

DÖNMELİ EŞ EKSENLİ ÇARPAN JETLERDE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Experimental Investigation of Heat Transfer in Swirling Coaxial Impinging Jets

Burak MARKAL
Orhan AYDIN

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, dönmeli eş eksenli çarpan jet akışlarının ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, farklı debi oranları ($Q^* = 0.4$ ve 0.7) ve boyutsuz lüle-plaka mesafelerinde ($H/D = 1, 2$ ve 3) yapılmış olup, toplam debi sabit tutulmuştur ($Q_{tot} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (90 L/dk)). İş akışkanı ve çarpma yüzeyi olarak, sırasıyla, hava ve dairesel bakır plaka kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzey sıcaklıkları üzerinden, geleneksel dairesel jet akışı ile karşılaştırılmıştır. Çarpma mesafesi arttıkça, Nusselt sayısı değerleri azalmaktadır. Debi oranı, hem Nusselt sayısı değerlerini hem de dağılımını etkileyen önemli bir parametre olup; artan debi oranıyla, çarpma yüzeyi üzerinde sıcaklık dağılımı daha üniform bir hale gelmekte ve ortalama Nusselt sayısı artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Debi oranı, Dönmeli eş eksenli çarpan jet, Isı transferi, Sıcaklık dağılımı.

ABSTRACT

In this experimental study, heat transfer characteristics of swirling coaxial impinging jets are investigated. Experiments are conducted for different values of flowrate ratio ($Q^* = 0.4$ and 0.7) and dimensionless nozzle-to-plate distance ($H/D = 1, 2$ and 3), while total flowrate is kept constant ($Q_{tot} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (90 LPM)). Air and circular copper plate are used as working fluid and impingement plate, respectively. The results are compared with those of the conventional circular jet depending on the surface temperatures. Nusselt numbers decrease with increasing impingement distance. Flowrate ratio is an important parameter which influences both the magnitude and distribution of the Nusselt numbers. Increasing flowrate ratio makes temperature distribution more uniform and increases the averaged Nusselt number.

Key Words: Flowrate ratio; Swirling coaxial impinging jet, Heat transfer, Temperature distribution,

1. GİRİŞ

Çarpan jet akışları, yüksek ısı ve kütle transferi kapasiteleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Camın temperlenmesi, kağıtların kurutulması [1], turbo jet motorlarının ve elektronik bileşenlerin soğutulması [2] uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir.

En basit haliyle geleneksel dairesel bir jet akışı üç farklı bölgeye ayrılmaktadır: (1) serbest jet bölgesi, (2) çarpma veya durma bölgesi ve (3) duvar jeti bölgesi [3, 4]. İlgili bölgelerdeki akış yapıları ve dolayısıyla jet akışının genel ısı transfer performansı birçok geometrik parametreye ve çalışma koşuluna bağlı olarak değişebilmektedir. Lüle geometrisi, çarpma yüzeyinin şekli ve yüzey karakteristikleri, lülelerin sayısı ve dizilişi, akışkan türü ve debisi ve lüle-plaka arası mesafe etkili parametreler arasında yer almaktadır. Akış yapılarının karmaşık olması, etkin parametre aralığının geniş olması ve endüstride yaygın kullanım alanı bulmaları sebebiyle çarpan jet akışları araştırmacıların ilgisini çekmekte ve konu üzerine çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Colucci ve Viskanta [5] sınırlandırılmış çarpan jet akışları üzerine yaptıkları deneysel çalışmada, hiperbolik geometriye sahip lülenin ısı transferi üzerindeki etkisini incelemiştir. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin küçük değerlerinde ($H / D < 1$) Nusselt sayısının radyal doğrultuda iki pik değere sahip olduğunu ve hiperbolik geometrinin geleneksel dairesel lüle geometrisine kıyasla ısı transferini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Huang ve El-Genk [6] dönmeli ve çok çıkışlı çarpan jetleri ısı ve hidrodinamik olarak incelemiş ve elde ettikleri sonuçları geleneksel jet sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Dönmeli çarpan jetlerin, ısı transferinin hem üniformalığını hem de miktarını artırdığını ifade etmişlerdir. Yang vd. [7] halka akışlı jetlerde dönme etkisini incelemiştir. Lüle-plaka mesafesinin büyük değerlerinde dönmeli halkasal jetin duvar basıncı ve ısı transferi üniformalığını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Nuntadusit vd. [8] bükülmüş şeritlerle oluşturulan dönmeli akışlı çarpan jetleri deneysel olarak incelemiştir. Dokuz özdeş lüleden oluşan bir sistem tasarlamışlardır. Dönmeli jetlerin geleneksel jetlere kıyasla ısı transferini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Eiamsa-ard vd. [9] bükülmüş şeritlerle oluşturdukları lülelerde, birbiriyle aynı ve zıt yönlerde dönen akış çiftlerini çarpan jet uygulaması olarak incelemiştir. Dönmeli tek jet akışı ile geleneksel jet akışını referans durum olarak kullanmışlardır. Aynı ve zıt yönlü akış çifti durumlarının her ikisinde de ısı transferinin azalan çarpma mesafesi ve artan Reynolds sayısı ile arttığını belirtmişlerdir. Küçük çarpma mesafelerinde ($H / D = 1$ ve 2) dönmeli jetlerin daha büyük Nusselt sayıları sunduğunu göstermişlerdir. Ahmed vd. [10] dönmeli ve geleneksel jetlerin ısı transfer davranışını incelemiştir. ısı transfer deneylerinde termal kamera kullanmışlardır. Dönme etkisinin (farklı dönme sayılarındaki jet akışlarını dikkate almışlar) çarpma mesafesine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Çarpma mesafesinin fazla olduğu çalışma koşullarında ($H / D = 6$) dönme etkisi nedeniyle jetin daha fazla yayıldığı ve türbülans seviyesinin azaldığını belirtmişlerdir. Lo ve Liu [11] yarısı düz yarısı işlenmiş yüzeye sahip çarpma plakası kullanarak çoklu çarpan jetlerin ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Yüzeyin işlenmiş bölümü için enine ve boyuna doğrultularda dikdörtgensel kanalların açıldığı farklı plakalar kullanmışlardır. Tamamen pürüzlü yüzeylerle karşılaştırıldığında, boyuna oyukların açıldığı yarı pürüzlü yüzeyin ısı transferinde % 50'ye varan iyileşme sağladığını ifade etmiş ve bunun sebebinin akışın daha iyi karışması olduğunu belirtmişlerdir. Singh vd. [12] çarpan jet akışı uygulamalarında ısı transferini iyileştirmek için silindirik, kübik ve eş merkezli şekillerde pürüzlere sahip çarpma yüzeyleri kullanmışlar ve sonuçları pürüzsüz yüzeye karşılaştırmışlardır. En büyük Nusselt sayılarının eş merkezli çıkıntılara sahip yüzeylerde elde edildiğini belirtmişlerdir.

