarpma levhası üzerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sınırlayıcı levha durumunun, levhalar arası açıklığın ve Reynolds sayısının Nusselt dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yatay eksenli çarpan jet düzeneğinde,  $0.15$  W/mK ısıl iletkenliğe ve  $0.98$  emisivite değerine sahip  $1.5$  mm kalınlığındaki epoksi malzemeden üretilmiş çarpma levhasının ısıtılacak dairesel bölümünde, üniform sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla baskı devre tekniği kullanılarak  $1$  mm genişliğe ve  $40$   $\mu$ m kalınlığa sahip bakır şeritler ile dairesel formda

elektriksel devre oluşturulmuştur. Çarpma levhasında bakır şeritlerin bulunduğu dairesel bölümün yarıçapı  $90$  mm değerindedir.

Dairesel çarpma levhasının termal kamera tarafındaki arka yüzeyi ise spreyci boya ile mat siyah renge boyanmıştır. Yatay eksenli çarpan jet düzeneğindeki çarpma levhasının dairesel bölümü üzerinde, ayarlı trafo yardımıyla uygulanan  $20.3$  Volt gerilim ve  $2.01$  Amper alternatif akımla,  $1603.5$  W/m<sup>2</sup>lik sabit ısı akısı oluşturulmuştur. Çarpma levhasının ısıtılmış dairesel kısmı üzerine üç adet termoeleman yerleştirilmiş ve termoelemanlardan alınan sıcaklık değerleri termal kamera ile karşılaştırılarak, kalibrasyon ve emisivite değerleri ayarlanmıştır. Çarpan dairesel jet düzeneğinde,  $20$  mm çapa ve  $80$  mm uzunluğa sahip lüle kullanılmıştır. Lüle ve üzerine takılabilen düz sınırlayıcı levha, Creality Ender 3 Pro marka üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Sınırlayıcı levha, dairesel jet lülesinin dış çevresi üzerine sıkı geçme şeklinde monte edilmiştir. Çarpan jetlerde Reynolds sayısı lüle çapına ve lüle çıkışındaki akış hızına göre belirlenmektedir. Çalışma kapsamında incelenen akış alanlarındaki Reynolds sayılarının belirlenmesi amacıyla lüle çıkışlarına yerleştirilen Pitot tüpü ile basınç farkları ölçülerek, lüle çıkışlarındaki jet hızları hesaplanmıştır. Reynolds sayısının  $20000$  ve  $30000$  değerleri için, Pitot tüpü ile ölçülen lüle çıkış hızları sırasıyla  $15.10$  m/s ve  $22.65$  m/s olarak gerçekleştirilmiştir. Isıtılmış durumdaki çarpma levhasına ortam havası sıcaklığındaki jetin çarptırılmasıyla, çarpma levhasından olan ısı transferi etkisi, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi tarafında yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleriyle incelenmiştir. Yüzey sıcaklık ölçümleri,  $-40^{\circ}\text{C}$ 'den  $+500^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ölçüm aralığına ve  $0.08^{\circ}\text{C}$  hassasiyetine sahip,  $240 \times 320$  piksel çözünürlüklü,  $50$  Hz ölçüm hızına sahip FLIR Thermovision A20 model termal kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermoCAM Researcher Professional paket programı ile kaydedilmiştir. Termal kamera, çarpma levhasının jet tarafındaki yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile kalibre edilmiştir. Termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulanması amacıyla, çarpma levhasının her iki yüzeyine toplam üç adet T tipi termoeleman yerleştirilmiştir. Çarpma yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile ölçülen sıcaklık, aynı konumda termal kamera ile ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılmış ve çarpma yüzeyindeki  $0.98$  emisivite değerinde termoeleman ve termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki farkın  $\pm 1.5$  K düzeyinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerleri, çarpma levhasındaki yerel sıcaklıkların zamanlara değişmemesi ve akışın kısa sürede sürekli rejime ulaşması nedeniyle  $5$  dakika süreyle kaydedilmiştir. Çarpan jetlerle ısı transferine yönelik deneysel çalışmalarda, göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden biri de sürüklenme etkisidir. Ortam sıcaklığı ile jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın yüksek olması durumunda ortaya çıkan sürüklenme etkisi, Nusselt sayısı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çarpma levhasındaki ısı transferi analizinde sürüklenme etkisinin ihmal edilebilmesi için sıcaklık farkının  $3$  K'den az olması gerekmektedir [18]. Bu çalışmada, sürüklenme etkisinin düzeyini belirlemek amacıyla, lüle

çıkışına yerleştirilen bir adet termoeleman ile jet akışkanının sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, ortam sıcaklığı ve jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın 3 K'in altında olması nedeniyle, çarpma levhasındaki sıcaklık ölçümlerinde sürüklenme etkisi ihmal edilmiştir.

