

45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi

Haluk KELEŞ^{1,a}, Yücel ÖZMEN^{2,b}

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon

^aORCID: 0000-0002-6562-8902; ^bORCID: 0000-0003-1127-1060

Makale Bilgileri

Geliş : 10.05.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605970

Sorumlu Yazar

Haluk KELEŞ

hkeles@artvin.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Çarpan dizi jet

Eğimli ikincil jet

Sınırlandırılmamış jet

Sınırlandırılmış jet

Nusselt sayısı dağılımı

Atf şekli: KELEŞ, H., ÖZMEN, Y., (2024). 45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 923-937.

ÖZ

Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklığın 0,5, 1, 3 ve 6 değerleri için çarpma levhasının orta eksenini boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha/levhalar arası açıklığın ve sınırlayıcı levha varlığının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Hem sınırlandırılmamış hem de sınırlandırılmış durumda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan lüle-levha/levhalar arası açıklıkla azalmaktadır. Çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini doğrultusundaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında yerel Nusselt sayısı pik değerler almaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası üzerinde oluşturdukları piklerin konumları artan lüle-levha/levhalar arası açıklık ile daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır. Akış alanlarında sınırlayıcı levhanın varlığı, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltmaktadır.

Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics in Unconfined and Confined Impinging Jet Arrays with 45° Inclined Secondary Jets

Article Info

Received : 10.05.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605970

Corresponding Author

Haluk KELEŞ

hkeles@artvin.edu.tr

Keywords

Impinging jet array

Inclined secondary jet

Unconfined jet

Confined jet

Nusselt number distribution

How to cite: KELEŞ, H., ÖZMEN, Y., (2024). 45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 923-937.

ABSTRACT

In this study, the heat transfer effects at the impingement surface in unconfined and confined impinging array jet flows with 45° inclined secondary jets are experimentally investigated. In the unconfined and confined jet flow fields, temperature distributions were obtained with a thermal camera along the center axis of the impingement plate for 20000 and 30000 values of the Reynolds number and 0,5, 1, 3 and 6 values of the nozzle-to-plate/inter-plate spacing. From the obtained temperature distributions, the effect of Reynolds number, nozzle-to-plate/inter-plate spacing and the presence of a confinement plate on the Nusselt distributions on the impingement plate were investigated. In both unconfined and confined cases, the Nusselt values on the impingement plate increase with increasing Reynolds number and decrease with increasing nozzle-to-plate/inter-plate spacing. At the stagnation point on the impingement plate in the direction of the axis of the primary nozzle and at the position of the impingement plate in the direction of the axes of the secondary jets, the local Nusselt number takes peak values. The peaks on the impingement plate become sharper as the Reynolds number increases. The positions of the peaks formed by the secondary jets on the impingement plate shift to larger $\pm r/D$ values with increasing nozzle-to-plate/inter-plate spacing. The presence of a confinement plate in the flow fields reduces the Nusselt values on the impingement plate.

1. GİRİŞ

Çarpan jet akışları, ısıtma ve soğutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik devrelerde bulunan transistörler ve çipler gibi yoğun ısı üretimi olan parçaların ve gaz türbinlerinin soğutulması, uçak gibi çeşitli hava araçlarının yüzeylerinde oluşan buzlanmanın giderilmesi ve tekstil, kağıt ve gıda endüstrisine yönelik uygulamalar gibi birçok alanda jet akışlarından yararlanılmaktadır. Literatürde çarpan tekli jetler konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur. Çarpan tekli jet akışı ile bir yüzeyin soğutması uygulamalarında, yüzeyden transfer edilen ısı miktarının yüzey boyunca azalarak farklı sıcaklık bölgelerinin oluşması nedeniyle homojen bir yüzey soğutması yapılamamaktadır. Transistör, çip ve benzeri elektronik elemanların çalışma karakteristikleri, yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerinden ciddi oranda etkilenmektedir. Elektronik elemanların, istenen performansta görevlerini yerine getirmeleri, yüzeylerindeki sıcaklık artışı önleyecek etkin ve yüzeylerin tamamına yansiyacak homojen bir soğutma ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle çarpan çoklu jetler konusunda yapılan yeni çalışmalarla çarpma yüzeyinde homojen bir soğutma etkisi oluşturmak amaçlanmaktadır. Son yıllarda, çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutma sağlamak ve yüzey boyunca ısıl kararlılık elde etmek amacıyla birden çok jetin bir yüzeye çarptırıldığı çalışmalar artmaktadır. Literatürde çarpan çoklu jetlere yönelik çalışmaların büyük bir kısmında akış laminer özelliktedir. Türbülanslı çarpan çoklu jetlerle ilgili çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu konudaki çalışmalar daha çok sayısal incelemeler şeklindedir. Tanaka [1], iki boyutlu türbülanslı çarpan ikili jet akışında jetler arasında bir ortam altı basınç bölgesinin oluştuğunu belirtmiştir. Siclari ve arkadaşları [2], çarpan ikili jetleri deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında çarpma bölgelerine odaklanmışlardır. Jetler arası mesafedeki azalmanın ikili jetlerdeki ortalama Nusselt sayılarını artırdığı Mikhail ve arkadaşları [3], tarafından açıklanmıştır. Saad ve arkadaşları [4], sınırlanmış tekli ve çoklu çarpan slot jet akışlarında, akış yapısı ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Lüleler arası açıklık oranının 1,5 ve üzerindeki değerlerinde çoklu jetlerin tekli jet karakteristiği sergilediğini belirtmişlerdir. Barata [5], düz bir yüzeye çarpan ikili jette oluşan akış alanını lazer doppler ölçümleri ile incelediği çalışmada, jetlerin etrafında karmaşık girdapların oluştuğunu belirtmiştir. Rady ve Arquis [6], sınırlanmış çarpan çoklu slot jetlerde sınırları levha üzerine yerleştirdikleri kanatçıkların çarpma levhası boyunca ısı transferi performansı üzerine etkisini farklı lüle-levha arası açıklık, jet lüleleri arasındaki uzaklık ve Reynolds sayıları için, deneysel bir çalışma gerçekleştirerek incelemişlerdir. Kanatçıkların karşılık geldiği bölgelerde ısı transferinde iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir. Dong ve arkadaşları [7], yatay bir yüzeye çarpan ikili laminer hava alevi jetinde ısı transferi karakteristiklerini ve yüzey basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemiştir. Abdel-Fattah [8], çarpan ikiz dairesel jet akışında, çarpma yüzeyinde bir subatmosferik basınç bölgesinin meydana geldiğini ve lüle ile levha arası açıklığın artmasıyla subatmosferik basınç bölgesinin etkisinin azaldığını belirtmiştir. Özmen [9], düzgün bir yüzeye dik bir şekilde çarpan sınırlanmış ikiz hava jetinde akış alanlarının yapılarını deneysel olarak inceleyerek, çarpma ve sınırlayıcı yüzeylerde oluşan subatmosferik bölgelerini belirlemiş ve bu yüzeyler üzerindeki basınç dağılımlarının lüle ve levha arası açıklık değerleri ve lüleler arası mesafe değerlerinden ciddi oranda etkilendiğini saptamıştır. Koched ve arkadaşları [10], çarpan çoklu slot jet akışında duvar jeti bölgesindeki girdap yapılarını incelemişlerdir. Bir jet dizisinin eğimli yüzeylere çarptığı bir akış düzeninde, hedef çarpma yüzeyi üzerindeki ısı transferi karakter ve performansını gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışma ile inceleyen Al Mubarek ve arkadaşları [11], ortalama yerel Nusselt sayısı dağılımlarının Reynolds sayısındaki artış ile birlikte doğru orantılı bir şekilde artış profili sergilediğini belirtmişlerdir. Buchlin [12], çarpan dizi jet akışını incelediği çalışmada, lüle-levha arası ve lüleler arası açıklıkların jet karakteristikleri üzerinde doğrudan etkisi olduğunu belirtmiştir. Attalla ve Specht [13], düz bir yüzeye çarpan çoklu jet sisteminde çarpma yüzeyindeki taşınım ile ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çoklu jet uygulamasının, tekli jete göre yerel ve ortalama ısı transferini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Maddox ve arkadaşları [14], eğimli levhalarla sınırlanmış çarpan çoklu su jetinde ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı sınırlayıcı levha eğim açılarının incelendiği çalışmada en etkili soğutma performansının 5° eğimli sınırlayıcı levha durumunda olduğunu belirtmişlerdir. Polat ve arkadaşları [15], çarpan jet akışlarındaki ısı transferi üzerine hem deneysel hem de sayısal çalışmalardan oluşan kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda kullanılan türbülans modellerinden düşük Reynolds sayılı k-ε türbülans modellerinin Standard k-ε türbülans modeline göre durma noktasındaki ısı transferini daha doğru tahmin ettiğini vurgulamışlardır. Özmen ve İpek [16], çoklu slot jetlerin düz bir yüzeye çarpması ile oluşan jet akışında akış karakteristikleri ve ısı transferi performansını hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmışlardır. Hedef çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşan ortam altı basınç bölgeleri ile Nusselt sayısı dağılımlarındaki ikincil pikler arasında önemli

bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir. Çalışkan ve arkadaşları [17], jet geometrisinin akış ve ısı aktarım özellikleri üzerindeki etkisini, eliptik ve dikdörtgen çarpan jet dizileri için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Eliptik jetlerin, dikdörtgen jetlerden daha yüksek ısı transfer katsayısına ulaştığını ifade etmişlerdir. Tepe [18], sınırlandırılmış çarpan dairesel çoklu jet akışında, lüle çıkış konumlarının sınırlandırıcı levhadan uzaklaştırılarak akış doğrultusunda ilerletilmesi ile sağlanan akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve sayısal bir çalışma da gerçekleştirerek incelemiştir. Sıvı kristal tekniği ve ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda, jet çıkış konumunun çarpma levhasına yaklaşmasının ısı transfer oranını artırdığı belirtilmiştir.

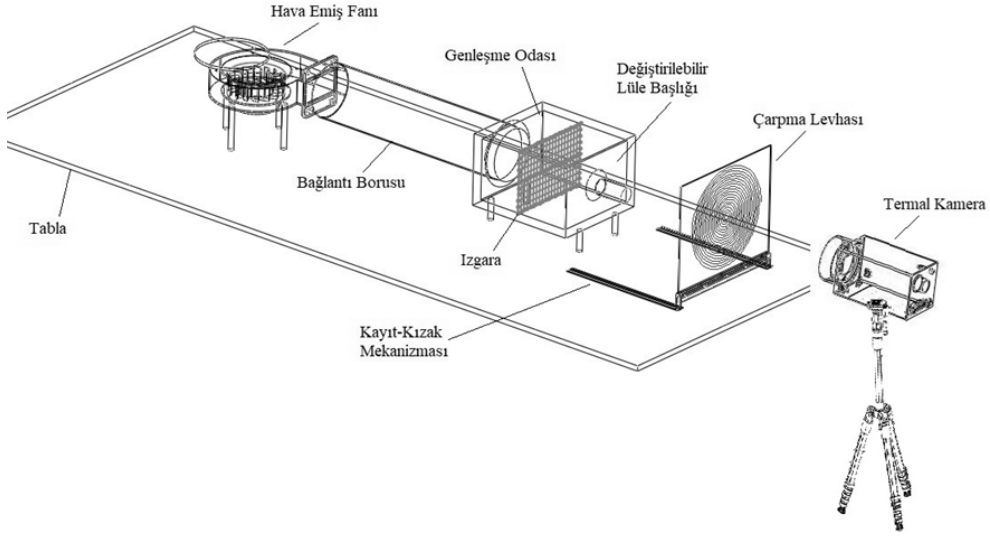
San ve Chen [19] ısıtılmış bir yüzeye çarpan ve beş dairesel hava jetinden oluşan bir dizi jet akışını incelemişlerdir. Reynolds sayısının 20000 değeri için, jetler arası açıklık, jet çapı ve lüle-levha arası açıklığın ısı transferi karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte jetler arası etkileşimin azaldığını belirtmişlerdir. Guoneng ve arkadaşları [20], düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler ile plaka arasındaki açıklık arttığında, ısı transferi performansında keskin bir düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Godi ve arkadaşları [21] düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler arasındaki açıklık arttıkça, jetlerin birbirleri üzerindeki etkilerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Talapati ve arkadaşları [22] jet eğim açısının yerel ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Jet eğim açısının azalmasıyla birlikte Nusselt dağılımındaki asimetrinin arttığını ifade etmişlerdir. Yalçinkaya ve arkadaşları [23], kanatçık kullanarak pürüzlendirilmiş kavisli bir yüzeye çarpan dizi jet akışında, farklı kanatçık düzenlemelerinin konvektif ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kanatçık kullanımının yerel ve alan ortalamalı Nusselt sayılarında önemli artışlara yol açtığını ortaya koymuşlardır. Baz ve arkadaşları [24], dikdörtgen bir kanala monte edilmiş ayrıntılı ısı kaynaklarının farklı eğim açılara sahip ikili hava jetleri kullanılarak soğutulmasına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında, en yüksek ortalama Nusselt değerinin jet eğim açısının 10° olduğu durumda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Elektronik elemanların, istenen performansta görevlerini yerine getirmeleri, yüzeylerindeki sıcaklık artışını önleyecek etkin ve yüzeylerin tamamına yansıtacak homojen bir soğutma ile mümkün olmaktadır. Bu durum, çarpan jetlerle çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmaya amaçlayan yeni çalışmalara olan ihtiyacı göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmada; çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmaya gerçekleştirmek için, sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış açılı dizi jet uygulamalarıyla ısı transferinin iyileştirilmesi ve yüzey boyunca homojen bir ısı transferinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç için, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklığın 0,5, 1, 3 ve 6 değerleri için çarpma levhasının orta eksenli boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha/levhalar arası açıklığın ve sınırlayıcı levha varlığının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada eğimli ikincil jetlerin kullanılması çalışmanın yenilikçi yönünü ve özgünlüğünü oluşturmaktadır.

