



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Elektronik bileşenlerin bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun soğutma performansına etkisi

The impact of nozzle position on cooling performance in electronic components cooling with twin slot jets

Yazar(lar) (Author(s)): Buğra SARPER¹, Nida Emin KIRIŞÇI², Melisa ALBAYRAK³

*ORCID*¹: 0000-0001-7554-6575

*ORCID*²: 0000-0002-5639-5801

*ORCID*³: 0000-0003-1157-9057

To cite to this article: Sarper B., Kirişçi N. E. ve Albayrak M., “Elektronik bileşenlerin bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun soğutma performansına etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 27(2): 559-574, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Sarper B., Kirişçi N. E. ve Albayrak M., “Elektronik bileşenlerin bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun soğutma performansına etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2): 559-574, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1169199

Elektronik Bileşenlerin Bir Çift Slot Jet ile Soğutulmasında Nozül Konumunun Soğutma Performansına Etkisi

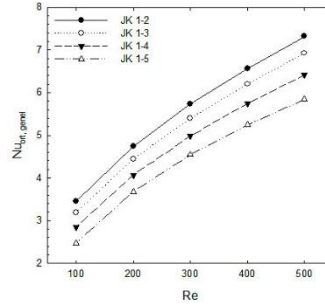
The Impact of Nozzle Position on Cooling Performance in Electronic Components Cooling with Twin Slot Jets

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Nozül konumunun akış yapısı ve taşınım ile ısı transferine etkisi incelenmiştir. / The effects of nozzle position on flow structure and convective heat transfer is investigated.
- ❖ Yerel ve ortalama Nusselt sayısı değişimi nozül konumundan önemli ölçüde etkilenmektedir. / Variation of local and mean Nusselt numbers are considerably influenced by nozzle position.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, nozül konumunun elektronik bileşenleri temsil eden ayrık ısı kaynaklarından havaya taşınım ile ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. / The effects of nozzle position on convective heat transfer from discrete heat sources representing electronic components is investigated numerically in this study.



Şekil. Genel ortalama Nusselt sayısının nozül konumu ve Reynolds sayısı ile değişimi / **Figure.** Overall Nusselt number change with nozzle position and Reynolds number

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı elektronik bileşenlerin bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun akış yapısı ve ısı transfer karakteristiklerine etkilerini analiz etmektir. / The aim of this study is to analyze the effect of nozzle position on flow structure and characteristics of heat transfer in electronic components cooling with twin nozzles.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sayısal hesaplamalar ANSYS Fluent 2021 R2 ile iki-boyutlu olarak sürekli rejimde gerçekleştirilmiştir. / Numerical calculations are performed with ANSYS Fluent 2021 R2 in two-dimensional steady-state regime.

Özgünlük (Originality)

Elektronik bileşenlerin çarpan jetler ile soğutulmasında akış ve taşınım ile ısı transferini inceleyen çalışmalar sınırlı sayıda olup nozül konumunun akış ve taşınım ile ısı transferine etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. / Studies examining the flow and convective heat transfer in cooling of electronic components with twin slot jets are limited, and there is no study analyzing the impact of nozzle position on flow and convective heat transfer.

Bulgular (Findings)

Yerel ve ortalama Nusselt sayısı değerleri nozül konumundan önemli ölçüde etkilenmektedir. / Local and mean Nusselt number values are considerably influenced by the nozzle position.

Sonuç (Conclusion)

İkinci nozülün konumundaki değişimle birlikte genel taşınım ile ısı transfer hızı da değişmekte olup en yüksek taşınım ile ısı transfer hızı JK 1-2'de, en düşük ısı transfer hızı JK 1-5'te görülmektedir. / The overall rate of convective heat transfer changes with the position change of the second nozzle, and the highest rate of convective heat transfer is in JP 1-2 while it is lowest in JP 1-5.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Elektronik Bileşenlerin Bir Çift Slot Jet ile Soğutulmasında Nozül Konumunun Soğutma Performansına Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Buğra SARPEN^{1*}, Nida Emin KİRİŞÇİ², Melisa ALBAYRAK¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

²Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

(Geliş/Received : 31.08.2022 ; Kabul/Accepted : 19.09.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 27.11.2022)

ÖZ

Bu çalışmada, elektronik bileşenlerin bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun akış yapısı ve taşınımı ile ısı transfer karakteristiklerine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Nozül genişlikleri ve jet Reynolds sayıları eşit alınarak dört farklı nozül konumu (JK 1-2, JK 1-3, JK 1-4 ve JK 1-5) için Reynolds sayısının 100 ile 500 değerleri arasında, laminer rejimde iki-boyutlu hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar ANSYS Fluent yazılımı ile yürütülürken, farklı Reynolds sayıları ve jet konumları için hız ve sıcaklık konturları, ısı kaynaklarının yüzeylerinde yerel ve ortalama Nusselt sayılarının değişimi ve genel ortalama Nusselt sayısının değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, akış yapısı ve taşınımı ile ısı transfer karakteristiklerinin nozül konumundan oldukça etkilendiği, sistemin geneli için taşınımı ile ısı transfer hızının JK 1-2’de diğer durumlara oranla daha yüksek olduğu ve ikinci nozülün çıkışa doğru kayması ile birlikte taşınımı ile ısı transfer hızının sistemin geneli için azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, nozül konumu, ayrık ısı kaynağı, elektronik bileşen, ısı transferi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

