



Dönmeli Eş-Eksenli Hava Jetinin Isıl Davranışının Yakın Çarpma Mesafeleri için Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of Thermal Behavior of Swirling Coaxial Impinging Air Jet for Near-Field Impingement Cases

Burak Markal

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 53100 Rize, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 17/03/2020

Kabul / Accepted: 17/04/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 19/04/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

Öz

Bu çalışmada, yakın çarpma mesafesi değerlerinde, dönmeli eş-eksenli çarpan jetlerin ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı boyutsuz lüle-plaka arası mesafeler ($H / D = 0.2, 0.5, 0.75, 1.0$) ve debi oranlarında ($Q^* = 0.33, 0.5, 0.66$) çalışılmış ve boyutsuz lüle-plaka arası mesafe ile debi oranının ısı performans üzerindeki bütünlük etkisi araştırılmıştır. Deneysel olarak, toplam debi 30 L/dk değerinde sabit tutulmuş olup; ısıtma gücü, tüm koşullarda 18.2 W değerine ayarlanmıştır. Ayrıca, çarpma plakasının sıcaklık dağılımları üzerinden konvansiyonel dairesel jetlerle karşılaştırma da yapılmıştır. Genel eğilim olarak, artan debi oranı ile alan ağırlıklı ortalama Nusselt sayıları artmakta ve yerel Nusselt sayısı dağılımları radyal doğrultuda daha üniform karaktere sahip olmaktadır. En küçük debi oranı ve lüle-plaka arası mesafe için çarpma bölgesinde ısı transferinin üniformluğunda belirgin bir iyileşme meydana gelmektedir. Dönmeli eş-eksenli jetler, konvansiyonel tip jetlere kıyasla ısı performansı önemli ölçüde artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Yakın çarpma mesafesi, ısı performans, dönmeli eş-eksenli jet”

Abstract

In this study, at the near-field impingement cases, the heat transfer characteristics of swirling coaxial impinging jets are experimentally investigated. In this context, different values of the dimensionless nozzle-to-plate distance ($H / D = 0.2, 0.5, 0.75, 1.0$) and the flow rate ratio ($Q^* = 0.33, 0.5, 0.66$) are studied; and the combined effect of dimensionless nozzle-to-plate distance and flowrate ratio on thermal performance is researched. In the experiments, the total flow rate is kept constant at the value of 30 L/min; while the heating power is adjusted at the value of 18.2 W. A comparison with the conventional round jets is also performed over the temperature distribution of impingement plate. As a general trend, with increasing flowrate ratio, the area averaged Nusselt numbers increase, and the distribution of local Nusselt numbers has a more uniform character in the radial direction. For the smallest flowrate ratio and nozzle-to-plate distance, a significant enhancement occurs in the uniformity of heat transfer at the impingement region. Swirling coaxial jets improve the thermal performance much more compared to the conventional type jets.

Key Words

“Near-field impingement, thermal performance, swirling co-axial jets”

1. Giriş

Teknolojinin ivmelenerek gelişmesi, malzeme işleme tekniklerinin çeşitliliğini ve hassasiyetini artırmakta ve mikro ölçekli boyutlara sahip iletken ve/veya yarı iletken bileşenlerin üretimine olanak sunmaktadır. İlgili bileşenleri içeren elektronik sistemlerin boyutları küçülürken, işlem kapasiteleri artmakta ve bunun sonucu olarak da birim yüzey alanında açığa çıkan ısı yoğunluk değerleri yükselmektedir. Bu kapsamda, sistem performansının sürdürülebilirliğini sağlamak ve cihazların kullanım ömrünü uzatmak için etkili soğutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çarpan hava jetleri, ilgili gereksinimi karşılama potansiyeline sahip olan ısı kontrol teknikleri arasında yer almaktadır. Çarpan jet akışlarını önemli kılan yönlerden biri, sadece elektronik bileşenlerin soğutulmasında değil, hızlı ve yüksek düzeyli ısı ve kütle transferi gerektiren birçok endüstriyel uygulamada aktif olarak kullanılmakta olmasıdır. Kağıt ürünleri ve yiyeceklerin kurutulması (Kurnia vd., 2013), gaz türbini kanatlarının soğutulması (Biegger et al., 2018), hurda metallerin eritilmesi ve camın şekillendirilmesi (Singh ve Chander, 2018) ve benzer örnekler, uygulama alanları arasında yer almaktadır.