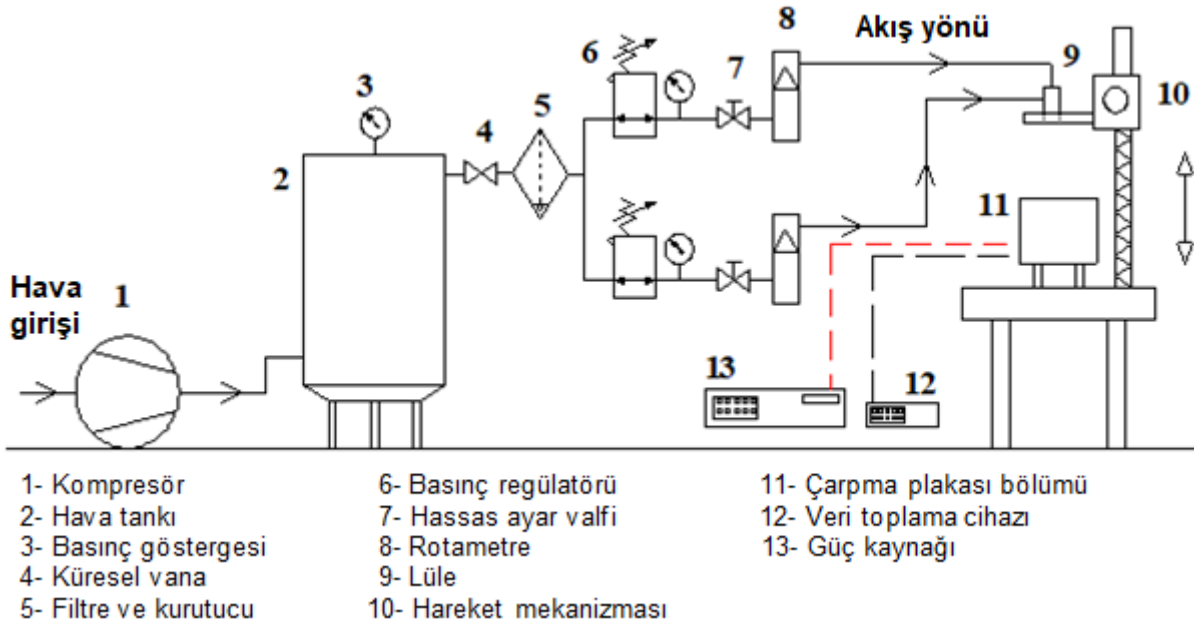
Çarpan jet akışlarında ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalardan bazıları yukarıda özetlenmiştir. Bu kapsamda, özellikle ısı transferi miktarını artırmak için, yukarıda da belirtildiği üzere, birçok araştırmacı, pürüzlü yüzeylere sahip çarpma plakaları veya akışa dönme hareketi kazandıracak lüle tasarımları kullanmışlardır. ısı transferindeki iyileşme iki şekilde değerlendirilmelidir: (1) ısı transferinin üniform dağılımı ve (2) ısı transfer miktarındaki artış. Çarpan jetlerin akış bölgeleri dikkate alındığında, her iki kriteri de karşılayabilecek tasarımlardan biri dönmeli akışın dairesel jet akışı ile birlikte sağlandığı dönmeli eş eksenli çarpan jet akışlarıdır. Mevcut literatür incelendiğinde dönmeli eş eksenli sınırlandırılmış çarpan hava jetlerinin kapsamlı deneysel incelemesinin (ısı transferi açısından) ilk olarak Markal [4] tarafından yapıldığı görülmektedir. Değişik ısı problemlere optimum çözümün önerilebilmesi için farklı koşullar altındaki yeni deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece, ısı performansın çalışma parametrelerine bağlı değişimi, geniş bir deneysel aralıkta ortaya koyulmuş olacaktır.