The Impact of Nozzle Position on Cooling Performance in Electronic Components Cooling with Twin Slot Jets

ABSTRACT

In this study, the impact of nozzle position on flow structure and characteristics of convective heat transfer in electronic components cooling with twin jet nozzles are investigated numerically. Assuming that nozzle widths and jet Reynolds numbers are equal, numerical calculations are performed in the laminar regime between the Reynolds number range of 100 and 500 for different nozzle positions (JP 1-2, JP 1-3, JP 1-4 and JP 1-5). Numerical calculations are realized via the ANSYS Fluent software, and velocity and temperature contours, local and mean Nusselt number variation on the heat sources’ surfaces and the overall mean Nusselt number variation are investigated for different nozzle positions and Reynolds numbers. As a result of the study, it is disclosed that the flow structure and characteristics of convective heat transfer are considerably influenced by nozzle position, the overall rate of convective heat transfer in JP 1-2 is higher than in the other cases, and it decreases with the displacement of the second jet towards the outlet.

Keywords: Jet impingement, nozzle position, discrete heat sources, electronic component, heat transfer, computational fluid dynamics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Daha küçük bileşen boyutlarına sahip entegre devre paketlerinin güç yoğunluğu elektronik cihazların kompakt tasarımının sonucu olarak önemli ölçüde artmaktadır [1]. Artan güç yoğunluğu sonucunda ortaya çıkan aşırı ısınma problemi, ısının sistemden hızlı ve güvenilir şekilde uzaklaştırılmasını gerektirir. Elektronik cihazlarda meydana gelen arızaların %55’i sıcaklıkla ilgili olup [2] bağlantı sıcaklıklarındaki aşırı artışlar termomekanik gerilmelere ve bunlarla ilintili işlevsel düzensizliklere sebep olur [3]. Elektronik cihazların

tasarımındaki küçülme eğilimi, bu cihazlar için uygun ısı koşulları sağlama ihtiyacını beraberinde getirmekte, yüksek işlemci hızı ve yoğunluğuna sahip bu cihazlar için verimli soğutma stratejileri geliştirmek gerekmektedir [4]. Çarpan jetler ile gerçekleşen ısı transferi, yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği en etkin soğutma tekniklerinden biridir [5]. Çarpan jetler ile gerçekleştirilen soğutma işleminde tek bir jet kullanılabileceği gibi birden fazla jet de aynı anda kullanılabilir. Tek bir jetin kullanımı ısı transferini belirli bir bölgede artırırken, birden fazla jet kullanımı soğutulmak istenilen yüzeyde ısı transferinin değişimini daha homojen hale getirir [6]. Bu sebeple, birden fazla jet nozülünün eş zamanlı kullanımının yüzeydeki yerel ısı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: bugrasarper@tarsus.edu.tr

transfer karakteristiklerine etkilerini inceleyen çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla türbülanslı akışa yoğunlaşsa da laminar akışı ele alan çalışmalar da mevcuttur. Laminar çarpan jetlerde, türbülanslı akışa kıyasla akış karakteristiklerinde önemli değişiklikler oluşmayacağı için çarpma mekanizması akışın gelişmesi hakkında daha doğru bilgi verir [7]. Elektronik bileşenleri temsil eden ayrık ısı kaynaklarının kullanıldığı uygulamalarda ise akış ayrılması ve ikincil akış bölgeleri önem kazanmaktadır. Isı kaynakları aynı zamanda akış bölgesinde birer engel davranışı sergileyerek karmaşık bir akış yapısının oluşmasına sebep olurken, yerel ısı taşınım karakteristikleri üzerinde de önemli etkiler meydana getirmektedir.

Literatürde elektronik bileşenleri temsil eden ayrık ısı kaynaklarının çapraz akış kullanılarak doğal, zorlanmış ve karma akış rejimlerinde soğutulmasını esas alan çalışmalar bulunmaktadır [1,8,9]. Aynı zamanda, çarpan jetler kullanılarak ısı transferini iyileştirmeyi amaçlayan ve ısı kaynaklarının çevresindeki karmaşık akış yapısını inceleyen deneysel ve sayısal çalışmalar da mevcuttur. Sanea [10] çapraz akış ve jet akışı ile gerçekleştirilen soğutma uygulamasında değişen Reynolds ve Prandtl sayıları ile kanal yüksekliği ve genişliğinin ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemiş ve çapraz akışın jet akışının ısı transferi üzerindeki etkisini zayıflattığı sonucuna varmıştır. Chen vd. [11] tek bir slot jet ile soğutulan bir yüzeyin yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak Reynolds sayısının 220-690 aralığında incelemişlerdir. Garimella ve Schroeder [12] kare dizilime sahip dört ve dokuz nozülünden oluşan bir test bölgesi için jet nozülleri ile hedef plaka arasındaki mesafe ve Reynolds sayısındaki değişimin ısı transfer katsayısına etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Li vd. [13] düz bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasında, Reynolds sayısı, test bölgesinin geometrisi ve sınır koşullarının taşınım ısı transferine etkilerini laminar akış koşullarında sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Arquis vd. [14] ayrık ısı kaynaklarının tek bir slot jet ile soğutulmasında kanal yüksekliği/blok uzunluğu ve jet genişliği/blok uzunluğu oranları ile Reynolds sayısının değişiminin taşınım ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Sivasamy vd. [15] düz bir levhanın slot jet ile soğutulmasında akış yapısı ve taşınım ısı transferini 100 ile 500 Reynolds sayıları arasında farklı jet-hedef plaka mesafeleri için sayısal olarak analiz etmişlerdir. Dağtekin ve Öztop [16] nozül genişliği/nozüller arası açıklık oranlarının ısı transferine etkilerini farklı Reynolds sayılarında (100-1000) bir çift jet nozülü ile soğutulan bir plaka için sayısal olarak incelemişlerdir. Saeid [17] iki boyutlu laminar jet akışında hızın zamana bağlı periyodik değişiminin sürtünme katsayısı ve ısı transferine etkilerini farklı hız ve periyod değerleri için sayısal olarak incelemiştir. Nada [18] düşey konumlandırılmış düz bir hedef plakanın bir dizi jet nozülü ile soğutulmasında farklı çıkış konfigürasyonlarının kaldırma kuvveti etkisindeki akış ve ısı transferine etkilerini düşük Reynolds sayılarında