Çarpan jetler; çarpma (durma) bölgesi, duvar jet bölgesi ve serbest jet bölgesi olmak üzere üç temel akış bölgesine sahiptir (Ikhlaf vd., 2019; Chang ve Shen, 2020). İlgili bölgelerdeki hidrodinamik davranış, lüle ve çarpma plakasının tasarımı gibi geometrik özelliklere ve akışkan türü, akışkanın debisi (veya jetin lüleden çıkış hızı) ve lüle-plaka arası mesafe gibi çalışma koşullarına kuvvetle bağlıdır. Ayrıca, hidrodinamik özellikler ile ısı transferi arasında güçlü bir ilişki vardır. Ahmed vd. (2017) tarafından ifade edildiği gibi, akış karışımının iyileşmesi ve hedef yüzey üzerindeki vorteks oluşumları ısı performansı artırmaktadır. Bu sebeple, dönmeli jet oluşturan lüle tasarımlarına yönelik çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Huang ve El-Genk (1998) karşılaştırmalı bir analiz yaparak çok kanallı, dönmeli ve geleneksel çarpan jetlerin ısı performansını incelemiştir. Dönmeli ve çok kanallı jetleri oluşturmak için kullanılan lüle; bir tüpün içerisine yerleştirilmiş ve dış yüzeyi boyunca helisel veya düz kanallar açılmış çubuk şeklinde tasarlanmıştır. Akış görüntüleme destekli (duman akışı ve duman tel yöntemi) yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, dönmeli jetlerin hem ısı üniformluk hem de ısı aktarım hızı açısından diğer türlerden daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Lee vd. (2002) yaptıkları deneysel çalışmada, farklı dönme açılarına sahip kanatçıklı tip lüle kullanmıştır. Boyutsuz lüle-plaka mesafesinin küçük değerlerinde ($H/D = 2$); dönmeli jetlerin, dönme üretici kullanılmayan duruma kıyasla, ortalama Nusselt sayısını artırdığını; çarpma mesafesinin büyük değerlerinde dönme etkisinin sönümlendiğini ve dönmeli akışın plaka merkezi yakınında daha etkin olduğunu belirtmişlerdir. Bakirci ve Bilen (2007) sıvı kristal tekniği kullanarak dönmeli, çok kanallı ve geleneksel çarpan jet akışlarının ısı davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çok kanallı çarpan jetler için elde edilen yerel Nusselt sayısı değerlerinin dönmeli ve geleneksel jetler için elde edilenlerden daha yüksek olduğunu, artan dönme açısının ısı performansı azalttığını ancak üniformluğu artırdığını ve ısı transferinin pik yaptığı noktanın plaka merkezinden dışa doğru uzaklaştığını ifade etmişlerdir. Yang vd. (2010), içerisine yönlendirme kanadı takılabilen halkasal bir boşluktan salınan çarpan jet akışının ısı ve akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Halkasal dönmeli akışın hem basınç dağılımı hem de ısı açıdan sağladığı üniformluk düzeyinin, çarpma mesafesiyle belirgin bir şekilde değiştiğini ve çarpma mesafesinin büyük değerlerinde klasik halkasal jete göre üstünlük sağladığını belirtmişlerdir. Nuntadusit vd. (2012) 3 x 3 formunda düzgün sıralı olarak konumlandırılmış çoklu dönmeli jetlerin ısı transferi ve akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemiş ve sonuçları çoklu konvansiyonel jetlerle karşılaştırmışlardır. Jete dönme hareketini kazandırmak için dairesel kanalların içerisine bükümlü şeritler yerleştirmişlerdir. Değişken parametre olarak jet merkezleri arasındaki mesafeyi kullanmışlar ve tüm koşullarda dönmeli jetlerin konvansiyonel jetlerden daha iyi ısı transfer performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Nanan vd. (2012) dönmeli çarpan jetlerin ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Jet üretici olarak kullanılan lüleler, farklı büküm oranlarına sahip şeritlerin dairesel bir kanal içerisine yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Küçük çarpma mesafelerinde ($H/D = 2$ ve 4) ve büküm oranının büyük değerlerinde ısı transferinin belirgin bir şekilde arttığını ve ilgili koşullarda dönmeli jetlerin konvansiyonel jetlerden daha iyi bir performans sergilediğini belirtmişlerdir. Eiamsa-ard vd. (2015) termokromik sıvı kristal tekniğini kullanarak, aynı ve ters yönlerde dönme hareketinin sağlandığı jet akışlarının ısı karakteristiklerini incelemiştir. Isı transferinin artan Reynolds sayısı ve azalan lüle-plaka arası mesafe ile arttığını ve küçük çarpma mesafelerinde ($H/D = 1$ ve 2) dönmeli jetlerin geleneksel jetlerden çok daha iyi ısı performans sunduğunu belirtmişlerdir. Wannassi ve Monnoyer (2015) kaydırılmış sıralı çoklu dönmeli ve konvansiyonel jet akışlarını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Dönme hareketinin, lüle çıkışından sonraki kısa bir mesafe boyunca etkin olduğunu ve mesafe arttıkça çevresel yayılma nedeniyle etkisini hızla kaybettiğini vurgulamışlardır. Ahmed vd. (2016) dönme sayısı, boyutsuz lüle-plaka mesafesi ve Reynolds sayısının dönmeli çarpan jetlerin ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Artan dönme sayısı ile ısı performansta meydana gelen iyileşmenin yakın çarpma mesafelerinde ($H/D \leq 2$) görüldüğünü; artan çarpma mesafesinin ısı transferini olumsuz etkilediğini ve büyük çarpma mesafelerinde ve yüksek dönme sayılarında Nusselt sayısı dağılımının daha üniform bir karaktere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Xu vd. (2017) bir çubuk içerisine vida oyuğu formunda açılmış helisel dört kanala sahip lüle kullanarak, dönmeli jetlerin ısı davranışını sayısal olarak incelemiştir. Dönmeli jetin, ısı transferi açısından radyal üniformluğu artırdığını ve bu durumun küçük çarpma mesafelerinde ($H/D \leq 3$) daha belirgin olduğunu ifade etmişlerdir. Lüle-plaka arasındaki mesafenin önemini vurgulamışlardır. Uddin vd. (2019); dönmeli jet üretici kullanımı, akışın belli bir frekans ve genlikte uyarılması ve akış boyunca bir silindir yerleştirilmesi şeklinde üç farklı yöntemin ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Uyarım frekans düzeyinin (jet hızındaki değişimle ilgili) ısı transferindeki iyileşme üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Chang ve Shen (2020) farklı dizilişlere sahip dönmeli çarpan çoklu jetlerin karşılaştırmalı analizini yapmıştır. Dönmeli jetler bükümlü şeritlerle oluşturulmuştur. Artan çarpma mesafesi ile ortalama Nusselt sayılarının (merkez bölgedeki) azaldığını fakat ısı transferinin üniform dağılımının iyileştiğini belirtmişlerdir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar incelendiği zaman, dönmeli jetlerin ısı performansıyla lüle-plaka arasındaki mesafe ve dönmeli jetin oluşum şekli (geometrik tasarım) arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Dönmeli jetlerin ısı transferi açısından sunduğu avantajın altında yatan fiziksel sebep, teğetsel hız bileşenine sahip olmalarıdır (Huang ve El-Genk,1998; Ianiro ve Cardone, 2012). Teğetsel hız bileşeni, akışın radyal yönde dış bölgelere doğru açılmasını sağlayarak çarpma plakasının akışkanla etkileşen alanlarının genişlemesine yol açar; ancak bu durumda, eksenel hızda (jet merkez doğrultusu) meydana gelecek azalma, özellikle durma bölgesinde ısı transferinin kötüleşmesine sebep olur (Huang ve El-Genk,1998). Ahmed vd. (2017) de eksenel hızın azaldığı merkezi bölgeyi ölü bölge olarak nitelendirmiş ve ısı transferindeki azalmanın bu bölgenin varlığına atfedildiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, dönmeli akışın eksenel akış ile desteklendiği jetler, bir başka ifade ile dönmeli eş eksenli jetler, plaka boyunca ısı transferi şiddetinin (*intensity*) ve dağılım düzgünlüğünün (*uniformity*) iyileştirilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Isı transferinin üniformluğu, hedef yüzey boyunca sıcaklığın üniform dağılımı ile ilgili olup; pratikte, ısı gerilmelerin oluşmaması ve/veya minimuma indirilmesi açısından önem arz etmektedir. Buna rağmen, mevcut literatür incelendiğinde, dönmeli eş-eksenli çarpan jetlerin ısı transferi uygulamalarına yönelik çok az sayıda deneysel çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, genellikle, turbo motor, endüstriyel fırın, brülör ve benzeri sistemlerde karışımı iyileştirerek yanma işleminin daha verimli gerçekleşmesini temel alan (Dixon vd. 1983; Ahmed ve Sharma, 2000) veya jet sesini azaltmayı hedefleyen (Balakrishnan ve Srinivasan, 2017) serbest jetlerin hidrodinamik incelemesine yönelik çalışmalardır. Isıl kontrol açısından ise deneysel olarak sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Markal (2018) debi oranı ve lüle-plaka arası mesafenin dönmeli eş-eksenli çarpan jetlerin ısı transferi ve akış (duvar basınç dağılımı) karakteristikleri üzerindeki; Markal (2019) ise toplam debi ve lüle-plaka arası mesafenin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemiş ve konvansiyonel tek dairesel jetlere kıyasla üstün olduklarını göstermiştir.

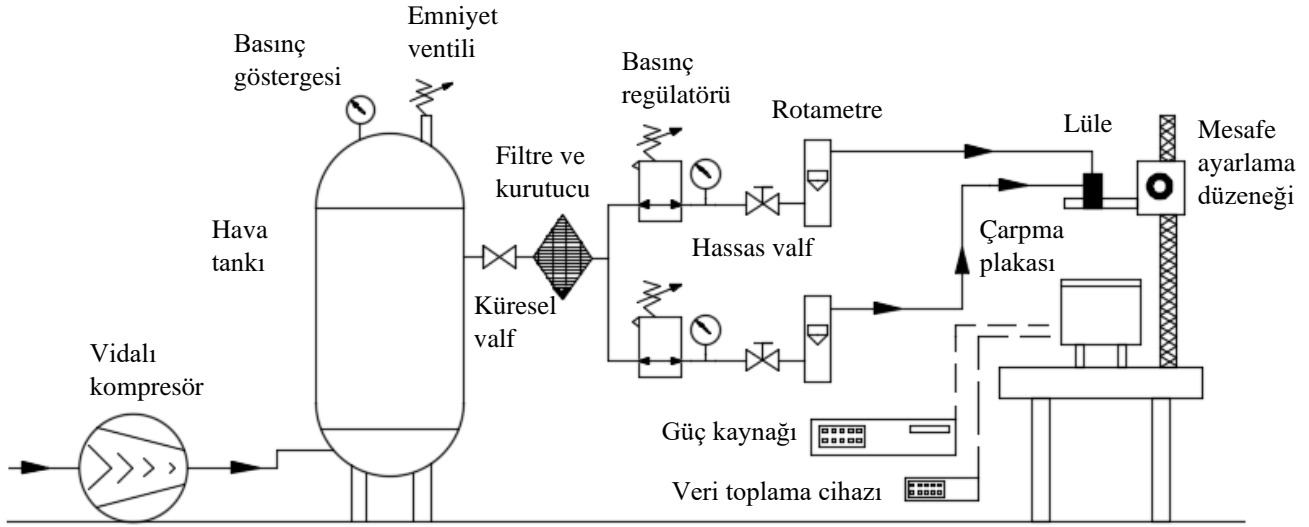
İlgili literatür dikkate alındığında, dönmeli jetlerin genellikle yakın çarpma mesafelerinde etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki paragraflarda vurgulandığı üzere, dönmeli eş-eksenli çarpan jetlerin ısı transfer davranışını inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, yakın çarpma mesafeleri için ($H/D \leq 1$), kapsamlı deneyler yaparak dönmeli eş-eksenli sınırlandırılmış çarpan jetlerin ısı transfer davranışını incelemektir. Bu kapsamda, mevcut literatürden farklı olarak, ilk kez, yakın çarpma mesafelerinde detaylı bir tarama yapılmış ve düşük bir debi değerinde çalışılmıştır. Ayrıca, yüzeydeki sıcaklık dağılımı üzerinden konvansiyonel jetlerle karşılaştırma yapılmıştır.