## 2.2 Isı transferi parametreleri ve hesaplama prosedürü

Çalışma kapsamında, lüle çıkışındaki hava jeti hızı  $U_0$  ve lüle çapına göre tanımlanmış Reynolds sayısı sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

$$U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

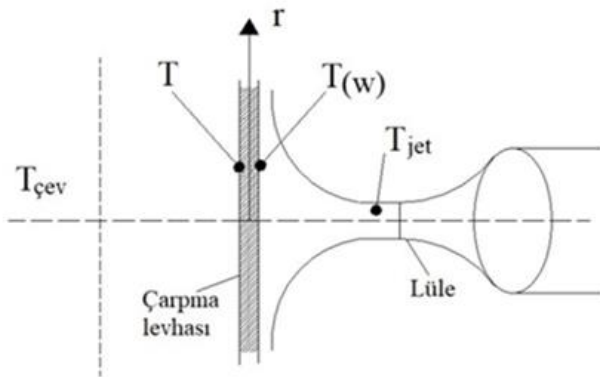
$$Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (2)$$

Bu bağıntılarda,  $\Delta P$ , basınç farkını,  $\rho$ , akışkanın yoğunluğunu,  $\mu$ , dinamik viskoziteyi ve  $D$  ise lüle çapını göstermektedir. Çarpan jet akışlarında, çarpma levhaları üzerindeki ısı transferi etkileri, aşağıda sırasıyla bağıntıları verilen ısı taşınım katsayısı ( $h$ ) ve boyutsuz Nusselt sayısı ( $Nu$ ) ile incelenmektedir.

$$h = q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

Burada  $q_{\text{taşınım}}$ , taşınım ile ısı akısını,  $A_w$ , ısıtılmış levhanın yüzey alanını,  $T_w$ , jet tarafındaki levha sıcaklığını ve  $T_j$ , jetin çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. Nusselt sayısı ifadesinde yer alan  $k$ , havanın ısı iletim katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3'te, düz bir yüzeye çarpan jet akışında, çarpma levhasından ısı transferinde etkili büyüklükler şematik bir görüntü ile verilmektedir. Burada,  $T$ , termal kamera ile ölçülen sıcaklığı,  $T_{\text{çev}}$ , çevre ortamın sıcaklığını ve  $T_{(w)}$ , jet tarafındaki levha sıcaklığını göstermektedir. Deneyler sırasında çevre ortamın sıcaklığı 22°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Çarpan jetlerde ısı transferinde etkili büyüklükler

$q_{\text{taşınım}}$ , taşınım ile ısı akısı, Joule etkisi ile elde edilen ısı akısından ( $q_{\text{toplam}}$ ), ısı kayıpları çıkarılarak hesaplanmaktadır. Çarpma yüzeyindeki enerji dengesinden,

$$q_{\text{taşınım}} = q_{\text{toplam}} - q_{\text{iletim}} - q_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

elde edilmektedir. Burada,  $q_{\text{toplam}}$ , toplam ısı akısı miktarını,  $q_{\text{iletim}}$ ,  $q_{\text{ışınım}}$  ve  $q_{\text{doğaltaşınım}}$  ise sırasıyla çarpma yüzeyinden iletimle, ışınlama ve doğal taşınım ile olan ısı kaybını göstermektedir. Epoksi levhaya toplam güç girişi, ayarlı trafo tarafından sağlanan gerilim ve multimetre ile ölçülen levha direnci değerleri kullanılarak hesaplanmakta ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (6)$$

Isı kayıpları, levhanın jete maruz kalmayan arka yüzeyi üzerindeki ışınlama, iletim ve doğal taşınım etkilerinden kaynaklanmaktadır. Çarpma levhası üzerinde aksel yönde iletimle olan ısı transferi, çarpma levhası malzemesinin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Çarpma levhası ile çevre ortamın sıcaklık değerleri arasındaki fark nedeniyle oluşan ışınlama ısı transferi aşağıda verilen Stefan-Boltzmann [19] bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_s \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (7)$$

Burada,  $\varepsilon$ , çarpma levhasının emisivite değerini göstermektedir. Stefan-Boltzmann sabiti  $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)] değerindedir. Çarpan dairesel jet akış düzeneğinde, düşey konumlandırılan çarpma levhasından doğal taşınım ile olan ısı kaybını, Churchill ve Chu [20] tarafından aşağıda önerilen ampirik bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (8)$$

Bu bağıntılarda,  $Ra$  ve  $Pr$ , sırasıyla Rayleigh sayısı ve Prandtl sayısı ifade etmektedir. Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak, yatay çarpan jet düzeneğinde, doğal taşınım ve ışınlama kayıpları sırasıyla toplam ısı miktarının %3'ü ve %4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar, yatay çarpan jet düzeneğinde toplam ısı akısının %7'si değerinde olmaktadır.

## 2.3 Belirsizlik analizi

Deneyler sırasında yapılan ölçümlerle ilgili Kline ve McClintock [21] tarafından önerilen eşitlik ve hesaplama yöntemi kullanılarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen Reynolds sayısına ve Nusselt sayısına ait belirsizlikler sırasıyla,  $\pm$  %2.61 ve  $\pm$  % 2.87 mertebesinde.