(100-1000) Rayleigh sayısının farklı değerleri ($10^4-3 \times 10^6$) için detaylı şekilde analiz etmişlerdir. Lee vd. [19] soğutucu akışkan ile hedef plaka arasındaki düşük sıcaklık farkları ve farklı kanal yükseklikleri için soğutma performansını Reynolds sayısının 120 ile 200 aralığında incelemiş ve ilgili parametrelerin yerel Nusselt sayısı değişimine etkilerini analiz etmişlerdir. Lorenzo vd. [20] sabit sıcaklıktaki düz bir plakanın nanoakışkan ile soğutulmasında nanopartikül hacim oranının taşınım ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Afroz ve Sharif [21] sabit sıcaklıktaki bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasını farklı jet-hedef plaka mesafeleri ve Reynolds sayılarında sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yousefi-Lafouraki vd. [22] laminar çarpan jet ile soğutulan, daralan bir kanal içerisindeki sabit sıcaklıktaki yüzeyden taşınım ısı transferini farklı daralma açıları için Reynolds sayısının 100 ile 400 değerleri arasında sayısal olarak incelemişlerdir. Al-Rmah ve Mohamad [23] altı adet sıralı jet çıkışı bulunan çift geçişli bir kanalda farklı kanal yükseklikleri ve nozül genişliklerinin ısı transferi ve akış yapısına etkilerini Reynolds sayısının 100 ile 400 aralığında sayısal olarak analiz etmişlerdir. Shariatmadar vd. [6] bir dizi slot jet ile soğutulan sabit yüzey sıcaklığına sahip bir plaka için nozül sayısı ve nozüller arasındaki mesafenin yerel Nusselt sayısı değişimine etkilerini Reynolds sayısının 230 ile 470 aralığında incelemişlerdir. Lam ve Prakash [24] tek bir slot jet ile soğutulan ayrık ısı kaynaklarından taşınım ısı transferi, sürtünme katsayısı ve entropi üretimine gözenekli ısı alıcıların etkilerini Reynolds sayısının 100 ile 1000 aralığında, laminar akış rejiminde, farklı kanal yükseklikleri için iki boyutlu ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Lam ve Prakash [25] su jeti ile soğutulan bir dizi ayrık ısı kaynağından taşınım ısı transferi ve entropi üretimine nanoakışkan parametrelerinin etkilerini iki boyutlu ve sayısal olarak incelemişlerdir. Guongeng vd. [26] çapraz akışa maruz kalan ve bir dizi sıralı jet bulunan akış bölgesi için jet-çapraz akış hız oranlarının farklı değerleri ve farklı kanal yüksekliklerinin yerel ve ortalama Nusselt sayılarına etkilerini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Zhou vd. [27] soğutucu akışkan ve hedef plakanın yüksek sıcaklık farklarında, Reynolds sayısının 4000 ile 12000 aralığında akışkanın termodinamik özelliklerinin taşınım ısı transferine etkilerini iki boyutlu ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Goodfriend vd. [28] kübik bir kaynağın çevresinde oluşan akış yapısını, farklı konumlardaki hız profilleri ve türbülans kinetik enerjisinin değişimlerini sayısal ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Barik vd. [4] tabanında konik çıkıntılar bulunan dikdörtgen kesitli bir kanalda çapraz akış ve jet akışının etkisi ile gerçekleşen ısı transferini Reynolds sayısının 6000 ile 20000 aralığında ve nanoakışkanın farklı nanopartikül hacim oranlarında üç boyutlu ve sayısal olarak incelemişlerdir. Buonomo vd. [29,30] laminar hava jeti ile soğutulan bir akış bölgesinde kullanılan gözenekli ısı alıcının taşınım ısı transferine etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Lam ve Prakash [31] farklı kanal yükseklikleri ve jetlerin farklı hız oranları için, ayrık ısı