2. Deneysel Kurulum ve Hesaplama Yöntemi

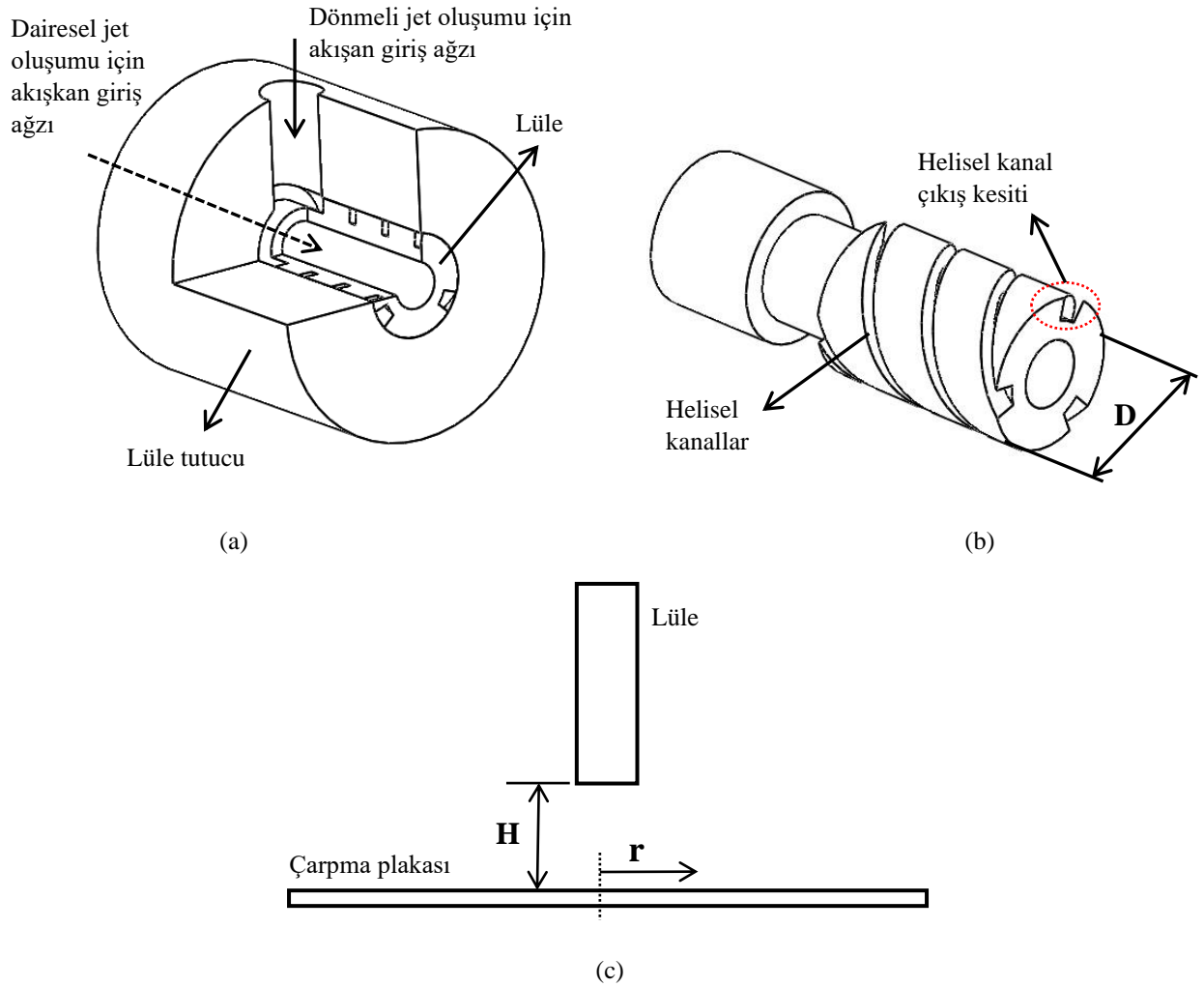
Çalışmada kullanılan deneysel ekipmanın şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. İlgili deney düzeneği, yazarın önceki çalışmaları (Markal, 2018; Markal ve Aydın, 2018) kapsamında da kullanılmıştır. Hava akışının kaynağı vidalı kompresör olup, ortam koşullarındaki hava, kompresör aracılığıyla bir tanka doldurulmaktadır. Hava tankı kullanımı iki önemli avantaj sağlar: (1) akışın sürekliliğinde rol oynar ve (2) kompresörün sürekli olarak devrede kalmasını önler. Tanktan çıkan iş akışkanı, filtre ve kurutucu ünitesinden geçirilir. Böylece iş akışkanı; sistemde bulunan cihazları olumsuz etkileyebilecek nem ve kirlenici partiküllerden arındırılmış olur. Filtreden sonra akış hattı iki kola ayrılmaktadır. Bunlardan biri eş-eksenli lülenin dönme hareketi sağlayan helisel akış pasajlarıyla, diğeri ise lüle merkezinde yer alan ve dairesel jet oluşturan akış pasajıyla irtibatlıdır. Her bir hat üzerinde üç farklı cihazdan oluşan bir ölçüm ve ayar seti bulunmaktadır. Bu cihazlar: (1) basınç regülatörü, (2) hassas ayar valfi ve (3) rotametredir. Böylece, lülenin her bir bölümündeki debi değeri birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Lüle ile plaka arasındaki düşey mesafe, bir başka ifade ile çarpma mesafesi (H), lülenin bağlı olduğu hassas bir düzenekle istenilen değere ayarlanabilmektedir. Lüle ile mesafe ayarlama düzeneği arasındaki bağlantı ise çarpma plakasına paralel olarak konumlandırılan sınırlandırma plakası ile sağlanmaktadır. Lüle çıkışı ile sınırlandırma plakası yüzeyi Şekil 1'den görüldüğü üzere aynı paralelde bulunmaktadır. Lüleden salınan jet, hedef yüzeye (çarpma plakası) çarpar. Lüle ve hedef yüzeye ait detaylar ileriki paragraflarda verilmiştir. Çarpma plakası, AC güç kaynağı ile irtibatlı olan esnek bir ısıtıcı aracılığıyla ısıtmakta olup, test bölgesindeki sıcaklık değerleri bir veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayarda depolanmaktadır. Deney düzeneğinde yer alan cihazların marka/model bilgileri ve doğruluk düzeyleri yazarın önceki çalışmasında (Markal, 2018) belirtilmiştir.