## 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, çarpan dairesel jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen iki farklı akış alanındaki etkili parametreler için çarpma levhaları üzerinde termal kamera ile sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Sıcaklık dağılımları, çarpma levhası orta eksen boyunca elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası

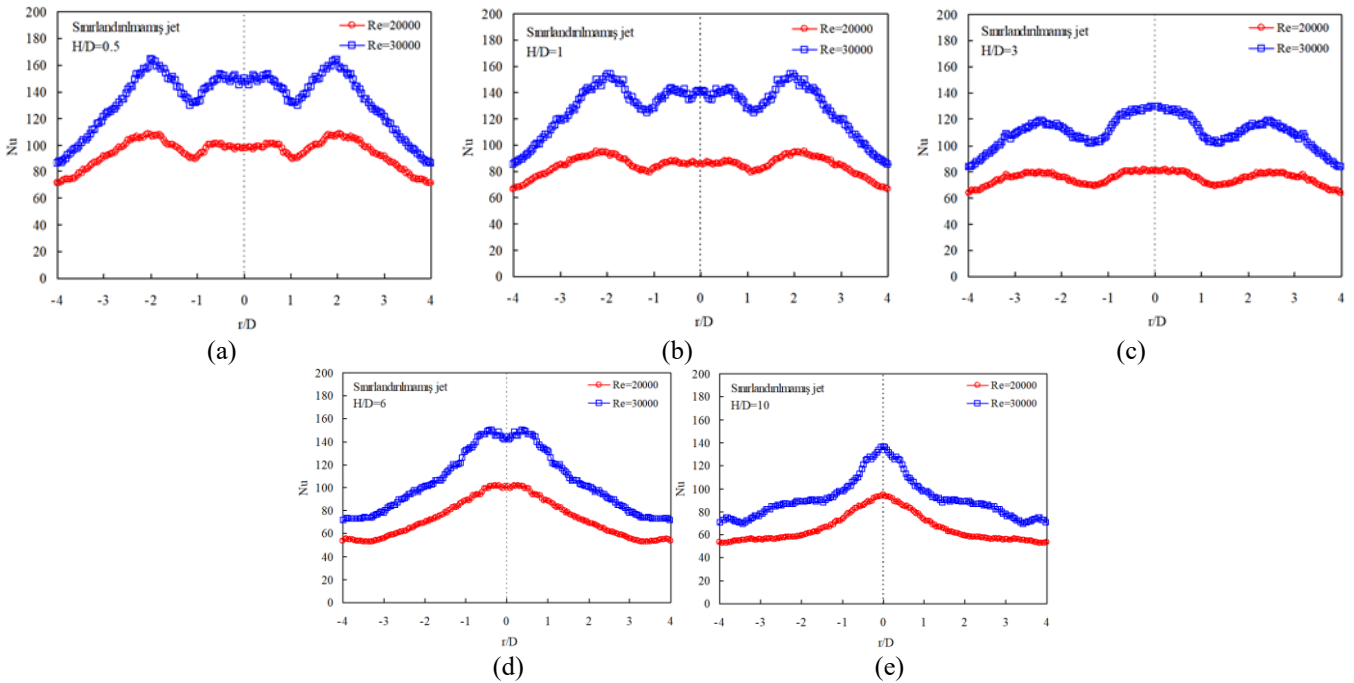
üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Çarpma dairesel jet akışında ısı transferi deneyleri, sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış akış alanlarında Reynolds sayısının  $Re = 20000$  ve  $30000$  değerleri ve sınırlayıcı levha-çarpma levhası arası açıklığın  $H/D = 0.5, 1, 3, 6$  ve  $10$  değerleri için gerçekleştirilmiştir. Çarpma levhası üzerindeki sıcaklık değerleri, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda yerleştirilmiş termal kamera kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinden, çarpma levhası üzerindeki boyutsuz Nusselt dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış çarpma jet akış alanları için incelenmiştir.

### 3.1 Sınırlandırılmamış dairesel jet

Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhasının üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları lüle-levha açıklığının  $0.5, 1, 3, 6$  ve  $10$  değerleri için sırasıyla Şekil 4a-e’de verilmiştir.  $H/D=0.5$  açıklığında, Reynolds sayısının  $20000$  ve  $30000$  değerleri için çarpma levhasının üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 4a’da verilmiştir. Reynolds sayısının  $30000$  değerinde çarpma levhası yatay orta eksen boyunca elde edilen Nusselt değerleri Reynolds sayısının  $20000$  değeri için hesaplanan Nusselt değerlerinden daha büyük olmaktadır. Her iki Reynolds sayısı değerinde de yerel Nusselt sayıları çarpma levhası üzerindeki  $r/D \approx \pm 2$  konumunda durma bölgesindeki değerlerinden daha büyük değerler olarak ikincil pikler oluşturmaktadır. İkincil piklerden sonra Nusselt değerleri levha uçlarına doğru yeniden azalmaktadır. Durma noktasındaki ve ikincil piklerin olduğu konumdaki Nusselt değerleri arasındaki fark