Bu çalışmanın amacı, debi oranı (dönmeli akış debisinin toplam debiye oranı) ve boyutsuz lüle-plaka arası mesafenin dönmeli eş eksenli çarpan hava jetlerinin ısı karakteristikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek ve yeni deneysel verileri literatüre sunmaktır. Bu kapsamda, yerel Nusselt sayılarının radyal doğrultudaki değişimi farklı çalışma koşulları altında sunulmuş ve yüzey sıcaklıkları üzerinden geleneksel dairesel jetler ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, eş eksenli durum için ortalama ve durma noktası Nusselt sayıları tablolar halinde verilmiştir.

2. DENEY DÜZENEĞİ, DENEYSEL YÖNTEM ve HESAPLAMA PROSEDÜRÜ

Deney düzeneği Şekil 1'de verilmiş olup, deney düzeneğini oluşturan bileşenler şekil üzerinde numaralandırılmıştır. Deneysel yöntem ve ilgili ekipmanların fonksiyonları kısaca aşağıda özetlenmiştir:

Ortam havası vidalı kompresör aracılığıyla sıkıştırılarak hava tankına doldurulmakta; buradan da akış hatları aracılığıyla test bölgesine gönderilmektedir. Hava tankının çıkışında kurutucu ve filtre bulunmaktadır. Böylece, iş akışkanı olan havanın test bölgesine gönderilmeden önce nem ve çeşitli kirleticilerden arındırılması sağlanmaktadır. Kurutucudan sonra akış hattı ikiye ayrılmıştır. Hatlardan biri eş eksenli geometriye sahip olan lülenin içteki dairesel akış pasajıyla, diğeri ise onu çevreleyen dıştaki dönmeli akış pasajlarıyla (çevresel olarak 3 adet) irtibatlıdır. Her bir akış hattı üzerinde basınç regülatörü, hassas ayar valfi ve rotametreden oluşan ekipman dizisi bulunmaktadır. Bu cihazlar kullanılarak dairesel ve dönmeli jetlerin debi değerleri istenilen miktarda birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Test bölgesine dolayısıyla lüleyle ulaşan akışkan, akış pasajlarından geçerek lüleyle terk eder ve jet akışı olarak hedef yüzeye çarptırılır. Lüle, düşey olarak hareket edebilen hassas bir mekanizma ile irtibatlı olup; lüle çıkışı ile çarpma plakası arasındaki mesafe, bu mekanizma aracılığıyla istenilen değere ayarlanabilmektedir.



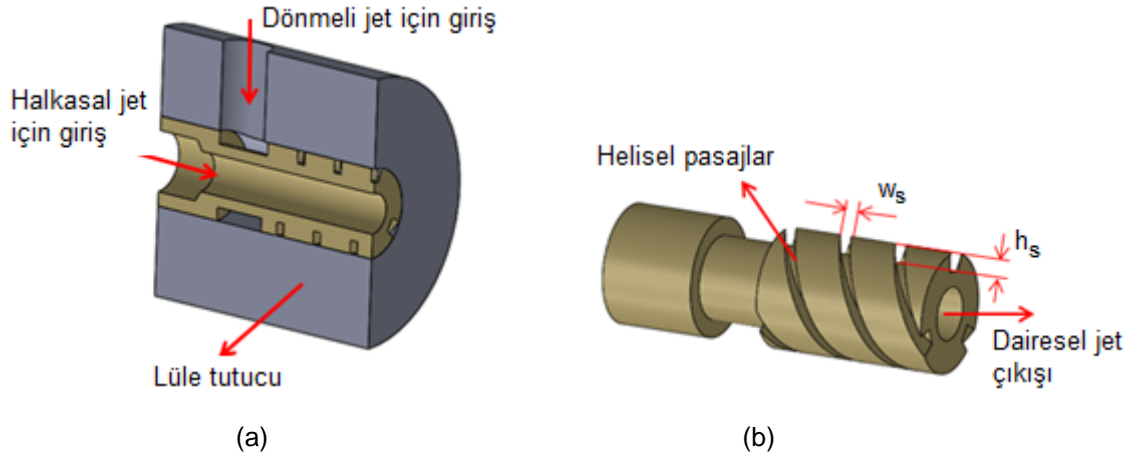
- | | | |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1- Kompresör | 6- Basınç regülatörü | 11- Çarpma plakası bölümü |
| 2- Hava tankı | 7- Hassas ayar valfi | 12- Veri toplama cihazı |
| 3- Basınç göstergesi | 8- Rotametre | 13- Güç kaynağı |
| 4- Küresel vana | 9- Lüle | |
| 5- Filtre ve kurutucu | 10- Hareket mekanizması | |

Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik resmi

Çalışma kapsamında kullanılan lüleyle ait detaylı gösterim, Şekil 2a ve b'de verilmiştir. Uzunluğu ve dış çapı, sırasıyla, 29 mm ve 10 mm olan lülenin iç kısmında, 4.5 mm çapa sahip dairesel bir kanal; dış bölümünde ise üç özdeş helisel kanal bulunmaktadır. Helisel kanalların genişlik (w_s) ve yükseklik değerleri (h_s), sırasıyla, 2 mm ve 1.5 mm olup; dönme açısı ve dönme sayısı değerleri, sırasıyla, 45° ve 0.86'dır. Pirinç malzemeden imal edilen lüle, dış çapı 30 mm olan Delrin tutucu içine yerleştirilmiştir.

Çarpma plakası 46 mm çapa sahip olup, bakır malzemeden yapılmıştır. Plakanın üst yüzeyi, yayıcılığı artırmak amacıyla ince tabaka halinde siyah boya ile kaplanmıştır. Termoelemanlar yüzeyin 0.2 mm altına, 3 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Çarpma plakasının arka yüzeyine esnek bir ısıtıcı yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında, ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 22°C 'de sabit tutulmuş olup, esnek ısıtıcı aracılığıyla 18.2 W sabit ısı akışı uygulanmıştır.

Kline ve McClintock [13] tarafından tanımlanan yöntemle göre belirsizlik analizi yapılmış ve Reynolds ve Nusselt sayılarındaki belirsizlikler, sırasıyla, $\pm \%4.4$ ve $\pm \%5.4$ olarak belirlenmiştir. Deney düzeneği, cihazlar ve test bölgesi bileşenlerine ait detaylı bilgiler yazarların önceki çalışmalarında yer almaktadır [4, 14].



Şekil 2. Lüleye ait üç boyutlu çizimler.

Dönmeli eş eksenli çarpan jetin ısı transfer karakteristikleri; yerel Nusselt sayıları ve alan ağırlıklı ortalama Nusselt sayıları üzerinden verilmiştir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (1)$$

$$Nu_{avg} = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (2)$$

Burada; h, D ve k, sırasıyla, ısı taşınım katsayısını, lülenin dış çapını ve akışkanın ısı iletim katsayısını göstermektedir.

$$h = \frac{q_{conv}}{A_s(T_s - T_j)} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte; q_{conv} , yüzeyden taşınım ile olan ısı transfer miktarını, A_s yüzey alanını, T_s ve T_j ise sırasıyla yüzey ve jet sıcaklıklarını ifade etmektedir. Isı transferi üzerindeki etkisi incelenen parametrelerden biri debi oranı olup;

$$Q^* = \frac{Q_s}{Q_{tot}} \quad (4)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada; Q hacimsel debiyi; Q_s ve Q_{tot} ise, sırasıyla, dönen akışın (tüm helisel kanallardaki) hacimsel debisi ile toplam hacimsel debiyi (helisel + dairesel) ifade etmektedir. Boyutsuz lüle-plaka mesafesi (H / D), lüle çıkışı ile çarpma plakası arasındaki mesafenin (H) lülenin dış çapına (D) bölünmesi ile elde edilir. Boyutsuz radyal mesafe ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