Deney sistemindeki en önemli parça lüle olup, lüleyi de kapsayacak şekilde test bölgesine ait detaylar Şekil 2.a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 2a'da Delrin malzemeden üretilmiş bir tutucu içerisine yerleştirilen lülenin montajlı halinin bölgesel kesit görüntüsü; Şekil 2b'de çevresel olarak özdeş üç helisel akış pasajını ve iç bölümde dairesel akış pasajını içeren lülenin tekil görüntüsü; Şekil 2c'de ise lüle ile çarpma plakasının yerleşimine ait şematik resim verilmiştir. Lüle pirinç malzemeden imal edilmiş olup, toplam uzunluğu, dış çapı ve içerisinde yer alan dairesel kanalın çapı, sırasıyla, 29 mm, 10 mm ve 4.5 mm'dir. Her bir helisel kanalın yüksekliği 1.5 mm, genişliği ise 2 mm'dir. Çalışma kapsamında tek bir lüle kullanılmış olup, lüledeki helislere ait dönme sayısı ve dönme açısı, sırasıyla, 0.86 ve 45°'dir. Delrin tutucunun dış çap ve uzunluk değerleri ise, sırasıyla, 30 mm ve 29 mm'dir. Delrin parça, hem helisel kanallar için kapalı akış pasajı oluşumunu sağlamakta, hem de dönmeli ve dairesel jet girişleri için rakor bağlantılarının yapılmasına olanak sunmaktadır.

Lüleden çıkan akışkan, dairesel bir hedef yüzeye çarpmaktadır. Isı transferinin gerçekleştiği bu yüzey de test bölgesinin bir diğer önemli bileşenidir. Çarpma plakası bakır malzemeden üretilmiş olup, çapı 46 mm ve kalınlığı 1.5 mm'dir. Plakanın alt yüzeyine sıcaklık ölçümleri için merkez hattı boyunca (radyal doğrultuda) mikro termoelemanlar yerleştirilmiştir. Termoeleman ile plaka üst yüzeyi arasındaki mesafe 0.2 mm'dir. Çarpma plakasının alt yüzeyine AC güç kaynağı ile bağlantılı olan esnek bir ısıtıcı yapıştırılmıştır. Böylece deneyler boyunca test bölgesine 18.2 W değerinde sabit ısı yük uygulanmıştır. İlgili plaka kalınlığı ve esnek ısıtıcının yerleşimi (aynı çap değeri), plaka boyunca üniform ısı akısına ve tek boyutlu ısı geçişi kabulüne olanak sunmaktadır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan deneysel ekipmanın şematik gösterimi



Şekil 2. Test bölgesine ait detaylar: (a) Lüle tutucu içindeki lülenin bölgesel kesit görünüşü; (b) Eş-eksenli lüle; (c) Lüle-plaka yerleşimi

Deney prosedürü kısaca şu şekilde ifade edilebilir: Mesafe ayarlama düzeneği yardımıyla lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki düşey mesafe bir başka ifade ile çarpma mesafesi ayarlanır. Kompresör çalıştırılır ve lülenin her iki bölümüne giden hatların üzerinde yer alan basınç regülatörü-hassas ayar valfi-rotametre üçlüsü aracılığıyla istenilen debi oranı ayarlanmış olur. Güç kaynağı

çalıştırılarak test bölgesine istenilen ısı yük değeri uygulanır. Kararlı rejime erişilince veri toplama cihazı yardımıyla sıcaklık değerleri bilgisayarda depolanır. Daha sonra debi oranı veya yükseklik değiştirilerek bir sonraki deney koşuluna geçilir ve belirtilen işlem adımları tekrarlanır.

Belirsizlik analizinde, Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yöntemden yararlanılmış; Eşitlik I, III, VI ve VII kullanılarak Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı için maksimum belirsizlik değerleri, sırasıyla, $\pm \% 3.8$ ve $\pm \% 4.6$ olarak belirlenmiştir.

Dönmeli eş-eksenli jetlerin farklı çalışma koşulları için ısı performans incelemesi, Nusselt sayıları üzerinden yapılmıştır. Bu kapsamda; alan-ağırlıklı ortalama, yerel ve durma noktası (plaka merkezi) Nusselt sayıları göz önüne alınmıştır. Yerel ve alan-ağırlıklı ortalama Nusselt sayıları, sırasıyla, aşağıdaki gibi ifade edilir:

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

$$Nu_{avg}(r) = \frac{1}{A_r} \int_{A_r} Nu dA_r \quad (II)$$

Burada; D , h , k ve A_r terimleri, sırasıyla, lüle dış çapını (Şekil 2b'de gösterilmiştir.), yerel ısı transfer katsayısını, ısı iletim katsayısını ve hedef yüzey merkezinden itibaren radyal mesafe (r) ile değişen yüzey alanını ifade etmektedir. Radyal mesafe (r), Şekil 2c'de gösterilmiş olup, bu değer lüle dış çapına bölünmesi ile boyutsuz radyal mesafe ($r^* = r / D$) elde edilmektedir. Lülenin geometrik yapısı sebebiyle (farklı kesite sahip eş eksenli iç ve dış kanalların varlığı), Nusselt sayısının hesaplanmasında, ilgili literatüre uygun olarak (Markal, 2018) lüle dış çapı kullanılmıştır. Isı transfer katsayısı ise aşağıdaki formüle göre belirlenir:

$$h = \frac{q_{cv}}{A_{hs}(T_s - T_j)} \quad (III)$$

Eşitlik (III)'te yer alan terimler arasında; q_{cv} , taşınım ile ısı transfer miktarını; A_{hs} , yüzey alanını; T_s , yüzey sıcaklığını ve T_j , jet sıcaklığını (lüle çıkış sıcaklığı) simgelemektedir. Taşınım ile ısı transfer miktarı ise, literatüre (Öztek vd., 2013; Ahmed vd., 2016) uygun olarak, uygulanan ısı yük değerinden iletim ve ışınım sonucu gerçekleşen ısı transfer miktarlarının (ısı kayıpların) çıkartılmasıyla belirlenir.

Çalışmada etkisi incelenen parametreler, boyutsuz lüle-plaka arası mesafe (H / D) ve debi oranıdır (Q^*). Boyutsuz lüle plaka arası mesafe, lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki düşey mesafenin (H), lüle çapına (D) bölünmesiyle elde edilir. Debi oranı ise, helisel akış pasajlarındaki toplam hacimsel debinin (Q_s), helisel ve dairesel akış pasajlarındaki debilerin toplamına (Q_{tot}) bölünmesiyle aşağıdaki gibi elde edilir:

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

Deneysel yöntemin doğrulanması kapsamında, konvansiyonel tek dairesel jet sonuçları üzerinden (çalışmadaki debi aralığını içerecek şekilde) literatürle karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar ayrı bir başlık altında verilmiştir. Şekil 3'te, durma noktası Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ile değişimi verilmiş olup, her iki boyutsuz sayının konvansiyonel tek dairesel jetlere yönelik tanımlanmış ifadeleri sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$Nu_{st} = \frac{hD_i}{k} \quad (V)$$

$$Re = \frac{\rho u_m D_i}{\mu} \quad (VI)$$

Yukarıdaki eşitliklerde; D_i , lülenin dairesel akış pasajının çapı (lülenin iç çapı); ρ , yoğunluk; μ , dinamik viskozite ve u_m ortalama hızdır. Eşitlik (V)'teki durma noktası ifadesi, çarpma plakasının geometrik merkezini ifade etmektedir. Ortalama hız aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir:

$$u_m = \frac{Q}{A_i} \quad (\text{VII})$$

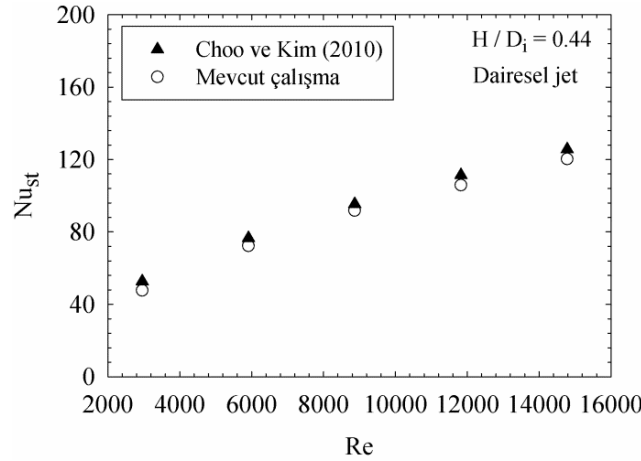
Burada; A_i , lülenin dairesel akış pasajının kesit alanını ifade etmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada, yakın çarpma mesafelerinde ($H/D = 0.2, 0.5, 0.75, 1.0$), farklı debi oranları için ($Q^* = 0.33, 0.5, 0.66$), dönmeli eş-eksenli jetlerin ısıl incelemesi yapılmıştır. Sabit bir ısıl yük (18.2 W) ve toplam debi değerinde (30 L/dk) çalışılmıştır.