Reynolds sayısının  $30000$  değerinde daha büyük olmaktadır. Lüle-levha arası açıklığın  $H/D=1$  değerinde iki farklı Reynolds sayısı için Şekil 4b’de verilen Nusselt dağılımlarında da, Şekil 4a’da  $H/D=0.5$  açıklık için verilen dağılımlara benzer şekilde çarpma levhası üzerindeki  $r/D \approx \pm 2.5$  konumunda durma noktasına göre daha güçlü olan ikincil pikler oluşmaktadır.  $H/D=3$  açıklığında, çarpma levhası üzerinde yatay orta eksen boyunca iki farklı Reynolds sayısı için elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 4c’te görülmektedir.  $Re=30000$ ’de çarpma levhası üzerindeki yerel Nusselt değerleri daha büyük olmaktadır. Çarpma levhası üzerinde  $r/D \approx \pm 3.5$  konumunda durma noktasına göre daha zayıf olan ikincil pikler oluşmaktadır.  $H/D=6$  açıklığında, Reynolds sayısının iki farklı değeri için Şekil 4d’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde herhangi bir ikincil artışın oluşmadığı görülmektedir. Şekil 4e’de lüle-levha arası açıklığın  $H/D=10$  değeri için verilen Nusselt dağılımları Şekil 4d’de  $H/D=6$  için verilen dağılımlara benzer şekilde durma noktasındaki en yüksek değerden levha uçlarına doğru dramatik olarak azalan bir görüntü oluşturmaktadır.

Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, Reynolds sayısının  $20000$  ve  $30000$  ve lüle-levha arası açıklığın  $0.5, 1, 3, 6$  ve  $10$  değerlerinde çarpma levhası yüzeyinde ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilen dağılımlar birlikte değerlendirildiğinde, her iki Reynolds sayısında da artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Düşük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \leq 1$ ), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler durma noktasında oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte etkisi azalan ikincil pikler, yüksek lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \geq 6$ ) kaybolmaktadır.



Şekil 4. Sınırlandırılmamış jet akışında farklı açıklıklar için Reynolds sayısı etkisi

### 3.2 Sınırlandırılmış dairesel jet

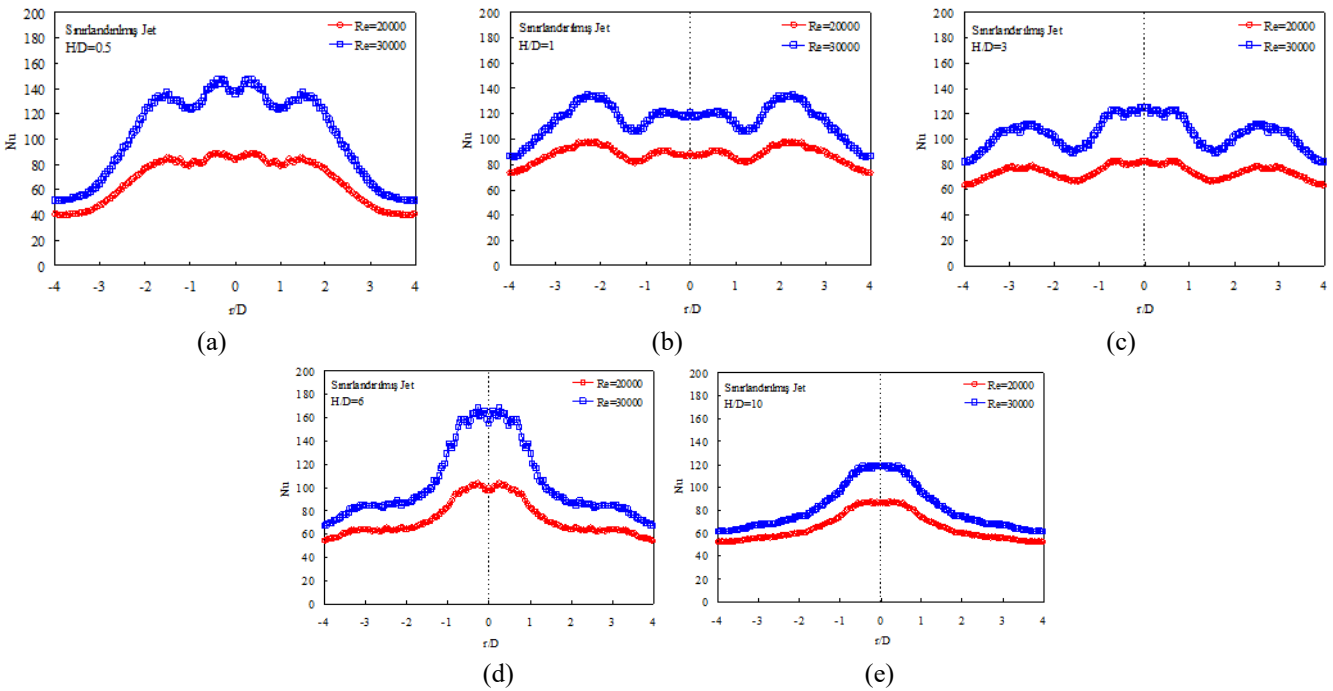
Düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet için, iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhasının yatay orta eksenini boyunca elde edilmiş Nusselt dağılımları levhalar arası açıklığın 0.5, 1, 3, 6 ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 5a-e’de verilmiştir. Levhalar arası açıklığın  $H/D=0.5$  değeri için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde çarpma levhası üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilmiş Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 5a’da, artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma levhası boyunca Nusselt değerlerinin arttığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısı değerinde de, çarpma levhası üzerinde lüle eksenini doğrultusundaki durma noktasının yakınında ( $r/D \approx \pm 0.5$ ) yerel Nusselt sayısı maksimum değer almaktadır. Durma noktasından itibaren  $r/D \approx \pm 1.5$  konumunda Nusselt dağılımlarında ikincil pikler oluşmaktadır. Durma noktası yakınındakilere göre daha zayıf olan ikincil pikler, Reynolds sayısı arttıkça belirginleşmektedir.  $H/D=1$  levhalar arası açıklık için Şekil 5b’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde  $r/D \approx \pm 2.5$  konumunda oluşan ikincil piklerin durma noktası civarındaki piklere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 5c’de, levhalar arası açıklığın  $H/D=3$  değeri için iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları görülmektedir. Çarpma levhası üzerinde  $r/D \approx \pm 3$  konumunda oluşan ikincil pikler durma bölgesinde oluşan piklere göre daha zayıf olmaktadır.  $H/D=6$  açıklığında, Reynolds sayısının iki farklı değeri için Şekil 5d’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde herhangi bir ikincil pikin oluşmadığı görülmektedir. Şekil 5e’de levhalar arası açıklığın  $H/D=10$  değeri için verilen Nusselt dağılımları Şekil 5d’de  $H/D=6$