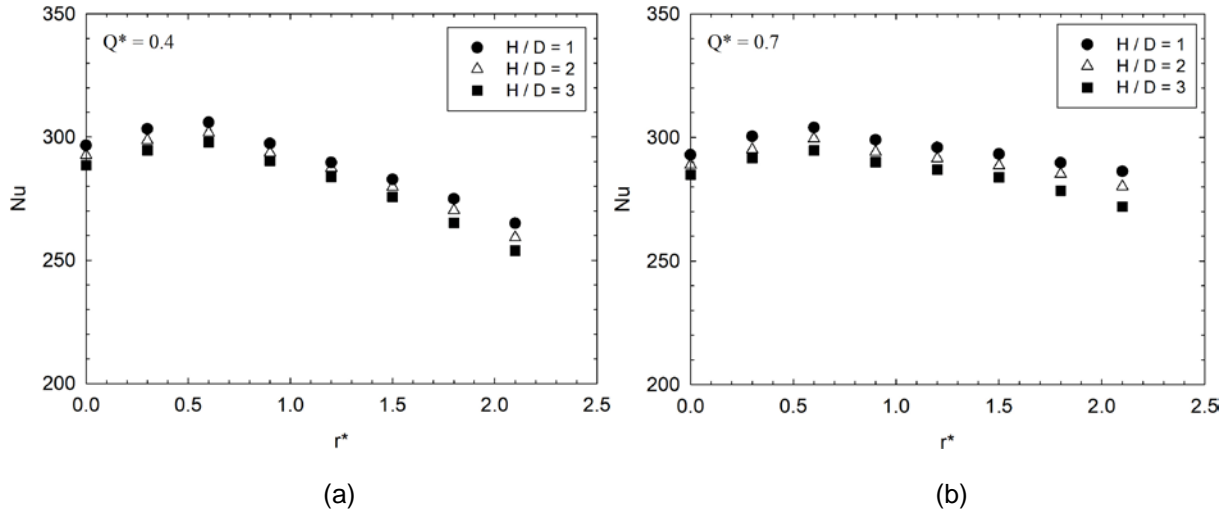
$$r^* = \frac{r}{D} \quad (5)$$

Burada; r, durma noktasından (çarpma plakasının merkezi) itibaren ölçülen radyal uzunluktur. Hesaplama yöntemine ilişkin detaylara Markal [4] referansından ulaşılabilir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, farklı boyutsuz lüle-plaka mesafeleri ($H/D = 1, 2$ ve 3) ve debi oranları ($Q^* = 0.4$ ve 0.7) için deneyler yapılmış olup, toplam debi değeri 90 L/dk 'da sabit tutulmuştur. Mach sayısı 0.3 'ten küçük olduğu için akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3a ve b'de, sırasıyla, $Q^* = 0.4$ ve $Q^*=0.7$ için yerel Nusselt sayısının radyal doğrultudaki değişimi çarpma mesafesinin fonksiyonu olarak verilmiştir. Simetri nedeniyle, plakanın yarısı üzerindeki dağılımlar sunulmuştur. Her iki şekilden de görüldüğü üzere, lüle çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafenin artmasıyla Nusselt sayısı azalmaktadır. Radyal doğrultu boyunca gerçekleşen bu azalış, plakanın dış bölgelerine doğru daha belirgin hale gelmektedir. Çarpma mesafesine bağlı olarak Nusselt sayısındaki azalma, akışkanın kinetik enerjisindeki [9, 15] ve ısı sınır tabaka kalınlığındaki değişim [16] ile açıklanabilir. Lüle, çarpma yüzeyinden uzaklaştıkça jetin yayılması sebebiyle çarpma plakasına ulaştığı andaki hızı, dolayısıyla kinetik enerjisi azalır. Eksenel akışta meydana gelen bu zayıflama sebebiyle ısı transfer miktarında azalma gerçekleşir. Ayrıca, çarpma plakasının dış bölgelerine doğru, bir başka ifade ile durma noktasından uzaklaştıkça ısı sınır tabaka kalınlığı artar. Bu nedenle, dış bölgelere doğru ısı transferindeki azalma daha belirgin hale gelir.