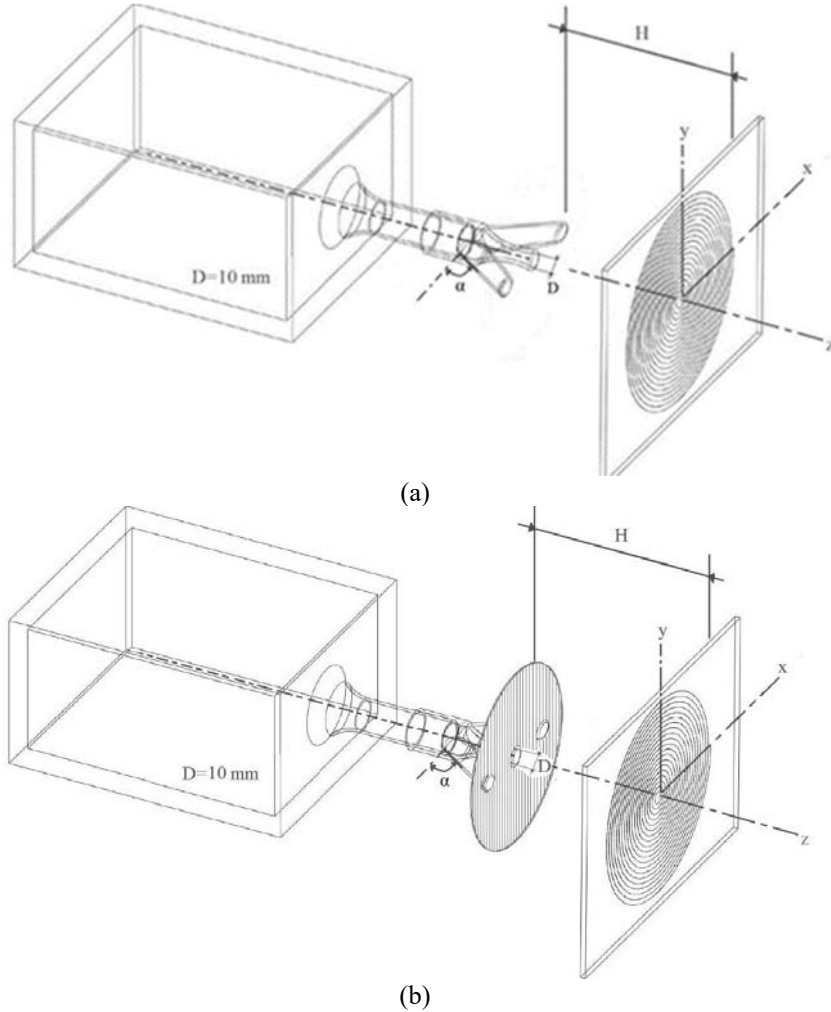
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında çarpma levhası üzeri boyunca ısı transferi etkilerinin incelenmesi gayesiyle yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği tasarlanmıştır. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen deneysel düzenekte, bir emiş fanı tarafından çekilen çevre ortamın havası yatay bir bağlantı borusu aracılığıyla genişleme odasına yönlendirilmektedir. Genişleme odası çıkışına yerleştirilmiş değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklenti ile elde edilen eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış alanında, lülelerden çıkan yatay hava jetleri, Joule etkisi ile önceden ısıtılan hedef çarpma levhasına çarptırılmaktadır. Düşey konumda bulunan ısıtıcı çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizması ile yatay doğrultuda hareket kabiliyetini kazanmıştır. Bu mekanizma ile lüle ve levha arası mesafe istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Fan girişindeki kapak açıklığı ile farklı akış debileri ayarlanabilmektedir. Yüzey sıcaklık dağılımlarının ölçümü, PCB levhanın arka tarafında, levha yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış bir tripod üzerine kurulu termal kamera ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çarpan jet dizisi akış düzeneğinin şematik görüntüsü

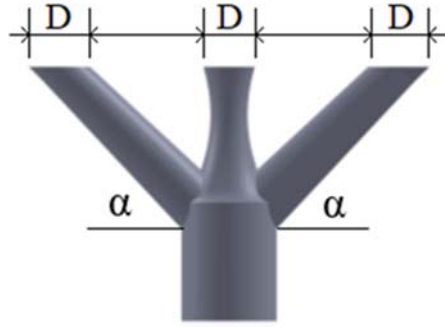
Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğindeki değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklentilerle ile oluşturulmuş eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış sistemleri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Eğimli ikincil jetlere sahip çarpan dizi jet akış sistemleri
(a) Sınırlandırılmamış jet (b) Sınırlandırılmış jet

$\alpha=45^\circ$ eğim açısına sahip ikincil jetlerle birlikte özdeş üç lüleden oluşan çarpan dizi jet akışlarında lüle çapları $D=10$ mm olarak gerçekleştirilmiştir. Lülelerden çıkan hava jetleri, sınırlandırıcı levha uçlarından belirli bir H değeri kadar açıklıkta konumlandırılan ve birincil jet eksenine dik doğrultuda yerleştirilmiş önceden Joule etkisi ile ısıtılmış düz levhalara çarpmaktadır. Kalınlığı 1,5 mm olan hedef çarpma levhasının dairesel ısıtıcı yüzeyinde, tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanması maksadıyla baskılı devre kartı (PCB) tekniği ile 1 mm genişliğinde ve 40 μ m kalınlığında bakır şeritlerle dairesel bir elektrik devresi oluşturulmuştur. $300 \times 400 \text{ mm}^2$ dikdörtgen yüzey alanına sahip levhada, dairesel jet akışı ile uyumluluk dikkate alınarak 180mm'lik çapta dairesel form ısıtıcı yüzeyi oluşturulmuştur. Bu ısıtıcı çarpma levhasının arka yüzeyi mat siyah renge spreyci boya ile boyanmıştır. Yatay eksenli jet düzeneğindeki hedef PCB çarpma levhası üzerine ayarlanabilir varyak kullanılarak 20,3 volt ve 2,01 amper elektrik akımı uygulanmış ve $1603,5 \text{ W/m}^2$ düzeyinde sabit ısı akışı oluşturulmuştur.

Deney düzeneğinde bulunan $D=20$ mm çapındaki değiştirilebilir lüle başlığına takılan ve eğimli ikincil jetlere sahip çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dizi jet akış alanlarını oluşturan eklenti Şekil 3'te görülmektedir. Üç boyutlu yazıcıda üretilen dizi jet eklentisi, $\alpha = 45^\circ$ eğimli ikincil lülelerle birlikte çapları birbirine eşit ve $D=10$ mm olan üç dairesel kesitli lüleden oluşmaktadır. Pitot tüpü ile ölçülen ve özdeş üç lüle için aynı olan çıkış hızları Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için sırasıyla 31 m/s ve 46,5 m/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Dizi jet eklentisinin şematik görünümü

Çarpan dizi jet akışı durumlarında, hedef levhaya çarpan ortam hava sıcaklığındaki jetin, levhadan gerçekleşen ısı transferi, önceden ısıtılan levhanın arka yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış olan termal kamera ile sıcaklık dağılımı ölçümleri şeklinde yapılarak incelenmiştir. -40°C ila $+500^\circ\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilen, $0,08^\circ\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine ve QVGA (320×240) çözünürlüğe sahip FLIR A20 marka termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermoCAM yazılımı kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Çarpma levhasının her iki yüzeyine yerleştirilen T tipi termoelemanlar ile termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulaması yapılmıştır. Termoelemanla ölçülen levhanın gerçek sıcaklığı ve bilgisayarda okunan levha sıcaklığı arasındaki karşılaştırmayla, termal kameranın kalibrasyon eğrisi çıkarılmış, ölçüm sonuçları doğrulanmıştır. Bu yöntem ile çarpma yüzeyindeki sıcaklığın arka yüzeye eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Çarpma yüzeyine yerleştirilen termoeleman tarafından ölçülen sıcaklık değeri, aynı nokta için termal kamera tarafından ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılarak yüzeyin emisivite değeri (ϵ) 0,98 olarak belirlenmiştir. Çarpma levhası yüzeyindeki sıcaklık değerleri, yerel sıcaklıkların zaman içinde değişmediği ve akışın sürekli bir duruma ulaştığı süre boyunca kaydedilmiştir.