için verilen dağılımlara benzer şekilde çarpma bölgesindeki en yüksek değerden levha uçlarına doğru olarak azalan bir görüntü oluşturmaktadır.

Düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet akışında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 ve levhalar-arası açıklığın 0.5, 1, 3, 6 ve 10 değerlerinde çarpma levhası yüzeyinde ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilen dağılımlar birlikte değerlendirildiğinde, her iki Reynolds sayısında da artan levhalar arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir.  $H/D \leq 3$  levhalar arası açıklıklarda oluşan ikincil piklerin konumu, açıklık arttıkça durma noktasından uzaklaşmaktadır. Yüksek levhalar arası açıklıklarda ikincil pikler ( $H/D \geq 6$ ) kaybolmaktadır.  $H/D=6$  açıklığında, Nusselt sayısı en yüksek değerini almaktadır. Bu durum, durma noktası yakınındaki türbülans seviyesinin  $H/D=6$  açıklığında en büyük olması nedeniyledir.

### 3.3 Sınırlayıcı levha etkisi

Reynolds sayısının 30000 değeri için çarpma levhası yatay orta eksenini boyunca elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde sınırlayıcı levha durumunun etkisi, lüle-levha açıklığının  $H/D=0.5, 1, 3, 6$  ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 6a-e’de verilmiştir. Lüle-levha arası açıklığın  $H/D=0.5$  değerinde, sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlandırılmış jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levhanın varlığı hem çarpma bölgesindeki piklerin hem de çarpma bölgesi uzağındaki ikincil piklerin etkisini azaltmaktadır. Sınırlayıcı levhanın olmadığı jet durumunda  $r/D \approx \pm 2$  konumunda oluşan ikincil pikler, sınırlayıcı levhanın olduğu jet durumunda  $r/D \approx \pm 1.5$  konumunda oluşmaktadır (Şekil 6a).



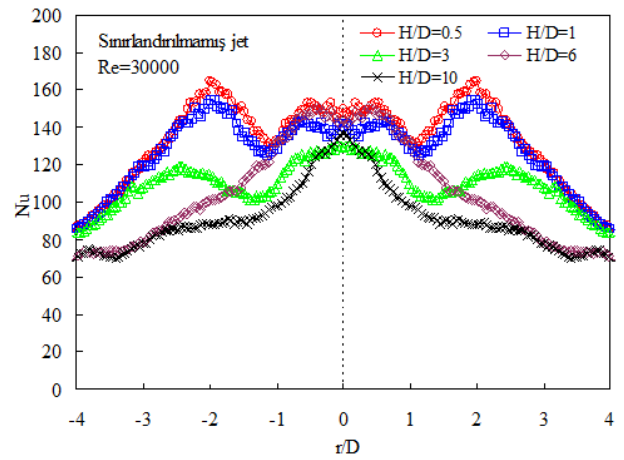
Şekil 5. Sınırlandırılmış jet akışında farklı açıklıklar için Reynolds sayısı etkisi