kaynaklarının bir çift hava jeti ile soğutulmasını iki boyutlu ve sayısal olarak incelemişler; ilgili parametrelerin yerel ve ortalama Nusselt sayısı değişimi ile entropi üretimine olan etkilerini detaylı olarak analiz ederek optimum hız oranlarını belirlemişlerdir. Kılıç [32] farklı nanopartikül hacim oranları, farklı ısı akıları ve nanoakışkan tipleri için elektronik bileşenlerin çarpan jetler ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. McInturff vd. [33] eş hidrolik çapa sahip farklı formdaki jet nozülleri ile soğutulan ve yüzeyinde üçgen engeller bulunan düz bir plakadan taşınım ile ısı transferini 900 ile 11000 Reynolds sayısı aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Kashi ve Hausteine [34] akış bölgesi içerisine uzatılmış bir jet nozülünün taşınım ile ısı transferine etkilerini Reynolds sayısının 500 ile 2000 aralığında sayısal olarak incelemişlerdir. Gürtürk ve Öztop [35] üzerinde gözenekli metal köpük bulunan ısıtılmış bir diskin dairesel kesitli bir jet nozülü ile soğutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı Reynolds sayıları, metal köpük yükseklikleri ve ısıtıcı güçleri ele alınmış, ısı transferinin kontrolünde metal köpüğün iyi bir alternatif sunduğu belirtilmiştir. Alnak vd. [36] ısıtılmış blokların slot jet ile soğutulmasını farklı Reynolds sayıları ve hedef plaka/jet çapının farklı oranları için sayısal olarak incelemişlerdir. Wang vd. [37] ısıtılmış bir levhanın farklı jet-çapraz akış hız oranlarında soğutulmasında, çapraz akışın sıcaklık ve hız alanlarına, yerel ve ortalama Nusselt sayılarına olan etkisini incelemişlerdir. Paulraj vd. [38] sabit yüzey sıcaklığına sahip ayrıklı blokların slot jetler ile soğutulmasında kanal yüksekliği ve bloklar arasındaki mesafenin taşınım ile ısı transferine etkilerini Reynolds sayısının 30 ile 300 aralığında sayısal olarak incelemişler; blokların çevresindeki hız profilleri ve blokların yüzeylerindeki yerel ve ortalama Nusselt sayılarının değişimine odaklanılmışlardır. Kaya [39] bir çift dairesel jet ile soğutulan ısıtılmış bir plakadan taşınım ile ısı transferine yüzey şeklinin (düz, zigzag, dikdörtgen, yamuk) etkisini üç-boyutlu sayısal olarak incelemiş olup taşınım ile ısı transfer karakteristiklerinin yüzey şekline göre önemli ölçüde etkilendiğini belirlemiştir. Hosseinalipour vd. [40] üzerinde gözenekli bir ısı alıcı bulunan sıcak düz bir plakanın hava jeti ile soğutulmasında periyodik hız değişiminin ısı transferi ve entropi üretimine etkilerini laminer akış için analiz etmişlerdir. Li vd. [41] test bölgesinin eğiminin çoklu çarpan jetler ile ısı transferine etkilerini Reynolds sayısının 5000 ile 15000 aralığında, farklı eğim açıları (90°-180°) için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Martinez-Filgueira vd. [42] çoklu çarpan jetler ile gerçekleştirilen soğutma işleminde farklı nozüllerden çıkan akışkanın duvar kayma gerilmesi ve ısı