Çarpan jet akışlarında Reynolds sayısı, lüle çıkışındaki akış hızına ve lüle çapına göre belirlenmektedir. U_o , özdeş lüleler çıkışındaki hava jeti hızını ifade etmekte olup, bununla ilişkilendirilen Reynolds sayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır (Eşitlik 1 ve Eşitlik 2).

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

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

Denklemlerde, basınç farkı ΔP , akışkan yoğunluğu ρ , dinamik viskozite μ ile gösterilmekte olup, lüle çapı ise D , ile ifade edilmiştir.

Isı transferi etkileri, çarpma jet akışlarında çarpma levhaları üzerindeki ısı taşınım katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) denklemleri ile araştırılır (Eşitlik 3 ve Eşitlik 4).

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

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

Burada taşınım ile ısı miktarı $Q_{\text{taşınım}}$, levhanın ısıtıcı yüzey alanı A_w , levhanın jete maruz kalan tarafındaki yüzey sıcaklığı T_w , ve jet çıkış sıcaklığı ise T_j ile ifade edilmektedir. Nusselt denkleminde, havanın ısı iletim katsayısı k ile tanımlanmıştır. Joule etkisi ile üretilen toplam ısı akısı q''_{toplam} 'dan ısı kayıplarının çıkarılması ile $q''_{\text{taşınım}}$ hesaplanmıştır. Enerji dengesi ile çarpma levhası yüzeyinden olan ısı transferi (Eşitlik 5),

$$q''_{\text{taşınım}} = q''_{\text{toplam}} - q''_{\text{iletim}} - q''_{\text{ışınım}} - q''_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. İfadeye göre, burada q''_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q''_{iletim} , $q''_{\text{ışınım}}$ ve $q''_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırası ile çarpma yüzeyinden iletimle, ışımla ve doğal taşınım ile kaybedilen ısıyı temsil eder. Epoksi levhaya uygulanan toplam güç, ayarlı varyak tarafından sağlanan gerilim ve levha direnç değerleri kullanılarak hesaplanır ve aşağıdaki Eşitlik 6 ile ifade edilir.

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

Isıl kayıplar, levhanın jet tarafından etkilenmeyen yüzeyi boyunca ışımla, iletim ve doğal taşınım etkilerine bağlıdır. Çarpma levhası üzerindeki radyal yönde iletim ile oluşan ısı transferi, radyal yönde mesafenin fazla olması ve sıcaklık gradyanının az olması sebebiyle dikkate alınmamıştır. Levhanın jete maruz kalan tarafındaki ışımla kayıpları ise bakırın düşük emisivite değeri sebebiyle ihmal edilmiştir. Işımla, iletim ve doğal taşınım nedeniyle oluşan toplam kayıplar ısı akısının %2-8'i düzeyinde olmaktadır [25]. Çarpma levhasının arka yüzeyi ile çevre ortamı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ışımla yoluyla ısı transferi, aşağıda verilen Stefan-Boltzmann denklemi [26] kullanılarak hesabı gerçekleştirilmiştir (Eşitlik 7).

$$q''_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_w \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (7)$$

Çarpma levhasının emisivite değeri ε ile gösterilmektedir. Stefan-Boltzmann sabiti ise $\sigma=5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] değerindedir.

Düşey olarak konumlandırılmış çarpma levhası üzerinden doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, Churchill ve Chu [27] tarafından sunulan Eşitlik 8'deki ampirik bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (8)$$

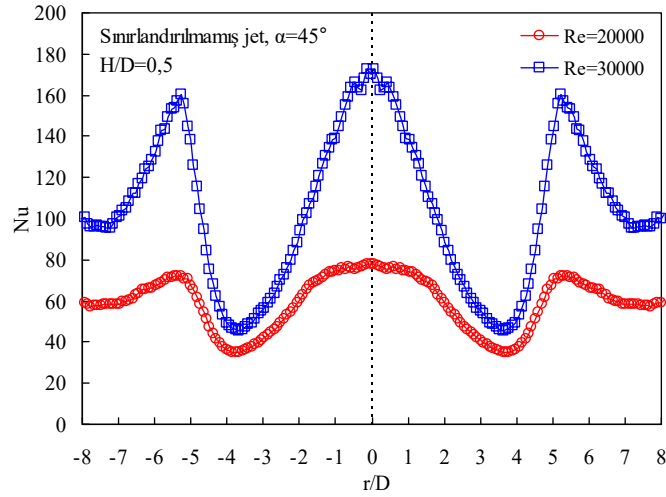
Bu denklemlerde, Rayleigh sayısını Ra ve Prandtl sayısı ise Pr ile ifade edilmiştir. Verilen bu denklemleri kullanarak, dizi jet düzeneğinde gerçekleşen ısı kayıplarından doğal taşınım ve ışımla kayıpları, toplam ısı miktarının sırasıyla % 3'ü ve % 4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar ise, toplam ısı akısının % 7'si değerinde olmaktadır.

Ölçümler, Kline ve McClintock [28] tarafından tavsiye edilen denklem ve hesap yöntemleri kullanılarak belirsizlik analizine tabi tutulmuştur. İncelenen Reynolds sayısı için hesaplanan belirsizlik oranı \pm % 2,61 iken, Nusselt sayısı için \pm % 2,87 seviyesindedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

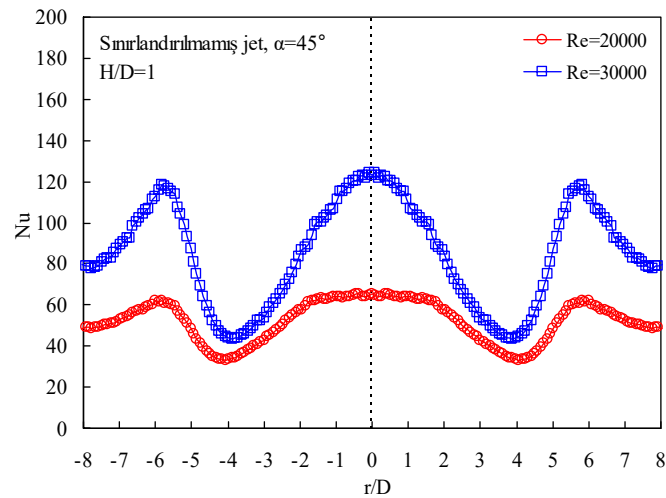
Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpma dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için çarpma levhasının orta eksenli boyunca termal kamera ile

sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu dağılımlarından, Reynolds sayısı ve lüle-levha/levhalar arası açıklık değerlerinin yanı sıra sınırlandırıcı levha varlığının çarpma levhası boyunca Nusselt sayısı dağılımları üzerine etkisi araştırılmıştır. Çarpma levhasına dik doğrultudaki birincil jetin her iki tarafında birincil jet çıkış düzlemine göre 45° eğimli olarak konumlanan ikincil jetlerle oluşturulan sınırlandırılmamış dizi jet akışında, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca iki farklı Reynolds sayısı için elde edilen Nusselt sayısı dağılımları lüle levha arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 4-7'de verilmiştir. Lüle ile levha arasındaki açıklık değerinin $H/D=0,5$ olduğu durumda, her iki Reynolds sayısında çarpma levhası yüzeyi boyunca yatay bir orta eksende ölçülen sıcaklık değerlerinden hesaplanan Nusselt sayısı dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Çarpma levhası boyunca elde edilen Nusselt değerlerinin, Reynolds sayısının 30000 olduğu durumda daha büyük olduğu gözlenmektedir.