$H/D=1$  açıklıkta,  $H/D=0.5$ 'teki duruma benzer şekilde çarpma levhası üzerinde çarpma bölgesini de içine alacak şekilde ikincil piklerin olduğu konuma kadar ki bölgede Nusselt değerleri sınırlandırılmamış jet durumunda daha büyük olmaktadır. Levha uçlarına doğru uzanan bölgelerde ise sınırlayıcı levhanın etkisi kaybolmaktadır (Şekil 6b). Lüle-levha arası açıklığın  $H/D=3$ ,  $H/D=6$  ve  $H/D=10$  değerlerinde, sınırlandırılmamış jet ve sınırlandırılmış jet durumlarına için çarpma levhası üzerinde elde edilmiş Nusselt dağılımları arasında belirgin bir fark oluşmamaktadır (Şekil 6c-e). Sınırlayıcı levhanın varlığı, küçük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \leq 1$ ), çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltıcı bir etki gösterirken, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \geq 3$ ), bu etki ortadan kalkmaktadır. Behnia ve diğ. [17], çarpan dairesel jet akışında, sınırlandırmanın küçük lüle-levha arası açıklıklarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azalttığını, artan lüle-levha arası açıklıkla bu etkinin kaybolduğunu belirtmişlerdir. Colucci ve Viskanta [9], sınırlandırılmamış jet durumundaki ısı transfer performansının sınırlandırılmış jete göre %20-30 oranında daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

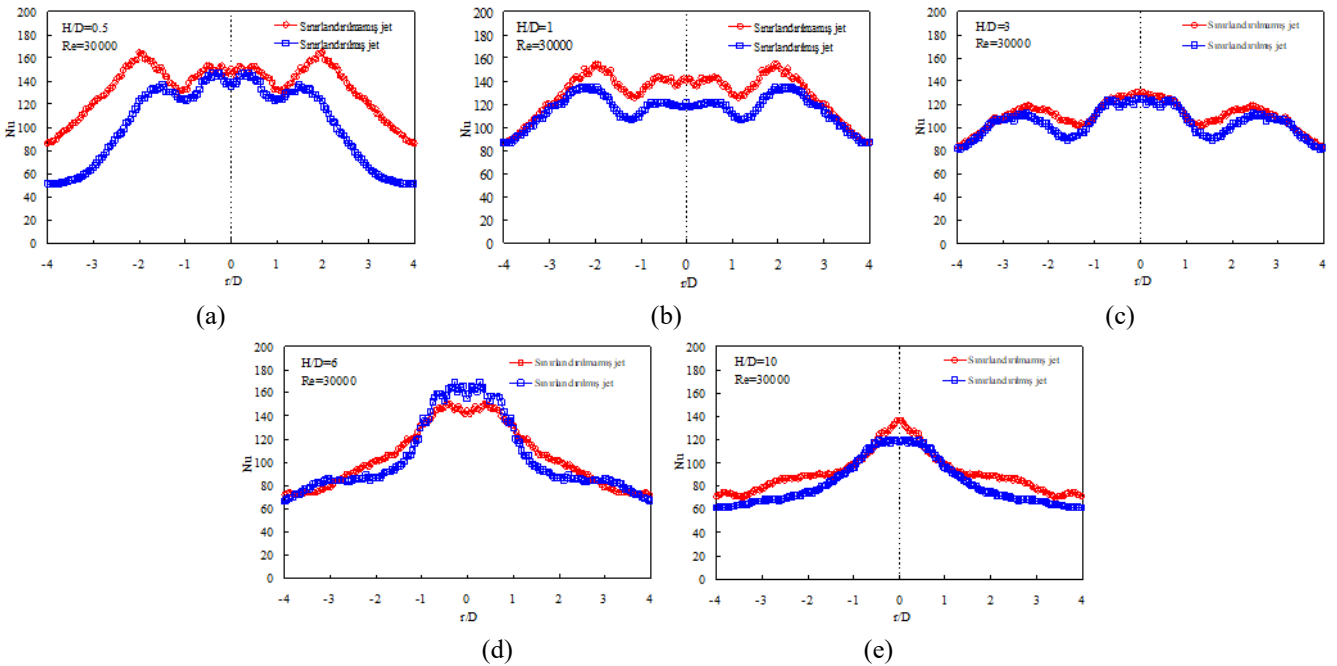
### 3.4 Levhalar arası açıklık etkisi

Reynolds sayısının 30000 değeri için çarpma levhası yatay orta eksenini boyunca  $H/D=0.5, 1, 3, 6$  ve  $10$  açıklıklarında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde levhalar arası açıklık etkisi, sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet durumları için sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Sınırlandırılmamış jet durumunda, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerleri azalmaktadır. Küçük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \leq 1$ ), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler çarpma

bölgesinde oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte daha büyük  $\pm r/D$  konumlarına kayan ve etkisi azalan ikincil pikler, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \geq 6$ ) kaybolmaktadır (Şekil 7). Baughn ve Shimizu [5], sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transfer katsayıları azaldığını belirtmişlerdir. Lytle ve Webb [8], sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, küçük lüle-levha açıklıklarında ( $H/D < 1$ ), durma noktası dışında ısı transferinde ikincil artışların oluştuğunu ve bu artışların, durma noktasından itibaren yönlenerak duvar boyunca sınır tabaka oluşturan jet akışının laminardan türbülansa geçişi ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir.