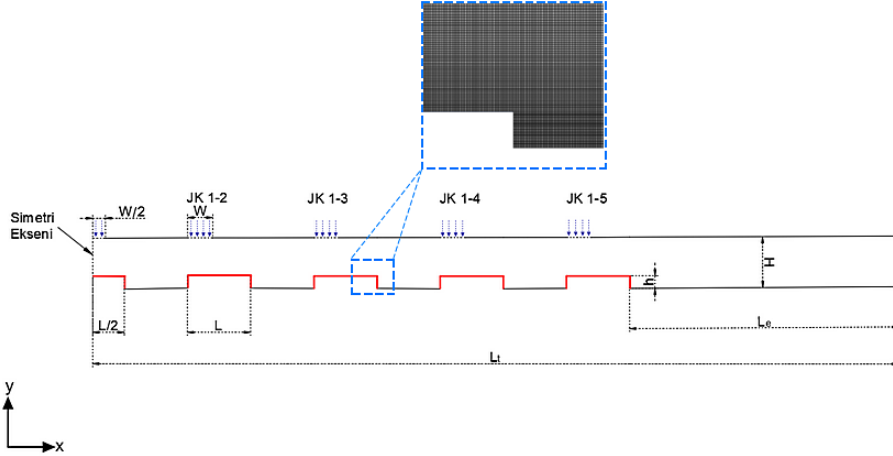
transferine etkilerini incelemişler; farklı türbülans modellerinin sonuçları üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Singh vd. [43] farklı dalga formları (kare-sinüs), Reynolds sayıları (1656-2218), boyutsuz aksel mesafe ve dalga periyodlarının (100-175 Hz) sentetik jet ile yapılan soğutmaya etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Albayrak vd. [44] dört farklı jet Reynolds sayısı (1185, 2370, 3555 ve 4740) ve üç farklı yüzey yayıcılığı değeri (0.05, 0.45 ve 0.90) için slot jet ile soğutulan konkav bir yüzeyden taşınım ve ışımla olan ısı transferini sayısal olarak incelemişler ve yüzey yayıcılığı ile jet Reynolds sayısının artışının genel soğutma performansını artırdığını belirlemişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunun türbülanslı rejimde düz bir yüzeyin slot ya da dairesel jet nozülü ile soğutulmasına odaklandığı görülmektedir. Ayrıklı ısı kaynaklarının çarpan jetler ile soğutulmasında akış ve ısı transfer karakteristiklerini inceleyen çalışmalar ise sınırlı sayıda olup [24,25,31,38] nozül konumunun akış ve ısı transfer karakteristiklerine etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, elektronik bileşenleri temsil eden çıkıntılı ayrıklı ısı kaynaklarının bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun akış ve taşınım ile ısı transferine etkileri laminer akış rejiminde farklı Reynolds sayıları için incelenmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Problemin Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada, elektronik bileşenleri temsil eden çıkıntılı ayrıklı ısı kaynaklarının bir çift slot jet ile soğutulmasında ikinci nozülün konumunun ısı transferi ve akış yapısına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 1'den görüldüğü gibi, ısı kaynakları bir çift slot jet ile soğutulurken ilk nozülün konumu sabit tutulmaktadır. İkinci nozül ise sırasıyla ikinci (JK-2), üçüncü (JK-3), dördüncü (JK-4) ve beşinci (JK-5) kaynak üzerinde konumlandırılmıştır. Ayrıklı ısı kaynaklarının soğutulmasında kullanılan jet nozüllerinin genişlikleri (W) çalışma boyunca sabit tutulmuş olup 10 mm'dir. Ayrıklı ısı kaynaklarının genişlikleri (L_h) ve kaynaklar arasındaki mesafeler (s) birbirlerine eşit ve 25 mm'dir. Ayrıklı ısı kaynaklarının yükseklikleri (h) ise birbirlerine eşit ve 5 mm olarak alınmıştır. Dikdörtgen kesitli kanalın yüksekliği (H) 20 mm, kanalın toplam uzunluğu (L_t) ise 318.75 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. İncelenen problemin şematik gösterimi ve kullanılan ağ yapısı (Schematic representation of the problem and the grid structure)

2.2. Sayısal Yöntem ve Sınır Koşulları (Numerical Method and Boundary Conditions)

Sayısal hesaplamalar ANSYS Fluent 2021 R2 yazılımı ile iki-boyutlu olarak sürekli rejimde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sadece ısı kaynaklarından havaya olan taşınım ile ısı transferi hesaba katılmış olup iletim ve ışınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Ele alınan problemde soğutucu akışkan olarak hava kullanılmış, havanın sabit termofiziksel özellikli ve sıkıştırılmaz olduğu; akışın ise laminar olduğu kabulü ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalarda, akışı yöneten denklemlerin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden akış yönlü fark şeması kullanılırken; hız-basınç çiftinin çözümü amacıyla SIMPLE algoritması tercih edilmiştir [45].

y-momentum denklemi:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Enerji Denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Burada u ve v kartezyen koordinatlardaki hız bileşenlerini, p basıncı, T sıcaklığı, ρ akışkan yoğunluğunu, ν akışkanın kinematik viskozitesini, α ısı yayılım katsayısını belirtmektedir.

Tablo 1. Sınır koşulları (The boundary conditions)

	$u, m/s$	$v, m/s$	T, K
Jet girişleri	$u = 0$	$v = v_j$	$T = T_j$
Kanal çıkışı	$\partial u / \partial x = 0$	$\partial v / \partial x = 0$	$\partial T / \partial x = 0$
Isı kaynaklarının yüzeyleri	$u = 0$	$v = 0$	$T = T_s$
Simetri eksen	$u = 0$	$\partial v / \partial x = 0$	$\partial T / \partial x = 0$
Kanal cidarları	$u = 0$	$v = 0$	$\partial T / \partial y = 0$

Mevcut kabuller ile birlikte Navier-Stokes ve enerji denklemleri şu şekilde yazılabilir:

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x-momentum denklemi:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Jet girişlerinde hız girişi (velocity inlet) sınır koşulu kullanılırken, her iki girişte de hava sıcaklığı 298 K'dir. Kanal çıkışında ise basınç çıkışı (pressure outlet) sınır koşulu kullanılmıştır. Ayrık ısı kaynaklarının yüzeylerinde sıcaklıklar sabit olup 343 K'dir. Kanalın sol düşey yüzeyi simetri sınır koşuluna, kanal yüzeyleri ise adyabatik sınır koşuluna sahiptir. Bunlara ek olarak, tüm cidarlarda hidrodinamik olarak kaymama sınır koşulu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan sınır koşulları Tablo 1'de verilmiştir.

Jet nozüllerinin çıkışında Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Re = \frac{v_j 2W}{\vartheta} \quad (5)$$

Burada W nozül genişliğini, v_j nozül çıkışında akışkan hızını belirtmektedir.

Isı kaynaklarının yüzeylerinde yerel ısı taşınım katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$h = \frac{q}{T_s - T_j} \quad (6)$$

Burada q ısı kaynaklarının yüzeylerinden havaya ısı akısını, T_s kaynakların yüzey sıcaklığını, T_j nozül çıkışında hava sıcaklığını temsil etmektedir.