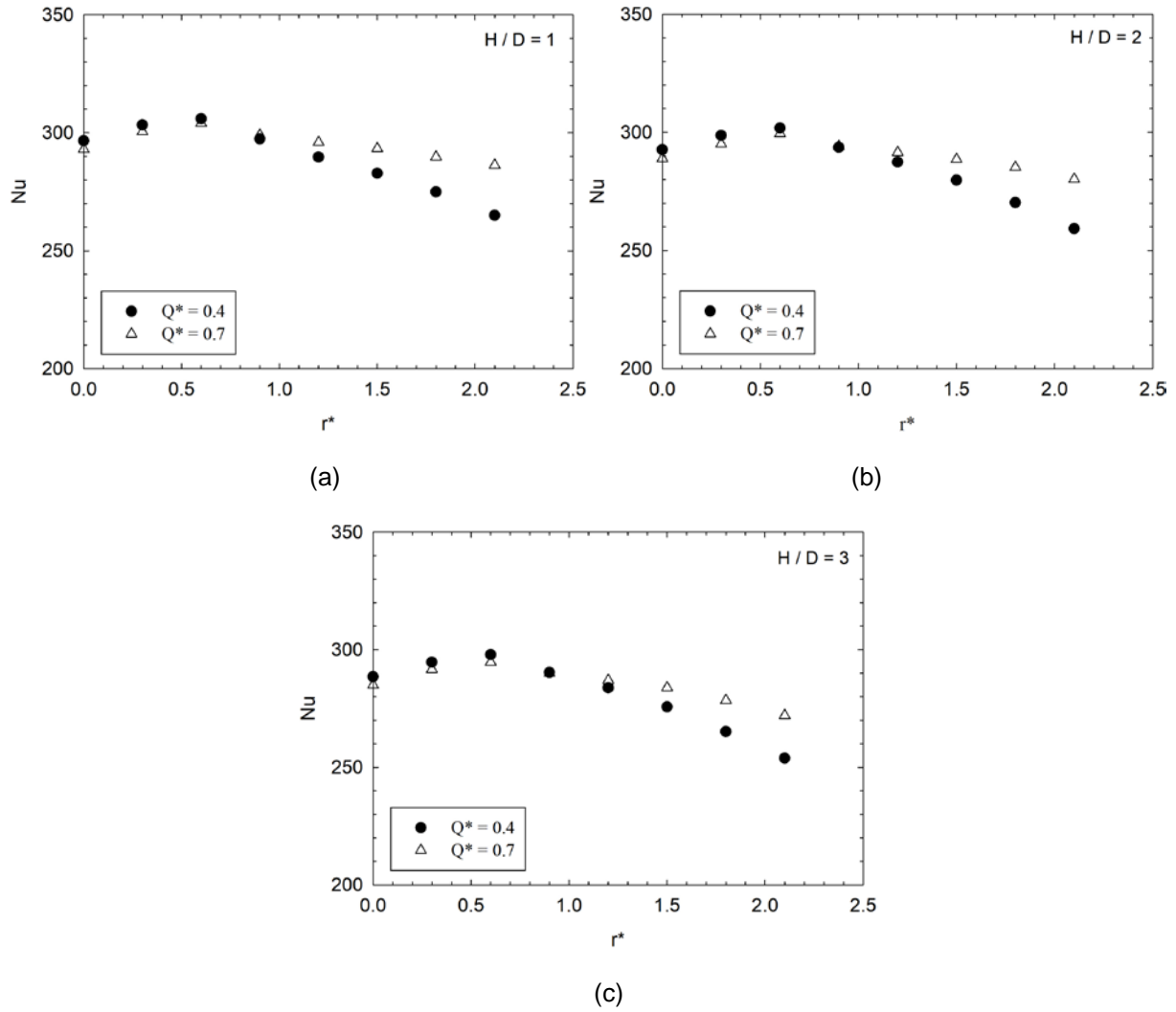


Şekil 3. Yerel Nusselt sayısının çarpma mesafesinin fonksiyonu olarak radyal doğrultudaki değişimi: $Q^* = 0.4$ (a) ve $Q^* = 0.7$ (b).

Farklı çarpma mesafeleri için debi oranının, yerel Nusselt sayısının radyal dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Her üç grafikten de görüldüğü üzere debi oranındaki artış ısı transferinin üniformluğunu belirgin bir şekilde iyileştirmektedir. Üniformluğun iyileşmesinde en önemli faktör dönen akışın toplam akış içerisindeki katkısının artmasıdır. Dönme bileşeni, akışın karışımını iyileştirmekte ve akış alanında girdap (vortex) oluşumuna yol açmaktadır. Girdap oluşumu türbülans karakteristiklerini iyileştirir. Sonuç olarak, ısı sınır tabaka bozulur (incelir) ve ısı performans artar. Şekil 4'ten de dikkat edileceği üzere, ısı transferindeki iyileşme, çarpma plakasının dış bölgelerine doğru daha belirgin hale gelir. Artan debi oranı ile ısı etkileşiminin en fazla olduğu bölge, bir diğer ifade ile durma bölgesi, radyal doğrultuda dışa doğru açılmış olur.

Durma noktası veya durma noktasına yakın olan radyal mesafelerde ($r^* < 0.6 - 0.7$), düşük debi oranına sahip akışın, ısı transferi açısından daha etkin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, azalan debi oranı ile lüle merkezinden çıkan dairesel jetin momentumunun artmasıdır. Ancak, çarpma yüzeyinin tamamı dikkate alındığında, ısı transferinin üniformluğu açısından $Q^* = 0.7$ durumunda belirgin bir iyileşme olduğu açıktır. Artan debi oranının bir sonucu olarak, ısı transferinin özellikle dış bölgelerde artması, çarpma plakasının geometrisi dikkate alındığında, alan ağırlıklı ortalama Nusselt

sayılarında da belirgin bir artışa yol açacaktır. Hem durma noktası Nusselt sayıları hem de ortalama Nusselt sayılarının değerleri Tablo 1’de verilmiştir.