3.1 Doğrulama deneyleri

En yaygın çarpan jet akışı türü, dairesel (veya dörtgen formundaki geometriler) tekil çarpan jetler olup, ilgili literatürde konvansiyonel tip olarak adlandırılırlar. Bu doğrultuda, deneysel prosedürün kontrolü için dairesel tek jetlerle ilgili olarak literatürde yer alan ve benzer deneysel koşullarda (hava, sınırlanmış jet ve $H/D \leq 1$) geliştirilen bir bağıntı seçilmiş ve karşılaştırma sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, dairesel jetler için elde edilen deneysel veriler, Choo ve Kim (2010) tarafından önerilen korelasyon kullanılarak elde edilen tahmin değerleriyle yakın sonuçlar vermektedir. Karşılaştırmalı sonuçlara ek olarak, plaka merkezindeki yerel Nusselt sayısını ifade eden durma noktası Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimine bakıldığında, artan Reynolds sayısı ile durma noktası Nusselt sayılarının arttığı görülmektedir. Bu davranış, jet momentumunda meydana gelen artışın bir sonucudur (Nanan vd., 2012; Eiamsa-ard vd., 2015).

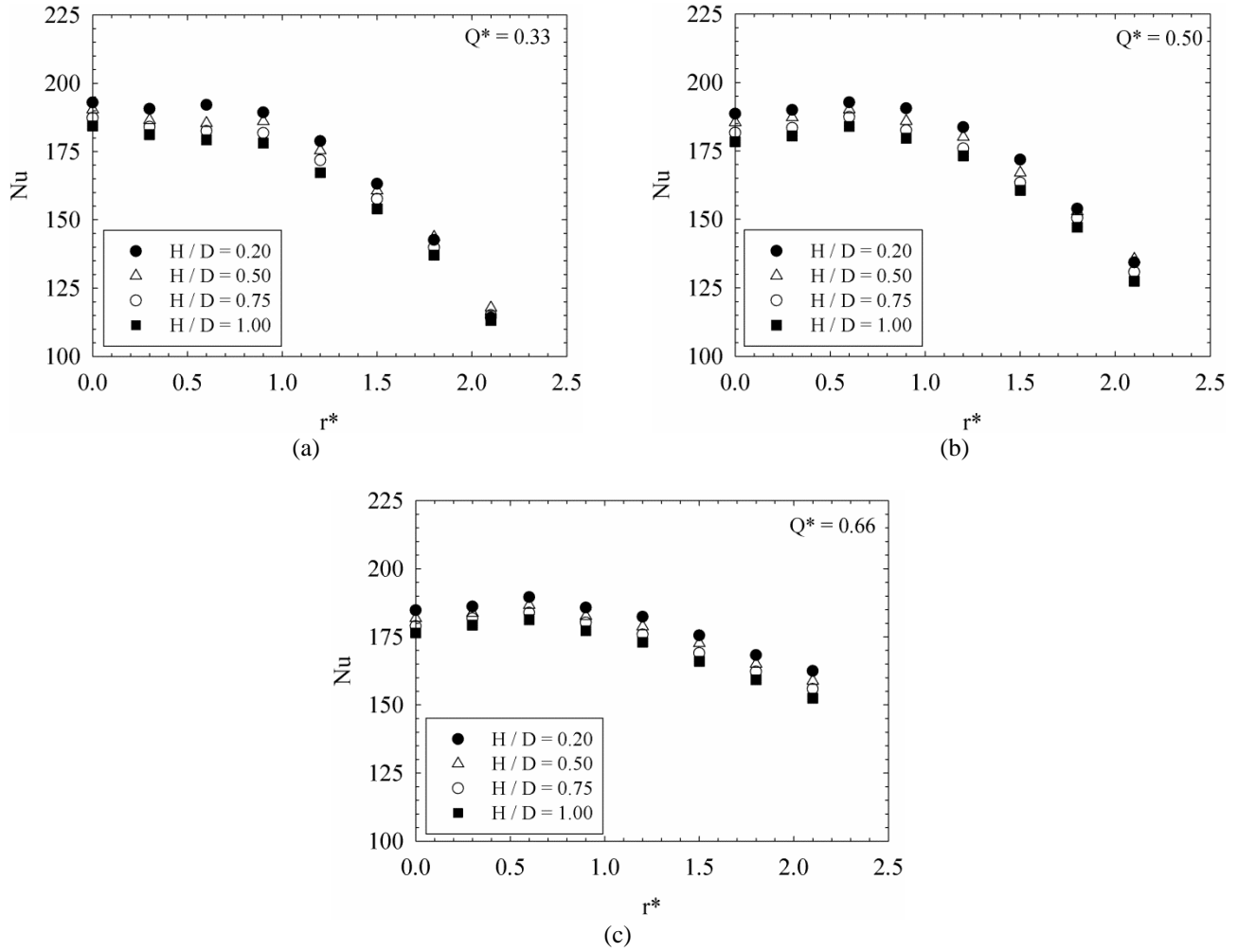


Şekil 3. Doğrulama deney sonuçları

3.2 Çarpma mesafesinin ısıl karakteristikler üzerindeki etkisi

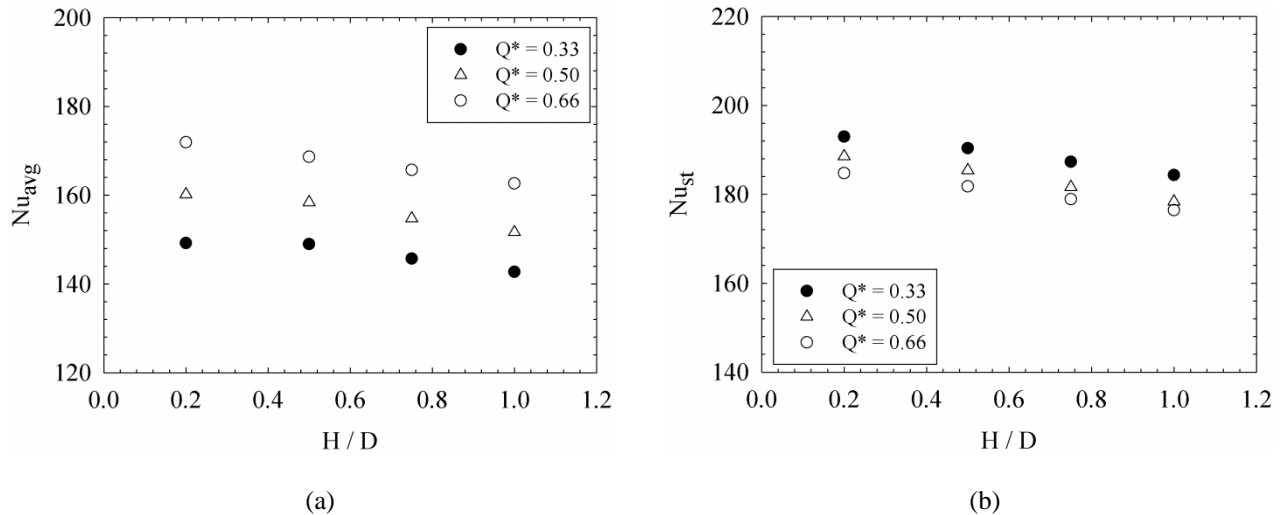
Lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki düşey mesafenin, bir başka ifade ile çarpma mesafesinin, ısı transfer davranışı üzerindeki etkisi, farklı debi oranları için Şekil 4'te verilmiştir. Bütün debi oranlarında, genel karakter olarak, artan çarpma mesafesi ile yerel Nusselt sayıları tüm radyal doğrultu boyunca azalmaktadır. Giriş bölümünde de vurgulandığı gibi çarpma mesafesi, jet akışlarının ısıl performansıyla yakından ilişkilidir. Burada, altta yatan etkin fiziksel mekanizma, jetin durgun olan çevre ortamına doğru yayılması ve yayılım düzeyinin artan çarpma mesafesi ile artış göstermesidir. Yayılımın sonucu olarak, jetin hedef yüzeye çarpmadan önce eksenel momentumunda azalma meydana gelir, dolayısıyla hızı azalmış olur ve ısı transferi kötüleşir (Eiamsa-ard vd., 2015). Walker vd., (1987) ve Colucci ve Viscanta, (1996) tarafından yapılan çalışmaların analiz edilmesiyle, bir diğer muhtemel sebep girdap oluşumları ve girdap-yüzey etkileşimleriyle ilişkilendirilebilir. Azalan çarpma mesafesi ile hedef yüzeye yakın olan vorteks halkaları, sınır tabakaya etki ederek daha kaotik ve/veya türbülanslı akışa yol açar. Sınır tabakanın parçalanması veya incilmesi sonucu ısı transferinde iyileşme görülür. Ayrıca, Ahmed vd. (2017) tarafından vurgulandığı gibi akış karışımındaki iyileşme ve yüzey üzerindeki vorteks oluşumları ısıl performansı artırıcı yönde etki yapmaktadır.