Isı kaynaklarının yüzeylerinde yerel ve ortalama Nusselt sayıları aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Nu = \frac{h2W}{k} \quad (7)$$

$$Nu_{ort} = \frac{1}{A} \int_A Nu dA \quad (8)$$

Burada k akışkanın ısı iletim katsayısını, A ısı kaynaklarının yüzey alanını belirtmektedir.

Ayrık ısı kaynaklarının tamamı için hesaplanan genel ortalama Nusselt sayısı ise aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$Nu_{ort,genel} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu_{ort,i}}{n} \quad (9)$$

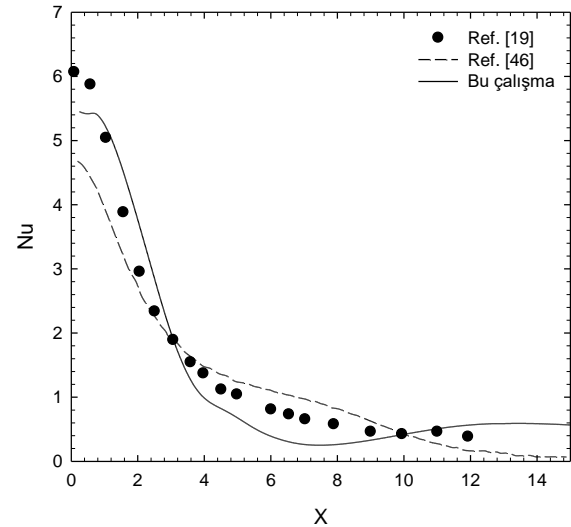
Burada $Nu_{ort,i}$ herhangi bir ısı kaynağı için hesaplanan ortalama Nusselt sayısını, n kaynak sayısını belirtmektedir.

2.3. Ağ Yapısı ve Çözüm Algoritmasının Doğrulması (Grid Structure and Validation of Solution Algorithm)

Sayısal hesaplamalarda dikkörtgen çözüm ağı kullanılmıştır. Isı transferi ve akış karakteristiklerinin doğru tayin edilmesi amacıyla ısı kaynaklarına yakın bölgelerde ağ sıklığı artırılmıştır. Çalışma kapsamında beş farklı ağ sıklığında hesaplamalar yapılmış olup ağ bağımsızlık çalışmaları 6870, 12234, 26987, 107025 ve 517397 hücre sayıları için gerçekleştirilmiştir. Ağ

bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilirken ardışık hücre sayıları için ısı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan ortalama Nusselt sayıları karşılaştırılmış ve ağ bağımsızlık çalışmasına ait detaylar Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de sunulduğu üzere 107025 hücre sayısı için hesaplanan değerler ile bir önceki hücre sayısı için hesaplanan değerler arasındaki bağıl hata ($|R = (Nu_{ort,i} - Nu_{ort,i+1}) / Nu_{ort,i}|$) %1'in altında olduğundan dolayı nihai hesaplamalara 107025 hücre sayısı ile devam edilmiştir.