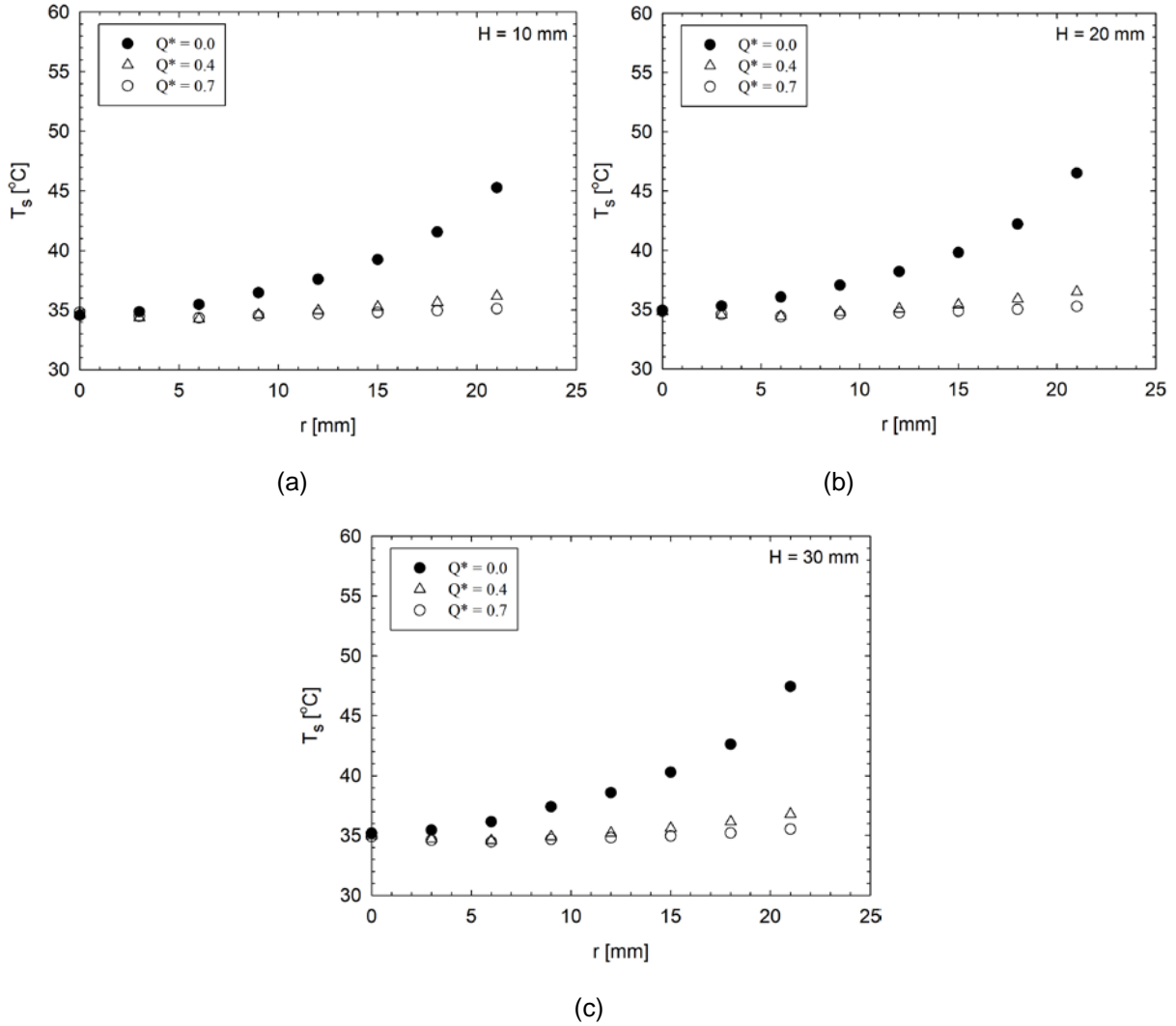
Şekil 4. Debi oranının yerel Nusselt sayısının radyal dağılımı üzerindeki etkisi

Tablo 1. Ortalama ve durma noktası Nusselt sayıları değerleri

	Nu_{avg}		Nu_{st}	
	$Q^* = 0.4$	$Q^* = 0.7$	$Q^* = 0.4$	$Q^* = 0.7$
$H/D = 1$	278.84	291.49	296.58	292.94
$H/D = 2$	276.12	286.36	292.65	288.89
$H/D = 3$	270.62	279.11	288.52	284.93

Tablo 1’de verilen sayısal değerler incelendiğinde, artan debi oranı ve azalan çarpma mesafesi ile ortalama Nusselt sayısı değerlerinde, sırasıyla, %4.5 ve %4.2 oranlarına kadar artış; durma noktası Nusselt sayısında ise artan debi oranı ve çarpma mesafesi ile sırasıyla %1.3 ve %2.7’ye kadar azalma meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 5'te yüzey sıcaklık değerleri üzerinden, dönmeli eş eksenli çarpan jetin geleneksel dairesel jet sonuçlarıyla karşılaştırılması verilmiştir. Dairesel jet durumunda, durma noktasından uzaklaştıkça sıcaklıklar sürekli artış göstermekte ve plaka üzerinde belirgin sıcaklık farkları oluşmaktadır. Bu durum etkin termal gerilmelerin oluşumuna yol açarak malzemenin zamanla deforme olmasına sebep olabilir. Artan debi oranı ile plaka üzerindeki sıcaklık farkları azalmakta ve dolayısıyla daha üniform sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Dairesel jetin durma noktası yakınında sınırlı bir bölgede etkin olması, bu tür jetlerin spot soğutma / ısıtma uygulamalarında uygun olacağını göstermektedir. Dönmeli eş eksenli jetlerin, çalışılan aralık dikkate alındığında, elektronik bileşenlerin soğutulması gibi hem ısı transferi miktarının hem de üniformluğun önemli olduğu uygulamalar için avantajlı olduğu açıktır.