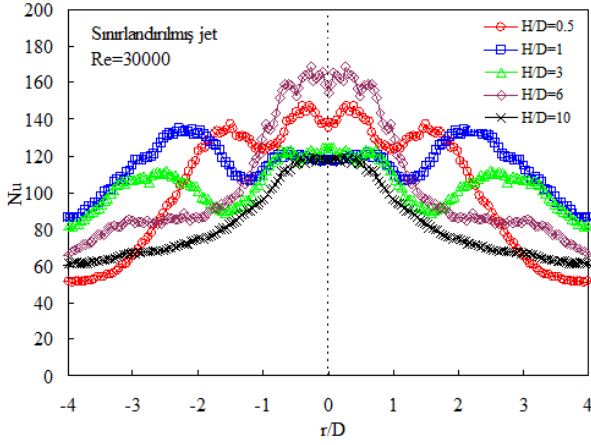


Şekil 7.  $Re=30000$  için sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 6. Sınırlayıcı levha etkisi

Düz sınırlayıcı levha ile sınırlandırılmış jet durumunda, sınırlandırılmamış jet durumuna benzer şekilde, artan levhalar arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt sayısı değerleri azalmaktadır.  $H/D \leq 3$  levhalar arası açıklıklarda oluşan ikincil piklerin konumu, açıklık arttıkça durma noktasından uzaklaşmaktadır. Yüksek levhalar arası açıklıklarda ikincil pikler ( $H/D \geq 6$ ) kaybolmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8.  $Re=30000$  için sınırlandırılmış jet durumunda çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Hem sınırlandırılmamış hem de sınırlandırılmış çarpma dairesel jetlerde, küçük lüle-levha/levhalar arası açıklıklarında/açıklıklarda ( $H/D \leq 3$ ), duvar jeti bölgesinde

akışın laminardan türbülansa geçmesi ve duvar yakınında türbülans seviyesinin artması nedeniyle Nusselt sayılarında ikincil pikler ortaya çıkmaktadır. Yüksek lüle-levha/levhalar arası açıklıklarında/açıklıklarda ( $H/D \geq 6$ ) ise jet akışının gelişimini tamamlaması ve momentumunun azalması nedeniyle ikincil pikler kaybolmaktadır.

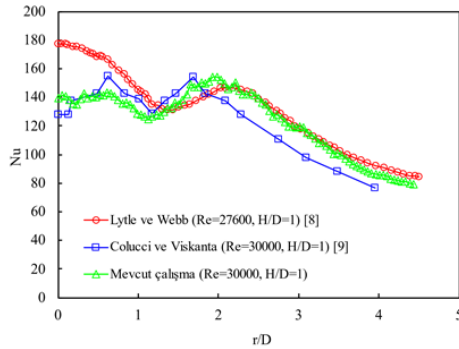
### 3.5 Literatür ile karşılaştırma

Mevcut çalışmada, sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, çarpma levhası yüzeyinde farklı Reynolds sayılarında ve lüle-levha arası açıklıklarda termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinden elde edilen Nusselt dağılımlarının, literatürde bulunan benzer deneysel dağılımlarla [7, 8, 9, 10, 22, 23] karşılaştırması lüle-levha arası açıklığın  $H/D=1, 3, 6$  ve  $10$  değerleri için sırasıyla Şekil 9a-d'de verilmiştir. Dört lüle-levha arası açıklık durumunda da, mevcut çalışmaya ait sonuçların, literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür

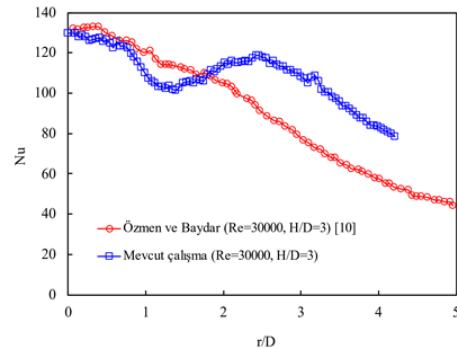
## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çarpma dairesel jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları, çarpma levhası orta eksenini boyunca elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır.

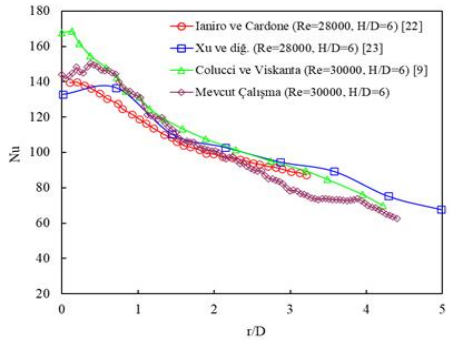
Çalışmadan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:



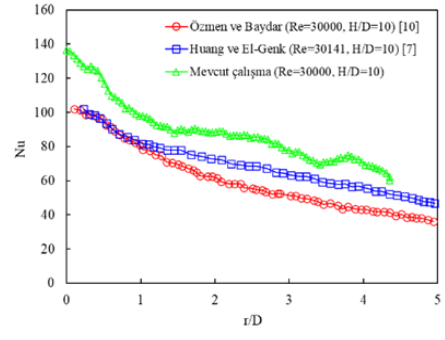
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 9. Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında,  $H/D=1, 3, 6$  ve  $10$  için Nusselt dağılımlarının literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırması



1. Sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile ve azalan lüle-levha arası açıklıkla artmaktadır. Küçük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \leq 1$ ), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler durma noktasında oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte etkisi azalan ikincil pikler, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ( $H/D \geq 6$ ) kaybolmaktadır.