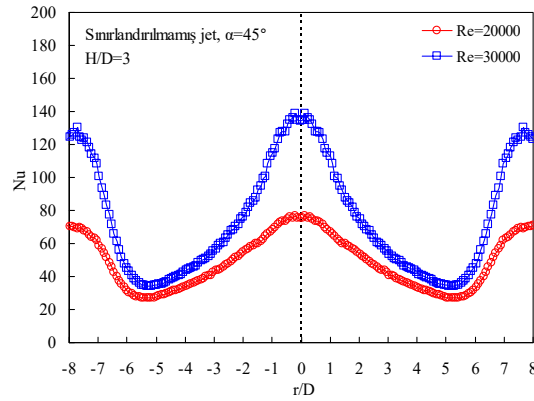
Şekil 4. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Reynolds sayısının her iki değerinde de, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini hizasındaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında ($r/D \approx \pm 5,5$) yerel Nusselt sayısı değerlerinin maksimum (pik) seviyelere ulaştığı anlaşılmaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir. Lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=1$ için Şekil 5'te verilen Nusselt sayısı dağılımları, Şekil 4'te verilen dağılımlarla benzerlik göstermekte, çarpma levhası üzerinde, ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda ortaya çıkan pikler $r/D \approx \pm 6$ konumunda gerçekteleşmektedir.

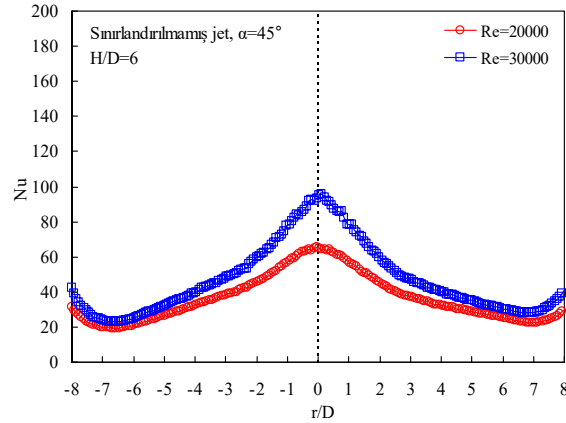


Şekil 5. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Şekil 6’da, lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=3$ iken her iki Reynolds sayısı değeri (20000 ve 30000) için çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları verilmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası üzerinde oluşturduğu pikler $r/D \approx \pm 8$ konumunda gerçekleşmektedir. Lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=6$ iken, her iki Reynolds sayısı değeri (20000 ve 30000) için Şekil 7’de görülen Nusselt sayısı dağılımlarından, ikincil jetlerin eksen doğrultularının çarpma levhası üzerindeki konumlarının daha büyük $\pm r/D$ değerlerinde oluşması nedeniyle çarpma levhası üzerindeki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir. Nusselt sayısı dağılımlarında iki Reynolds sayısı arasında ortaya çıkan fark, $H/D=6$ açıklığında çarpma bölgesi dışında kaybolmaktadır. Dört farklı lüle-levha arası açıklığa ait grafikler bir arada değerlendirildiğinde, artan Reynolds sayısı değerleri ile birlikte çarpma levhası yüzeyince Nusselt değerlerinin de artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Her iki Reynolds sayısı için de, artan lüle ile levha arası açıklığın Nusselt değerlerini azaltmakta ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan pikleri ise daha büyük $\pm r/D$ değerlerindeki konumları kaydırdığı anlaşılmaktadır.

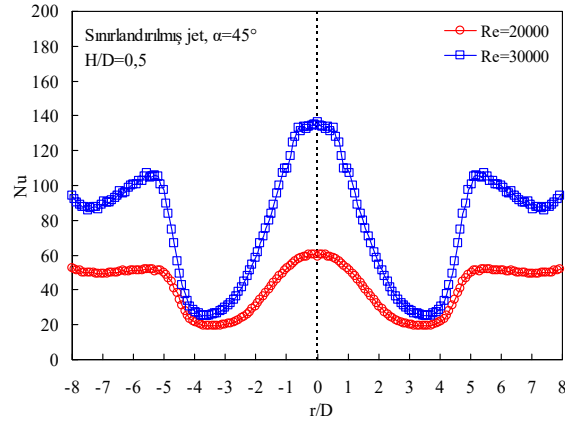


Şekil 6. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



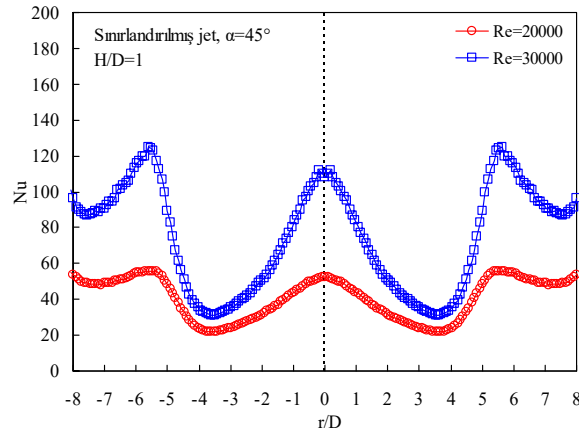
Şekil 7. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Çarpma levhasına dik doğrultudaki birincil jetin her iki tarafında birincil jet çıkış düzlemine göre 45° eğimli olarak konumlanan ikincil jetlerle oluşturulan sınırlandırılmış dizi jet durumunda, çarpma levhasının yatay orta eksenini üzerinde iki farklı Reynolds sayısı değeri için elde edilen Nusselt sayısı dağılımları sınırlandırıcı levha ile çarpma levhası arasındaki açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 8-11’de verilmiştir. Bu açıklık değerinin $H/D=0,5$ olduğu durumda, Reynolds sayısı değeri 20000 ve 30000 iken çarpma levhası üzeri boyunca yatay orta ekseninde ölçümlenen sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanan Nusselt sayısı dağılımları Şekil 8’de verilmektedir. Bu şekilde, çarpma levhası boyunca elde edilen Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısının 30000 değerinde daha büyük olduğu görülmektedir. Reynolds sayısının her iki değerinde de, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini hizasındaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında ($r/D \approx \pm 5,5$) yerel Nusselt sayısı değerlerinin maksimum (pik) seviyelere ulaştığı anlaşılmaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir.

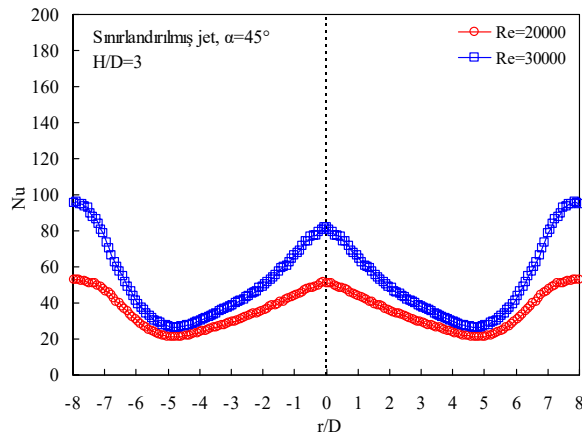


Şekil 8. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Levhalar arası açıklık değeri $H/D=1$ için Şekil 9'da verilen Nusselt sayısı dağılımları, Şekil 8'de verilen dağılımlarla benzerlik göstermektedir. Şekil 10'da, levhalar arası açıklık değeri $H/D=3$ iken, her iki Reynolds sayısı için de çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşan Nusselt sayısı dağılımları verilmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşturduğu pikler $r/D \approx \pm 8$ konumunda gerçekleşmektedir.