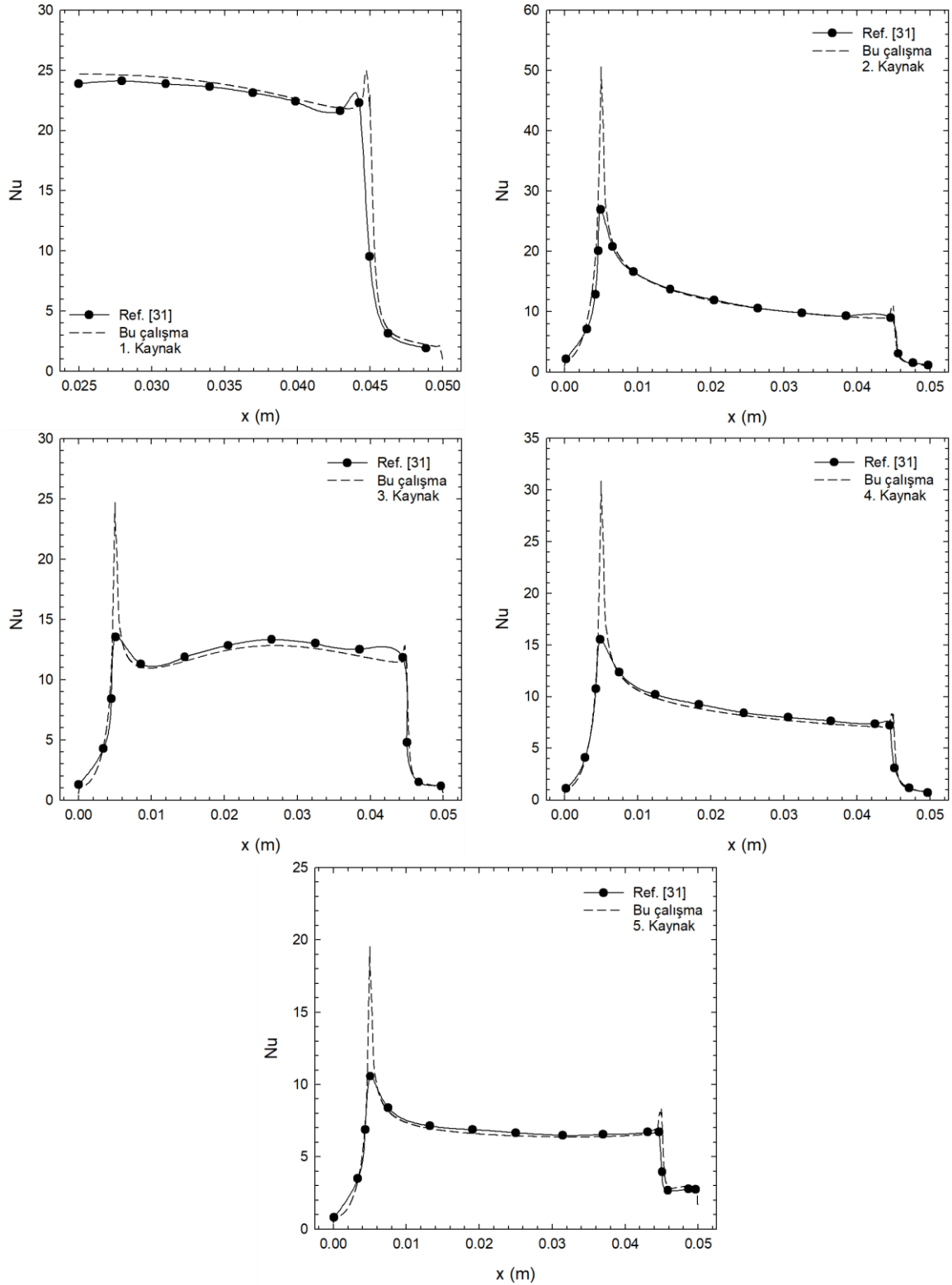
Sayısal çözüm prosedürünün doğrulanması amacıyla ilk olarak Lee vd.'nin [19] deneysel çalışması ve Sharif'in [46] sayısal çalışması ile karşılaştırmalar yapılmış olup düz bir yüzey için hesaplanan yerel Nusselt sayıları değerlerinin özellikle çarpma bölgesinde deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmektedir (bkn. Şekil 2). Ayrıca, çözüm prosedürünün doğrulanması amacıyla Lam ve Prakash'ın [31] ayrık ısı kaynaklarının bir çift slot jet ile soğutulmasına yönelik sayısal çalışması için ısı kaynaklarının yüzeylerinde yerel Nusselt sayısının değişimi karşılaştırılmıştır. Şekil 3'ten görüldüğü üzere her bir ısı kaynağının farklı yüzeylerinde yerel Nusselt sayısı değişim trendlerinin benzer olduğu ve değerlerin birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2. $Re=120$ değerinde düz plaka için hesaplanan Yerel Nusselt sayısı değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of local Nusselt Number values calculated for flat plate at $Re=120$)

Tablo 2. Ağ bağımsızlık çalışmasının sonuçları (Results of the grid independency study)

	6870	R	12234	R	26987	R	107025	R	517397
	Hücre	(%)	Hücre	(%)	Hücre	(%)	Hücre	(%)	Hücre
$Nu_{ort,1}$	12.942	2.095	12.671	1.591	12.469	0.996	12.345	0.327	12.305
$Nu_{ort,2}$	9.382	1.831	9.554	2.413	9.323	0.258	9.299	0.155	9.285
$Nu_{ort,3}$	5.923	1.058	5.985	0.523	6.017	0.361	6.038	0.144	6.047
$Nu_{ort,4}$	4.616	0.374	4.634	0.337	4.649	0.269	4.662	0.293	4.676
$Nu_{ort,5}$	4.212	0.146	4.218	0.142	4.224	0.114	4.229	1.592	4.296



Şekil 3. $Re=500$ değerinde ayırık ısı kaynaklarının yüzeylerindeki yerel Nusselt sayısı değişiminin literatür ile karşılaştırılması
(Comparison of the local Nusselt number variation on the discrete heat sources' surfaces at $Re=500$)