2. Sınırlandırılmamış dairesel çarpan jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levha, küçük levhalar arası açıklıklarda ( $H/D \leq 1$ ), çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltıcı bir etki göstermekte, büyük levhalar arası açıklıklarda ( $H/D \geq 3$ ) ise, bu etki ortadan kalkmaktadır.

3. Sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil piklerin konumu, sınırlandırılmamış jet durumuna göre çarpma levhası uçlarına doğru kaymaktadır.

4. Çarpan dairesel jet akışında, çalışma kapsamında çarpma levhası üzerinde termal kamera ile ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları, literatürde mevcut deneysel dağılımlarla oldukça uyumludur.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 16

#### Kaynaklar

- [1] C. J. Danek, Heat transfer under impinging jets at very close jet-to-target spacings. PhD Thesis, Stanford University, Ann Arbor, USA, 1995.
- [2] H. Schrader, Trocknung feuchter oberflächen mittels warmluftstrahlen. VDI Forschungsheft Ausgabe, 484, B 27, 1961.
- [3] C. M. Ho, Local and global dynamics of free shear layers. Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows, 521-533, 1982. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-12610-3\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-662-12610-3_30).
- [4] R. J. Goldstein, K.A. Sobolik, and W.S. Seol, Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface. Journal of Heat Transfer, 112(3), 608-611, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2910430>.
- [5] J. W. Baughn and S. Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, Journal of Heat Transfer, 111(4), 1096-1098, 1989. <https://doi.org/10.1115/1.3250776>.
- [6] A. K. Mohanty and A.A. Tawfek, Heat transfer due to a round jet impinging normal to a flat surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 36(6), 1639-1647, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(05\)80073-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(05)80073-0).
- [7] L. Huang and M.S. El-Genk, Heat transfer of an impinging jet on a flat surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(13), 1915-1923, 1994. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90331-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90331-X).
- [8] D. Lytle and B.W. Webb, Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(12), 1687-1697, 1994. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90059-0).
- [9] D. W. Colucci and R. Viskanta, Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. Experimental Thermal and Fluid Science, 13(1), 71-80, 1996. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(96\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0894-1777(96)00015-5).
- [10] Y. Ozmen and E. Baydar, Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. Heat and Mass Transfer, 44(11), 1315-1322, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0378-4>.
- [11] R. Herrero and J.M. Buchlin, Effect of nozzle shape on local heat transfer distribution in impinging jets. 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Quebec, Canada, 27-30 July 2010. <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2010.054>
- [12] T. T. Chandratilleke, R. Narayanaswamy and D. Jagannatha, Thermal performance evaluation of a synthetic jet heat sink for electronic cooling. IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, pp. 79-83, 2011. <https://10.1109/EPTC.2011.6184390>.
- [13] X. Ai, Z.G. Xu and C.Y. Zhao, Experimental study on heat transfer of jet impingement with a moving nozzle. Applied Thermal Engineering, c. 115, pp. 682-691, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.004>.
- [14] M. Gradeck, A. Kouachi, A. Dani, D. Arnoult and J.L. Boréan, Experimental and numerical study of the hydraulic jump of an impinging jet on a moving surface. Experimental Thermal and Fluid Science, c. 30, 193-201, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.05.006>.
- [15] M. K. Sevindir, Çarpma Akış İçerisinde Sıcak Jet Akışının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [16] J. M. Miranda and J.B.L.M. Campos, Impinging jets confined by a conical wall: Laminar flow predictions. AIChE Journal of Fluid Mechanics and Transport Phenomena, c. 45, 2273-2285, 1999. <https://doi.org/10.1002/aic.690451103>.
- [17] M. Behnia, S. Parneix, Y. Shabany and P.A. Durbin, Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets. International Journal of Heat and Fluid Flow, c. 20, 1-9, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(98\)10040-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)10040-1).
- [18] L. Huang, Heat transfer and flow visualization of conventional and swirling impinging jets. PhD Thesis, New Mexico University, Albuquerque, New Mexico, 1996.
- [19] T. L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera and D.P. Dewitt, Introduction to Heat Transfer. Wiley, Sixth Edition. New Jersey, ABD, 2011.

- [20] S. W. Churchill and H.H.S. Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329, 1975. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4).
- [21] S. Kline and F. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, 75, 3-8, 1953.
- [22] A. Ianiro and G. Cardone, Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89-98, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.018>.
- [23] L. Xu, T. Yang, Y. Sun, L. Xi, J. Gao, Y. Li and J. Li, Flow and heat transfer characteristics of a swirling impinging jet issuing from a threaded nozzle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100970>.