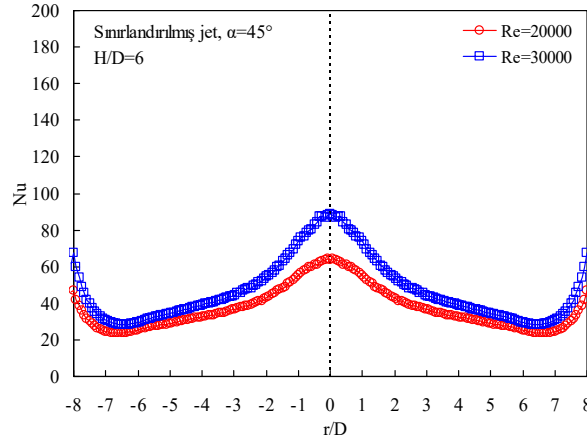


Şekil 9. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



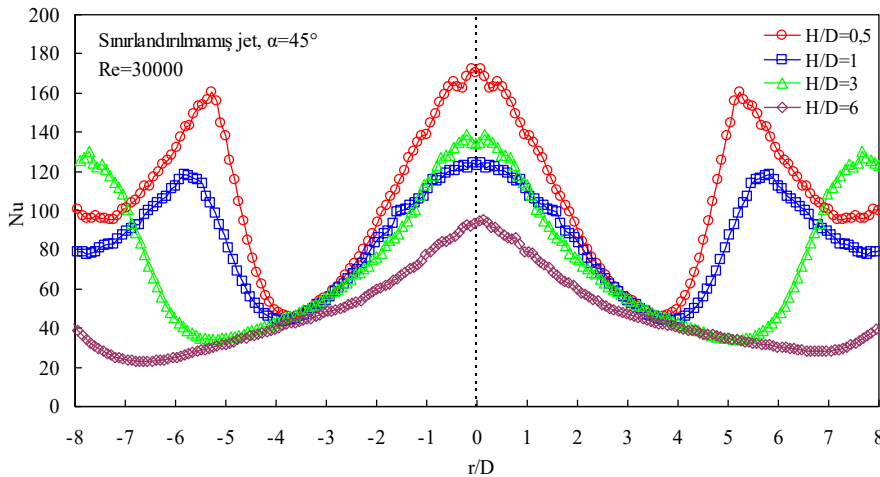
Şekil 10. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Levhalar arası açıklık değeri $H/D=6$ iken, Şekil 11’de verilen Nusselt sayısı dağılımlarından, ikincil jetlerin eksen doğrultularının çarpma levhası üzerindeki konumlarının daha büyük $\pm r/D$ değerlerinde oluşması nedeniyle çarpma levhası üzerindeki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir. Nusselt sayısı dağılımlarında iki Reynolds sayısı arasında ortaya çıkan fark, $H/D=6$ açıklığında çarpma bölgesi dışında kaybolmaktadır. Dört farklı levhalar arası açıklığa ait grafikler bir arada değerlendirildiğinde, Reynolds sayısı değerlerindeki artışın çarpma levhası yüzeyi üzerinde Nusselt sayısı değerlerini artırıcı etki yarattığı görülmektedir. Reynolds sayısının her iki değerinde de levhalar arası açıklığın artışının Nusselt değerlerinde azalmaya ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin ise daha büyük $\pm r/D$ değerlerindeki konumlara kaymasına sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



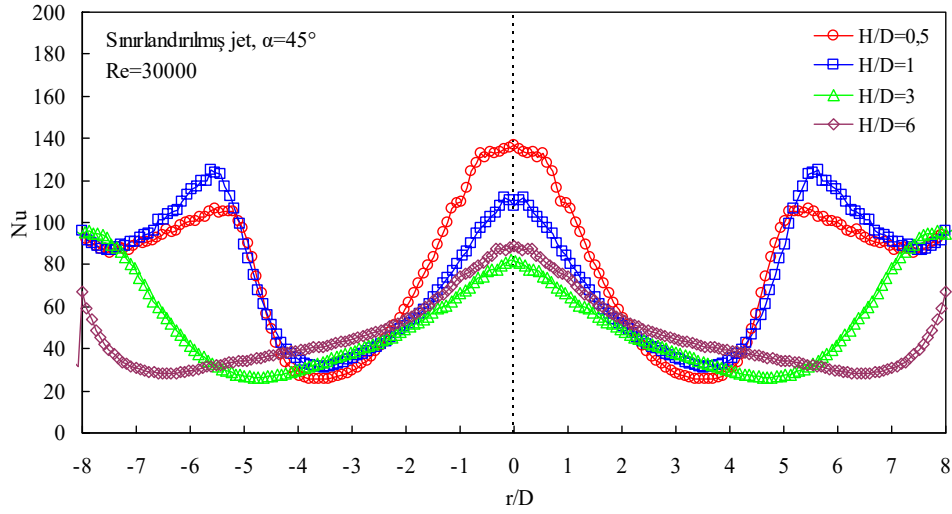
Şekil 11. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için sınırlanmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Şekil 12’de, jetin sınırlanmadığı ve Reynolds sayısı değerinin 30000 olduğu durum için, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 iken elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımları üzerinde lüle ile levha arası açıklığın etkisi verilmiştir. Artan lüle ile levha arası açıklık, yerel Nusselt sayısı değerlerini azaltıcı bir etkiye sebebiyet vermektedir. Birincil durma noktasındaki pikler ve eğimli jetleri eksenleri doğrultusunda oluşan pikler aynı düzeyde olmaktadır. $H/D=3$ açıklığa kadar çarpma levhası üzerinde ikincil jetler nedeniyle ortaya çıkan pikler, $H/D=6$ açıklıkta kaybolmaktadır.



Şekil 12. Sınırlanmamış jet, $Re=30000$ ve $\alpha=45^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

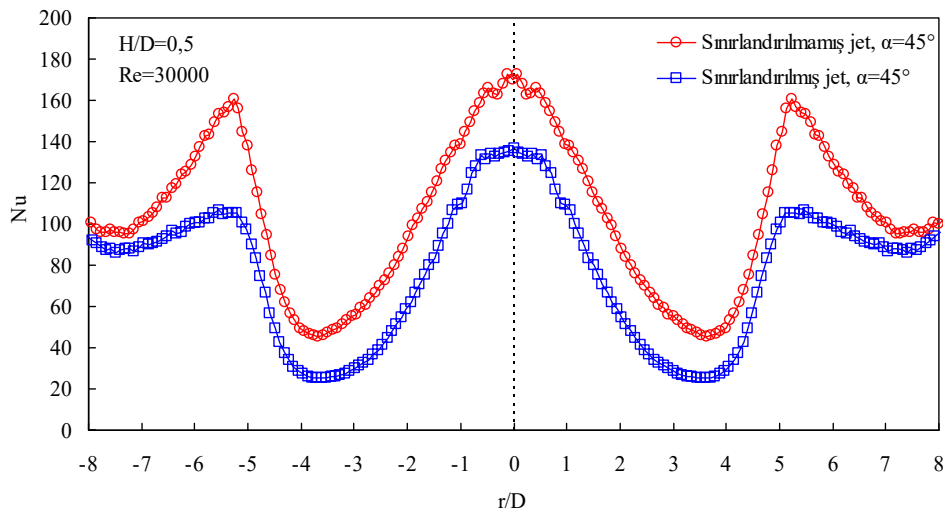
Şekil 13’te, jetin sınırlanıldığı ve Reynolds sayısı değerinin 30000 olduğu durum için, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 iken elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımları üzerinde lüle ile levha arası açıklığın etkisi verilmiştir. Levhalar arası açıklıktaki artışın, yerel Nusselt değerlerinde azalışa sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