Şekil 4'te, yerel Nusselt sayılarının radyal yöndeki dağılımlarına bakıldığında, ($r^* \geq 0.6$ için) artan radyal mesafeyle Nusselt sayılarının genel karakter olarak azaldığı görülmektedir. Azalmanın sebebi, duvar jeti bölgesinde sınır tabaka kalınlığının artmasına atfedilebilir (Ianiro ve Cardone, 2012). Burada, azalma hızının debi oranıyla değiştiği de belirtilmelidir. Ayrıca, Nusselt sayısı dağılımına bakıldığında, en küçük lüle-plaka arası mesafe ve debi oranı için çarpma bölgesinde ısı transferinin üniformluğunda belirgin bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu iyileşmenin sebebi, düşük debi oranları ve oldukça yakın (2 mm) çarpma mesafesinin birleşik etkisiyle açıklanabilir. Düşük debi oranlarında merkez hattındaki jetin (dairesele jetin) debi değeri fazladır. Çok kısa çarpma mesafesinde, sınırlandırma plakasının da etkisiyle, iç dairesel ve dış helisel jetler arasındaki etkileşim şiddeti artar. Bu olay, çarpma bölgesinde ısıl üniformluğun artmasına yol açar. Ayrıca, Colucci ve Viscanta (1996) tarafından sunulan bulgular incelendiği zaman, türbülanslı karışım bölgesinin jet eksenine nüfus etmesinin, olası fiziksel sebeplerden biri olacağı da belirtilebilir.



Şekil. 4. Çarpma mesafesinin farklı debi oranları için ısı davranış üzerindeki etkisi

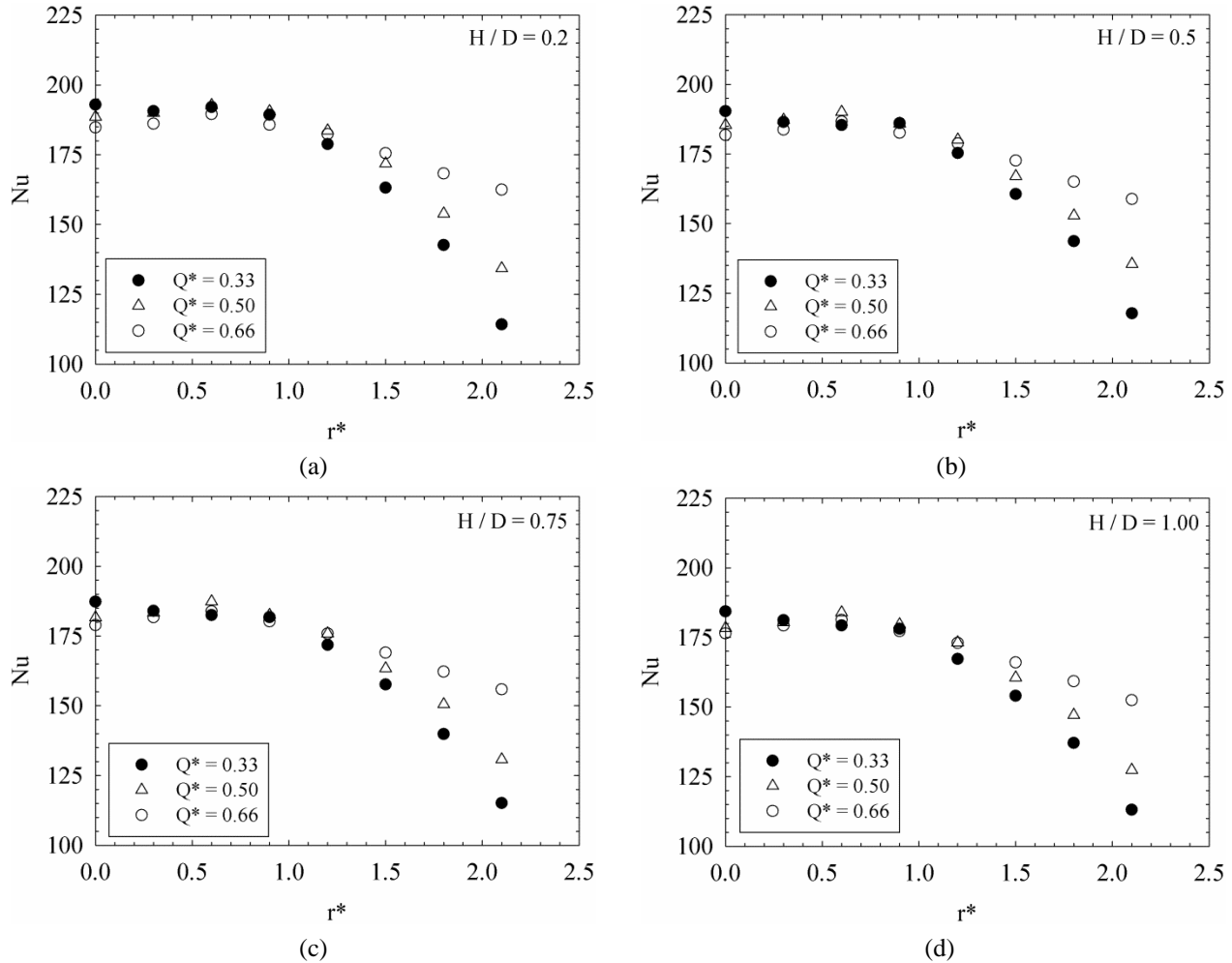
Şekil 5a ve b'de, sırasıyla, alan ağırlıklı ortalama Nusselt sayıları ve durma noktası Nusselt sayılarının farklı çalışma koşullarındaki değişimleri verilmiştir. Lüle-plaka mesafesinin etkisi açısından değerlendirildiğinde, ilgili grafiklerden, hem ortalama Nusselt sayısının hem de durma noktası Nusselt sayısının artan çarpma mesafesi ile azaldığı veya tam tersi olarak azalan çarpma mesafesi ile arttığı görülmektedir. Yüzdesel değişimler üzerinden sayısal olarak değerlendirme yapıldığında, ortalama Nusselt sayısı ve durma noktası Nusselt sayılarının her ikisinin de ilgili deneysel aralık kapsamında, azalan lüle-plaka arası mesafe ile yaklaşık olarak %5.7 oranında (maksimum değişim miktarı) arttığı görülmektedir.