Şekil 5. Dönmeli eş eksenli jetlerin geleneksel dairesel jetlerle karşılaştırılması

4- SONUÇLAR

Bu çalışmada, dönmeli eş eksenli sınırlandırılmış çarpan hava jetlerinin ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir:



- Çarpma mesafesi arttıkça, Nusselt sayısı azalmaktadır. Bu azalış, tüm radyal doğrultu boyunca gerçekleşmekte olup; plakanın dış bölgelerine doğru daha belirgin hale gelmektedir.
- Artan debi oranı ile ısı transferi daha üniform hale gelmektedir.
- Artan debi oranı ile ortalama Nusselt sayısı değerlerinde %4.5'e kadar artış; durma noktası Nusselt sayısında ise %1.3'e kadar azalma meydana gelmektedir.
- Ortalama Nusselt sayısı azalan çarpma mesafesi ile artmaktadır (%4.2'ye kadar).
- Dönmeli eş eksenli çarpan jetler elektronik sistemlerin soğutulmasında etkili bir ısı kontrol yöntemi olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] NUNTADUSIT, C., WAE-HAYEE, M., KAEWCHOOHONG, N., "Heat transfer enhancement on a surface of impinging jet by increasing entrainment using air-augmented duct", International Journal of Heat and Mass Transfer, 127, 751–767, 2018.
- [2] FÉNOT, M., TRINH, X.T., DORIGNAC E., "Flow and heat transfer of a compressible impinging jet", International Journal of Thermal Sciences 136, 357–369, 2019.
- [3] AHMED, Z.U., AL-ABDELI, Y.M., GUZZOMI, F.G., "Heat transfer characteristics of swirling and non-swirling impinging turbulent jets", International Journal of Heat and Mass Transfer, 102 991–1003, 2016.
- [4] MARKAL, B., "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, 2018.
- [5] COLUCCI, D.W., VISKANTA, R., "Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet", Experimental Thermal and Fluid Science, 13, 71-80, 1996.
- [6] HUANG, L., EL-GENK, M.S., "Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets", International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, 583–600, 1998.
- [7] YANG, H.Q., KIM, T., LU, T.J., ICHIMIYA, K., "Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling", International Journal of Heat and Mass Transfer 53, 4092–4100, 2010.
- [8] NUNTADUSIT, C., WAE-HAYEE, M., BUNYAJITRADULYA, A., EIAMSA-ARD, S., "Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators", International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 102–107, 2012.
- [9] EIAMSA-ARD, S., NANAN, K., WONGCHAREE, K., "Heat transfer visualization of co/counter-dual swirling impinging jets by thermochromic liquid crystal method", International Journal of Heat and Mass Transfer, 86, 600–621, 2015.
- [10] AHMED, Z.U., AL-ABDELI, Y.M., GUZZOMI, F.G., "Flow field and thermal behavior in swirling and non-swirling turbulent impinging jets", International Journal of Thermal Sciences, 114, 241-256, 2017.
- [11] LO, Y.H., LIU, Y.H., "Heat transfer of impinging jet arrays onto half-smooth, half-rough target surfaces", Applied Thermal Engineering, 128, 79–91, 2018.
- [12] SINGH, P., ZHANG, M., AHMED, S., RAMAKRISHNAN, K. R., EKKAD, S., "Effect of micro-roughness shapes on jet impingement heat transfer and fin-effectiveness", International Journal of Heat and Mass Transfer, 132, 80–95, 2019.
- [13] KLINE, S.J., MC-CLINTOCK, F.A., "Describing uncertainties in single-sample experiments", Mechanical Engineering, 75, 1, 3–8, 1953.
- [14] MARKAL, B., AYDIN, O., "Experimental investigation of coaxial impinging air jets", Applied Thermal Engineering 141, 1120–1130, 2018.
- [15] OZMEN, Y., "Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers", Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 355–363, 2011.
- [16] OZTEKIN E., AYDIN, O., AVCI, M., "Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces", International Communications in Heat and Mass Transfer, 44, 77–82, 2013.



ÖZGEÇMİŞ

Burak MARKAL

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. 1985 yılı Trabzon doğumludur. 2007, 2010 ve 2016 yıllarında, sırasıyla, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini tamamlamıştır. Mikrokanallarda kaynamalı akış, jet akışları, ısı ve kütle transferi, ısı boruları, mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, vorteks tüpler ve dönmeli akışlar konularında çalışmaktadır.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, titreşimli biyolojik akışlar, ısı ve kütle transferi, mikropolar akışkanlar, ısıl enerji depolama, gözenekli ortamlarda aktarım, Newtonumsu olmayan akışkanlar dinamiği, kapalı ortamlarda doğal ve karma taşınım, gaz ışınlı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği konularında çalışmaktadır. Yüzün üzerinde uluslararası saygın dergide yayınlanmış makalesi, uluslararası saygın bir yayınevi tarafından basılan bir kitap bölümü, çok sayıda yurtiçi ve yurtdışı bildirisi mevcuttur.