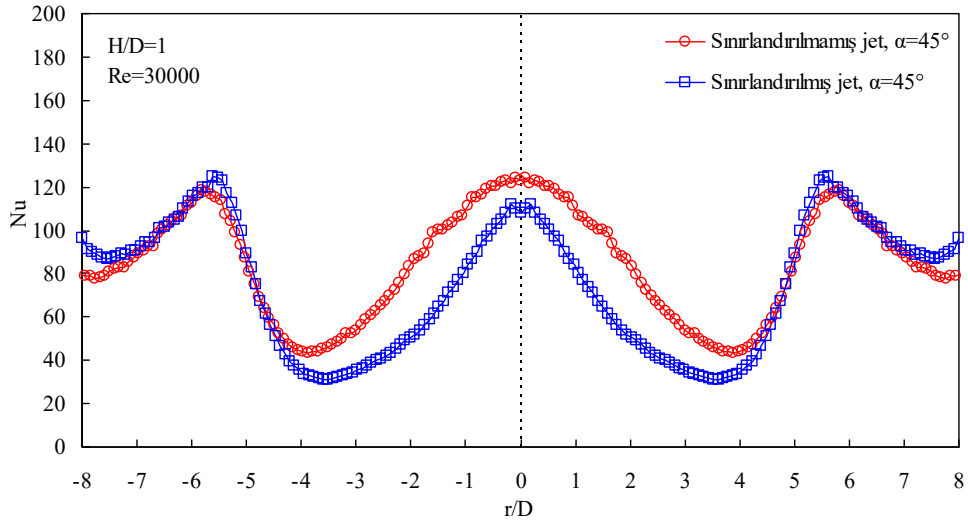
Şekil 13. Sınırlanmış jet, $Re=30000$ ve $\alpha=45^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Çarpma levhası üzeri boyunca yatay orta ekseninde elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımlarındaki sınırlayıcı levha etkisi, lüle-levha/levhalar arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 14-17'de verilmiştir. Lüle-levha/levhalar arası açıklık değeri $H/D=0,5$ iken, jetin sınırlanmadığı durumda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin jetin sınırlanmadığı durumdakinden daha büyük değerlerde olduğu anlaşılmaktadır. Sınırlanmamış jette, sınırlanmış jete göre aynı konumda yer alan daha pikler oluşmaktadır (Şekil 14). $H/D=1$ açıklıkta, sınırlanmamış ve sınırlanmış jet durumlarında çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları arasındaki fark sınırlanmamış jete daha büyük olacak şekilde sadece çarpma bölgesinde oluşmaktadır. (Şekil 15). Lüle-sınırlayıcı levha ile çarpma levhası aralarındaki açıklığın $H/D=3$ değerinde, $H/D=0,5$ 'teki durum ile benzer biçimde, sınırlanmış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri daha küçük olmaktadır (Şekil 16). $H/D=6$ açıklıkta, sınırlayıcı levhanın varlığının, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerine etkisi kaybolmaktadır (Şekil 17).

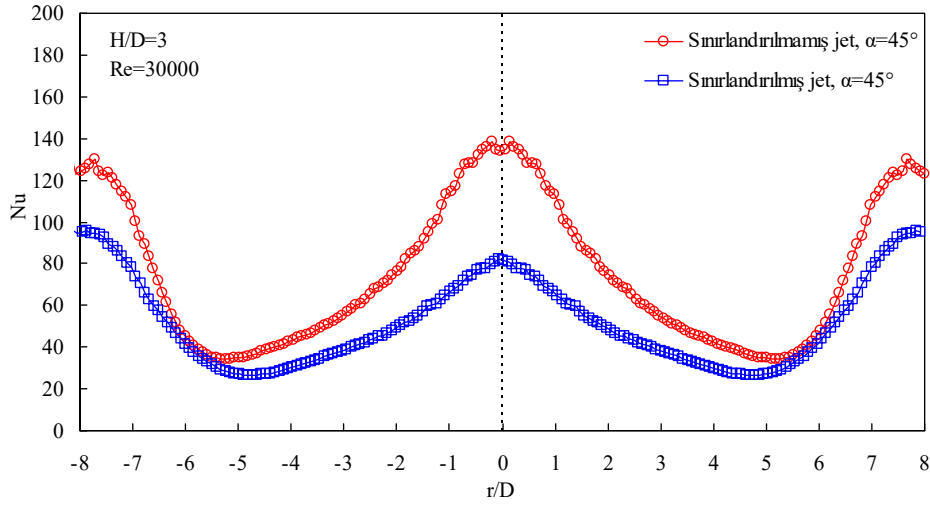
Lüle-levha/levhalar arası açıklığın dört farklı değerine ait dağılımlar bir arada değerlendirildiğinde, sınırlayıcı levha varlığının küçük açıklıklarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azalttığı, büyük açıklıklarda ise bu etkisinin kaybolduğu görülmektedir. $H/D=3$ açıklıkta, sınırlanmamış jet ve sınırlanmış jet durumlarındaki Nusselt sayısı dağılımları arasındaki fark $H/D=1$ 'deki farka göre daha fazla olmaktadır. Behnia ve ark. [29], çarpan jet akışlarında sınırlanmanın düşük açıklıklarda etkili olduğunu belirtmektedir.