Şekil. 5. (a) Ortalama Nusselt sayısı ve (b) durma noktası Nusselt sayısının farklı debi oranlarında çarpma mesafesi ile değişimi

3.3 Debi oranının ısı karakteristikleri üzerindeki etkisi

Şekil 6a-d'de, farklı çarpma mesafeleri için, debi oranının ısı davranış üzerindeki etkilerini veren grafikler sunulmuştur. Isı transfer karakteristikleri; yerel Nusselt sayılarının büyüklükleri, ortalama Nusselt sayısı (Şekil 5'ten yararlanarak), ısı transfer üniformluğu ve durma noktası Nusselt sayısı olmak üzere dört farklı açıdan değerlendirilecektir. Nusselt sayısı dağılımı dikkate alındığında, artan debi oranı ile radyal doğrultuda dış bölgelerde (plaka merkezine göre), yerel Nusselt sayılarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Dönmeli akışlarda, dönme hareketinin sebebi akışın teğetsel hız bileşenine sahip olmasıdır. Bu hareket şekli, akışın radyal doğrultuda dışa doğru açılmasına yol açarak, literatürde de belirtildiği üzere (Huang ve El-Genk,1998; Ianiro ve Cardone, 2012), hedef plaka yüzeyinin jet akışından etkilenen bölümünün genişlemesini sağlar. Dönmeli çarpan jetlerin akış yapısı, konvansiyonel jetlerin üç bölgeli akış yapısından farklıdır. Huang ve El-Genk (1998) tarafından sunulan akış bölgeleri dikkate alındığı zaman, dönmeli çarpan jetlere özgü olarak iki farklı akış bölgesinin oluştuğu söylenebilir: (1) çarpma bölgesinin merkezinde oluşan iç akış karışım bölgesi ve (2) çarpma bölgesinden sonraki radyal bölümde oluşan spiral akış karışım bölgesidir. Debi oranı, dönmeli jet akışı debisinin toplam debiye oranı olarak tanımlanmıştır. Artan debi oranı, dönmeli jet akışının kütle akışının artması anlamına gelmektedir. Böylece artan debi oranıyla; (1) çarpma bölgesi ve özellikle spiral akış karışım bölgesi genişler, (2) jetin eksenel, radyal ve teğetsel momentumu artar ve dolayısıyla yüzeyi süpüren akışkanın hızı artar, (3) türbülans ve akış karışımı iyileşir ve (4) vorteks halkalarının etki düzeyi artarak sınır tabakanın yenilenme frekansı artar (sınır tabaka daha etkin bir şekilde bozulur). Belirtilen fiziksel olaylar özellikle plaka merkezinden uzak bölgelerde görülür veya bir başka ifade ile uzak bölgelere doğru yayılmış olur. Bu nedenle, artan debi oranıyla, radyal yönde dış bölgelere doğru Nusselt sayıları daha yüksek değerler almaktadır. Bu sonuç, plaka merkezinden uzak bölgelerde, jet yayılımı ve sınır tabakanın kalınlığındaki artışla ısı transferinde meydana gelen kötüleşmeyi belli ölçüde önleyerek, ısı transferinin üniformluğunun artmasına da sebep olur.



Şekil. 6. Debi oranının farklı çarpma mesafeleri için ısı karakteristikleri üzerindeki etkisi

Debi oranı ile durma noktası ve ortalama Nusselt sayıları arasındaki ilişki Şekil 5'te verilmişti. Verilen bir lüle-plaka arası mesafe için, artan debi oranıyla, durma noktası Nusselt sayılarında belirli düzeyde azalma görülmektedir. Bu azalmanın muhtemel sebepleri şu şekilde açıklanabilir: Dönmeli jet akışlarında, Huang ve El-Genk (1998) tarafından belirtildiği gibi, çarpma bölgesi merkezinde iç akış karışım bölgesi oluşur. İlgili bölümde, ters akış meydana gelir ve bu durum akışkanla yüzeyin temasının kesilmesine yol açabilir. Ahmed vd. (2017) tarafından plaka merkezi için ifade edilen ölü bölge tanımı da bu fiziksel olayla ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak,

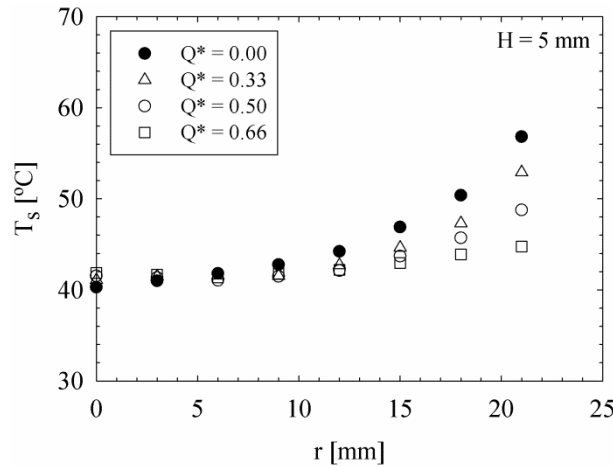
plaka merkezi yakınında Nusselt sayıları azalmış olur. Belirtilen durum, klasik dönmeli jetlere özgü olup, bu çalışmada eş-eksenli jet kullanılmasının amaçlarından biri de ilgili bölgede ısı transferindeki kötüleşmeyi önlemek veya azaltmaktır. Bu kapsamda iç dairesel akış pasajından, debi oranına bağlı olarak, farklı kütle akımlarında akışkan gönderilmekte ve ölü bölgenin ortadan kaldırılması veya olumsuz yöndeki etki düzeyinin azaltılması sağlanmaktadır. Debi oranının artması, iç dairesel jetin etki düzeyinin azalması (dairesel jetin momentumu azalır) ve dönmeli jet şiddetinin artması anlamına gelmektedir. Bu sebeple, artan debi oranıyla, durma noktası Nusselt sayısında azalma meydana gelmektedir ancak tüm durumlarda iç dairesel jetin varlığı (eş-eksenli jet) bu azalmayı sınırlandırarak özellikle yüksek debi oranlarında ısı transferinin üniform dağılımına katkı sunmaktadır. Artan debi oranıyla, durma noktası Nusselt sayılarındaki azalma düzeyi maksimum % 4.5'tir.

Şekil 5 incelendiği zaman, ortalama Nusselt sayılarının artan debi oranıyla belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, dış bölgede ortaya çıkan etkin süpürmenin bir sonucudur. Burada, Nusselt sayısının, alan ağırlıklı ortalama üzerinden hesaplandığı belirtilmelidir. Bu çalışmadaki deneysel aralık için artan debi oranıyla ortalama Nusselt sayılarında % 15.2'ye kadar artış meydana gelmektedir.

3.4 Dönmeli eş-eksenli jetlerin dairesel jetlerle karşılaştırılması

Dönmeli eş-eksenli jet için elde edilen sonuçlar, konvansiyonel dairesel tekil jet sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Her iki jeti kapsayan ortak bir karakteristik uzunluk tanımının yapılamaması sebebiyle (boyutsuzlaştırma açısından), sonuçlar yüzey sıcaklıkları üzerinden boyutlu formda Şekil 7'de verilmiştir. Burada, genel karakterin incelenmesine yönelik sadece $H = 5$ mm için sıcaklık dağılımı sunulmuştur. İlgili grafikte, debi oranının sıfır değeri, klasik dairesel jete karşılık gelmekte olup, bu durumda toplam debi sadece lülenin merkezindeki dairesel akış pasajına yönlendirilmektedir.

Şekil 7'den görüldüğü gibi, dönmeli eş-eksenli jet kullanıldığı zaman, sıcaklık dağılımının üniformluğunda belirgin bir iyileşme görülmektedir. Konvansiyonel jet durumundaki yüzey sıcaklıkları, özellikle radyal doğrultudaki dış bölgelerde, belirgin bir artış göstererek merkezdeki ve/veya merkez yakınındaki sıcaklık değerlerinden sapmaktadır. Buna karşın dönmeli eş-eksenli jet kullanıldığında, plaka merkezi yakınındaki ve dış bölgelerdeki sıcaklık değerleri arasındaki fark azalmaktadır. Bu durum ısıl üniformluğun bir göstergesidir. Ayrıca, artan debi oranıyla üniform dağılım iyileşmekte veya bir başka ifade ile radyal doğrultuda komşu istasyonlar arasındaki sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Bu sonucun arkasındaki fiziksel mekanizmalar önceki başlıklar altında detaylı olarak ifade edilmiştir. Kısaca, eş-eksenli dönmeli jet kullanımı; akışı radyal olarak dış bölgelere doğru genişletir, akış karışımını iyileştirir, girdap oluşumunu tetikler, ısıl sınır tabakanın etkin bir şekilde bozulmasına yol açar ve böylece ısı transferini iyileştirir. Buna karşın, eş-eksenli jet durumunda, plaka merkezindeki sıcaklık değerlerinde kısmi bir artış görülmektedir. Bunun sebebi de debi oranı arttıkça dairesel akış pasajındaki akışkan debisinin azalması ile açıklanabilir.