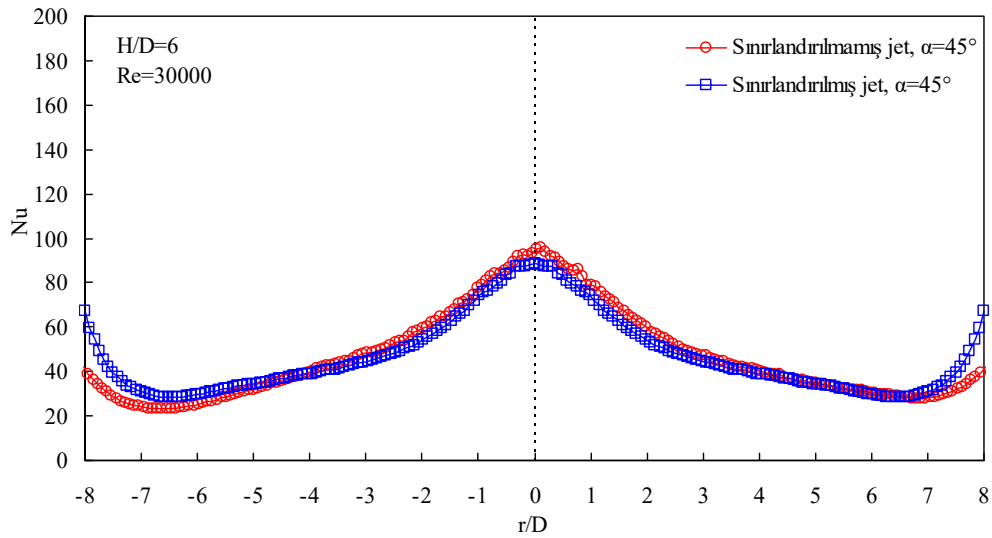
Şekil 14. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 15. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 16. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 17. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış her iki çarpan jet akışı durumunda da, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenine doğrultusundaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında yerel Nusselt sayısı pik değerler almaktadır.
- Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir.
- Çarpma levhası boyunca Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan lüle-levha/ levhalar arası açıklıklarla azalmaktadır. İkincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin konumları daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır.
- Sınırlandırıcı levha varlığı, küçük açıklıklarda çarpma levhası yüzeyindeki Nusselt değerlerinde azalmaya neden olmakta, büyük açıklıklarda ise azalma etkisi ortadan kalkmaktadır.
- Çarpan jet akışlarıyla soğutma uygulamalarında, jet ile ısı çekilecek yüzey arasındaki açıklığın küçük olduğu durumda sınırlandırılmamış jet, jet ile ısı çekilecek yüzey arasındaki açıklığın büyük olduğu durumda ise sınırlandırılmış jet daha iyi soğutma performansı göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Tanaka, E., 1974. The interference of two dimensional parallel jets experiments on the combined flow of dual jets. *Bulletin of JSME*, 17(109), 920-927.
2. Siclari, M.J., Hill, W.G., Jenkins, R.C., 1981. Stagnation line and upwash formation of two impinging jets. *AIAA Journal*, 19(10), 1286-1293.
3. Mikhail S., Morces S.M., Abou-Ellail M.M.M., Ghaly, W.S., 1982). Numerical prediction of flow field and heat transfer from a row of laminar slot jets impinging on a flat plate. *International Heat Transfer Conference 7*, 377-382.
4. Saad, N.R., Polat, S., Douglas, W.J.M., 1992. Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 13(1), 2-14.
5. Barata, J.M.M., 1996. Fountain flows produced by multiple impinging jets in a crossflow. *AIAA Journal*, 34(12), 2523-2530.
6. Rady, M., Arquis, E., 2006. Heat transfer enhancement of multiple impinging slot jets with symmetric exhaust ports and confinement surface protrusions. *Applied Thermal Engineering*, 26(11), 1310-1319.
7. Dong, L.L., Leung, C.W., Cheung, C.S., 2004. Heat transfer and wall pressure characteristics of a twin premixed butane/air flame jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(3), 489-500.
8. Abdel-Fattah, A., 2007. Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(8), 1061-1072.
9. Ozmen, Y., 2011. Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(2), 355-363.
10. Koched, A., Pavageau, M., Aloui, F., 2012. Vortex structure in the wall region of an impinging plane jet. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2), 61-69.
11. Al Mubarak, A.A., Shaahid, S.M., Al-Hadhrami, L.M., 2013. Heat transfer in a channel with inclined target surface cooled by single array of centered impinging jets. *Thermal Science*, 17(4), 1195-1206.
12. Buchlin, J.M., 2011. Convective heat transfer in impinging-gas-jet arrangements. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2), 137-149.
13. Attalla, M., Specht, E., 2009. Heat transfer characteristics from in-line arrays of free impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 45, 537-543.
14. Maddox, J.F., Knight, R.W., Bhavnani, S.H., 2015. Liquid jet impingement with an angled confining wall for spent flow management for power electronics cooling with local thermal measurements. *Journal of Electronic Packaging*, 137(3), 031015.
15. Polat, S., Huang, B., Mujumdar, A.S., Douglas, W.J.M., 1989. Numerical flow and heat transfer under impinging jets: A review. *Annual Review of Heat Transfer*, 2, 157-197.

16. Ozmen, Y., Ipek, G., 2016. Investigation of flow structure and heat transfer characteristics in an array of impinging slot jets. *Heat and Mass Transfer*, 52, 773-787.
17. Caliskan, S., Baskaya, S., Calisir, T., 2014. Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 685-703.
18. Tepe, A.Ü., 2019. Gaz türbin kanatlarında jet çarpmalı soğutmanın deneysel ve sayısal incelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 224.
19. San, J.Y., Chen, J.J., 2014. Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 8-17.
20. Guoneng, L., Zhihua, X., Youqu, Z., Wenwen, G., Cong, D., 2016. Experimental study on convective heat transfer from a rectangular flat plate by multiple impinging jets in laminar cross flows. *International Journal of Thermal Sciences*, 108, 123-131.
21. Godi, S.C., Pattamatta, A., Balaji, C., 2020. Heat transfer from a single and row of three dimensional wall jets - a combined experimental and numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, 119801.
22. Talapati, R.J., Baghel, K., Shrigondekar, H., Katti, V.V., 2024. Influence of inclined unconfined circular air jet impingement on local heat transfer characteristics of smooth flat plate. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108848, 1-15.
23. Yalçinkaya, O., Durmaz, U., Tepe, A.Ü., Benim, A.C., Uysal, Ü., 2024. Heat and flow characteristics of aerofoil-shaped fins on a curved target surface in a confined channel for an impinging jet array. *Energies*, 17(5), 1238.
24. Baz, F.B., Elshenawy, E.A., El-Agouz, S.A., El-Samadony, Y.A.F., Marzouk, S.A., 2024. Experimental study on air impinging jet for effective cooling of multiple protruding heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108707.
25. Ozmen, Y., Baydar, E., 2008. Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. *Heat and Mass Transfer*, 44, 1315-1322.
26. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2011. *Introduction to heat transfer*. Wiley, Sixth Edition, New Jersey, ABD, 984.
27. Churchill, S.W., Chu, H.H.S., 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329.
28. Kline, S., McClintock, F., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.
29. Behnia, M., Parneix, S., Shabany, Y., Durbin, P.A., 1999. Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(1), 1-9.

SEMBOLLER DİZİNİ

Kısaltmalar

PCB	: Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
QVGA	: Quarter Video Graphics Array (Çeyrek Video Grafik Dizisi)

Latin Semboller

P	: Basınç (Pa) – Güç (kW)
Q	: Isıl enerji (W)
A	: Çarpma yüzeyi alanı
D	: Lüle çapı
h	: Isı taşınım katsayısı
H	: Lüle-çarpma yüzeyi arası mesafe
I	: Akım
r	: Durma noktasından radyal doğrultuda uzaklık veya Yarıçap
R	: Çarpma yüzeyi yarıçapı veya Elektriksel direnç
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık
U ₀	: Jet hızı
V	: Voltaj
Nu	: Nusselt sayısı
k-ε	: k-epsilon türbülans modeli
Pr	: Prandtl sayısı
Ra	: Rayleigh sayısı
k	: Isı iletim katsayısı – Türbülans kinetik enerjisi
q''	: Isı akısı (W/m ²)

Grek Semboller

ρ	: Ro (Akışkan yoğunluğu kg/m ³)
α	: Alfa (Jet eğim açısı)
ε	: Epsilon (Emisivite katsayısı – Türbülans kinetik enerjisinin yutulması)
μ	: Mü (Viskozite)
ν	: Nü (Kinematik viskozite)
σ	: Sigma (Stefan-Boltzman sabiti)
Δ	: Delta (Fark ifadesi)

Alt İndisler

çev	: Çevre ortam
w	: Duvar (Wall)
j	: Jet