Şekil 7. Dönmeli eş-eksenli jet ile konvansiyonel jetin karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, dönmeli eş-eksenli jetlerin yakın çarpma mesafelerindeki ısıl davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı lüle-plaka arası mesafeler ve debi oranlarında çalışılmıştır. Önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Bütün debi oranlarında, genel karakter olarak, artan çarpma mesafesi ile yerel Nusselt sayıları tüm radyal doğrultu boyunca azalmaktadır.
2. Artan radyal mesafeye bağlı olarak ($r^* \geq 0.6$ için) Nusselt sayılarının azaldığı görülmektedir. Nusselt sayısındaki bu azalma debi oranına bağlı olmakta ve bu durum artan radyal mesafe ile daha belirgin bir hale gelmektedir.

3. En küçük lüle-plaka arası mesafe ve debi oranı için çarpma bölgesinde ısı transferinin üniformluğunda belirgin bir iyileşme görülmektedir.
4. Ortalama Nusselt sayısı ve durma noktası Nusselt sayılarının her ikisinin de ilgili deneysel aralık kapsamında, azalan lüle-plaka arası mesafe ile yaklaşık olarak % 5.7 oranında (maksimum değişim miktarı) arttığı görülmektedir.
5. Artan debi oranı ile radyal doğrultuda dış bölgelerde (plaka merkezine göre), yerel Nusselt sayılarında belirgin bir artış olduğu görülmektedir.
6. Sabit bir lüle-plaka arası mesafe için, artan debi oranıyla, durma noktası Nusselt sayılarında belirli düzeyde bir azalma görülmektedir. Artan debi oranıyla, durma noktası Nusselt sayılarındaki azalma düzeyi maksimum % 4.5'tir.
7. Bu çalışmadaki deneysel aralık için artan debi oranıyla ortalama Nusselt sayılarında % 15.2'ye kadar artış meydana gelmektedir.
8. Dönmeli eş-eksenli jetler, konvansiyonel jetlere kıyasla üniforma yakın sıcaklık dağılımı sunmaktadır. Bu nedenle, özellikle, elektronik sistemlerin soğutulması gibi ısı transferinin üniformluğunun da ön planda olduğu ısıl kontrol uygulamalarında iyi bir seçenek olarak değerlendirilebilirler.

Referanslar

- Ahmed, M.R., & Sharma, S.D. (2000). Effect of velocity ratio on the turbulent mixing of confined, co-axial jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22, 19–33. doi:10.1016/S0894-1777(00)00006-6
- Ahmed, Z.U., Al-Abdeli, Y.M., & Guzzomi, F.G. (2016). Heat transfer characteristics of swirling and non-swirling impinging turbulent jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 991–1003. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.037
- Ahmed, Z.U., Al-Abdeli, Y.M., & Guzzomi, F.G. (2017). Flow field and thermal behaviour in swirling and non-swirling turbulent impinging jets. *International Journal of Thermal Sciences*, 114, 241–256. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2016.12.013
- Bakirci, K., & Bilen, K. (2007). Visualization of heat transfer for impinging swirl flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 182–191. doi:10.1016/j.expthermflusci.2007.03.004
- Balakrishnan, P., & Srinivasan, K. (2017). Jet noise reduction using co-axial swirl flow with curved vanes. *Applied Acoustics*, 126, 149–161. doi:10.1016/j.apacoust.2017.05.009
- Biegger, C., Rao, Yu., & Weigand, B. (2018). Flow and heat transfer measurements in swirl tubes with one and multiple tangential inlet jets for internal gas turbine blade cooling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 73, 174–187. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.07.011
- Chang, S.W., & Shen, H.D. (2020). Heat transfer characteristics of swirling impinging jet-arrays issued from nozzle plates with and without webbed grooves. *International Journal of Thermal Sciences*, 148, 106155. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106155
- Choo, K.S., & Kim, S.J. (2010). Comparison of thermal characteristics of confined and unconfined impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3366–3371. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.023
- Colucci, D.W., & Viskanta, R. (1996). Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13, 71–80. doi:10.1016/0894-1777(96)00015-5
- Dixon, T.F., Truelove, J.S., & Wall, T.F. (1983). Aerodynamic studies on swirled coaxial jets from nozzles with divergent quarls. *Journal of Fluids Engineering*, 105, 197–203. doi:10.1115/1.3240964
- Eiamsa-ard, S., Nanan, K., & Wongcharee, K. (2015). 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. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.031
- Ianiro, A., & Cardone, G. (2012). Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89–98. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.018
- Ikhlaq, M., Al-Abdeli, Y.M., & Khiadani, M. (2019). Transient heat transfer characteristics of swirling and non-swirling turbulent impinging jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109, 109917. doi:10.1016/j.expthermflusci.2019.109917
- Huang, L., & EL-Genk, M.S. (1998). Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, 583–600. doi:10.1016/S0017-9310(97)00123-3

- Kline, S.J., McClintock, F.A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1) 3–8.
- Kurnia, J.C., Sasmito, A.P., Tong, W., & Mujumdar, A.S. (2013). Energy-efficient thermal drying using impinging-jets with time-varying heat input – A computational study. *Journal of Food Engineering*, 114, 269–277. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.08.029
- Lee, D.H., Won, S.Y., Kim, Y.T., & Chung, Y.S. (2002). Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(1), 223–227. doi:10.1016/S0017-9310(01)00135-1
- Markal, B. (2018). Experimental investigation of heat transfer characteristics and wall pressure distribution of swirling coaxial confined impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 124: 517–532. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.101
- Markal, B. (2019). The effect of Total flowrate on the cooling performance of swirling coaxial impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 55, 3275–3288. doi:10.1007/s00231-019-02653-7
- Markal, B., & Aydin, O. (2018). Experimental investigation of coaxial impinging air jets. *Applied Thermal Engineering*, 141, 1120–1130. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.06.066
- Nanan, K., Wongcharee, K., Nuntadusit, C., & Eiamsa-ard, S. (2012). Forced convective heat transfer by swirling impinging jets issuing from nozzles equipped with twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 844–852. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.05.002
- Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Bunyajitradulya, A., & Eiamsa-ard, S. (2012). Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 102–107. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.10.003
- Öztekin, E., Aydin, O., & Avci, M. (2013). Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 77–82. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.03.006
- Singh, P., & Chander, S. (2018). Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 90–108. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034
- Uddin, N., Weigand, B., & Younis, B.A. (2019). Comparative study on heat transfer enhancement by turbulent impinging jet under conditions of swirl, active excitations and passive excitations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 100, 35–41. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.12.002
- Walker, J.D.A., Smith, C.R., Cerra, A.W., & Doligalski, T.L. (1987). The impact of a vortex ring on a wall. *Journal of Fluid Mechanics*, 181, 99-140. doi:10.1017/S0022112087002027
- Wannassi, M., & Monnoyer, F. (2015). Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays. *Applied Thermal Engineering*, 78, 62–73. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.12.043
- Xu, L., Lan, J., Ma, Y., Gao, J., & Li, Y. (2017). Numerical study on heat transfer by swirling impinging jets issuing from a screw-thread nozzle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 232–237. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.053
- Yang, H.Q., Kim, T., Lu, T.J., & Ichimiya, K. (2010). 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. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.029