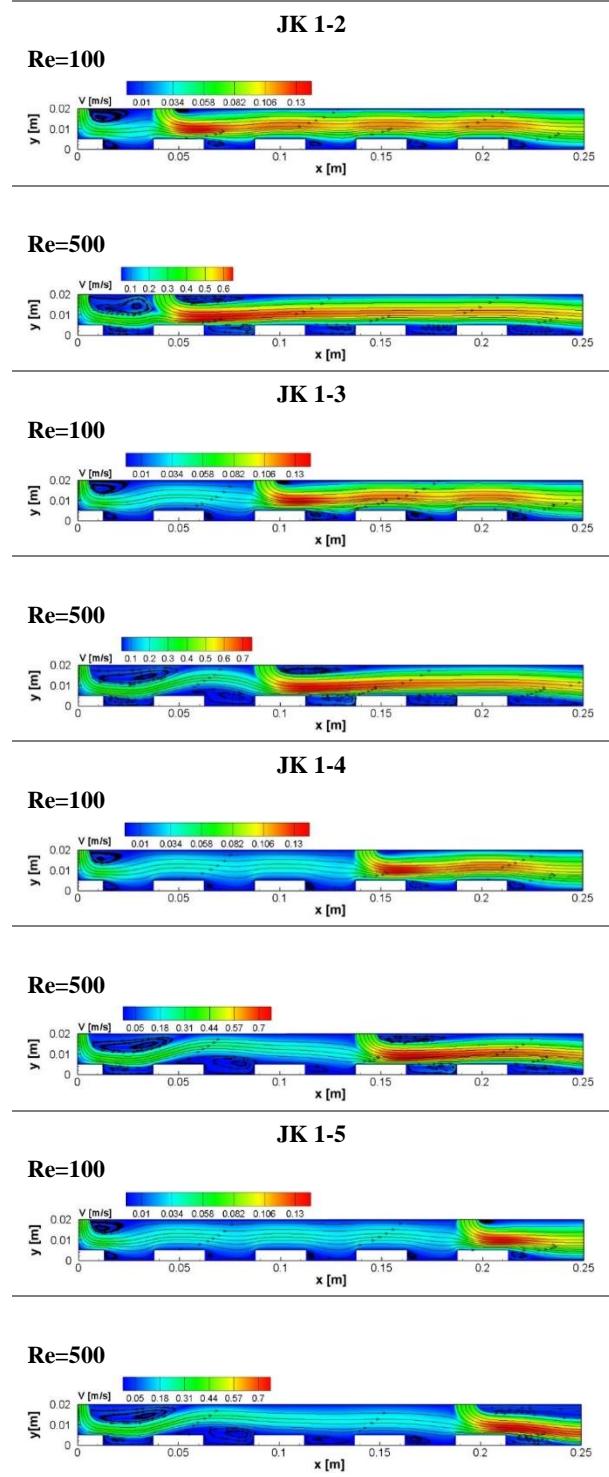
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, elektronik bileşenleri temsil eden çıkıntılı ayırık ısı kaynaklarının bir çift slot jet ile soğutulmasında ikinci nozülün konum değişiminin

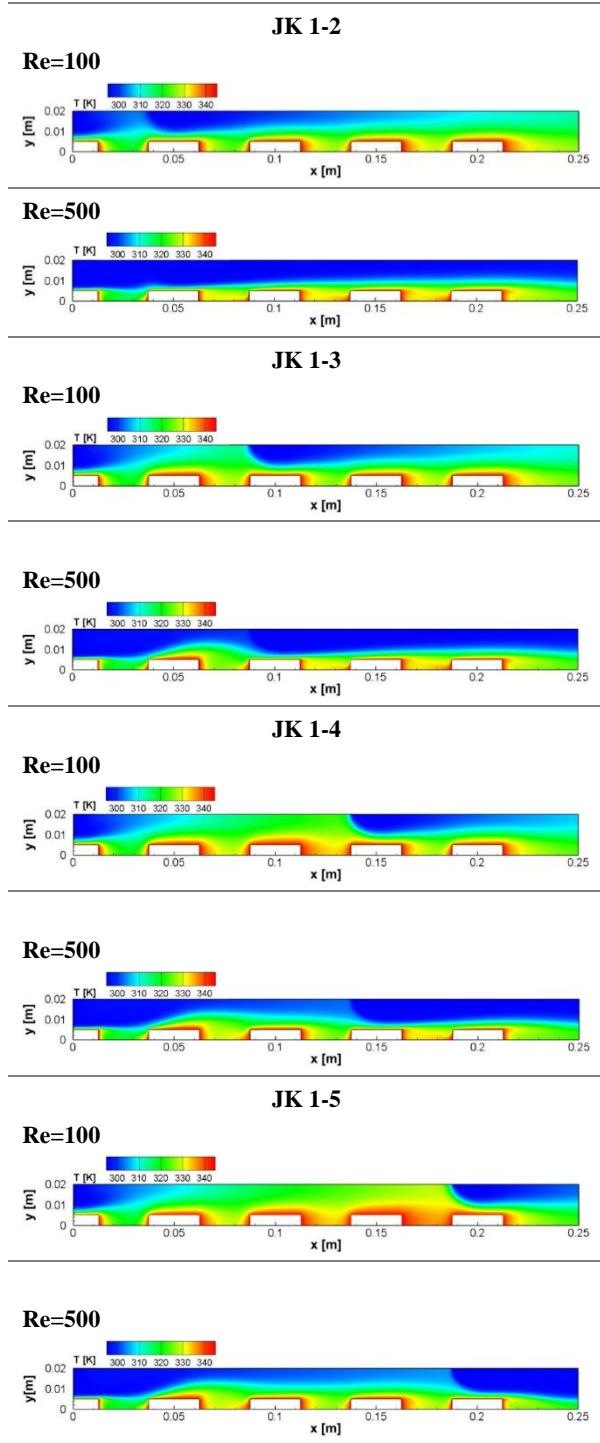
akış ve ısı transferine etkileri sayısal olarak ele alınmıştır. Farklı Reynolds sayıları ve nozül konumları için üst üste bindirilmiş hız konturları ve akım çizgileri şekil 4'te verilmiştir. Çalışılan tüm durumlarda ilk nozülden çıkan hava birinci kaynağın üst yüzeyine

çarparak basıncın daha düşük olduğu bölgeye yönelmektedir. İkinci nozülden çıkan hava ise, her iki nozülden çıkan hava hızlarının birbirlerine eşit olmasından dolayı sapmakta, yüzeye çarpmamakta ve doğrudan basıncın düşük olduğu kanal çıkışına yönelmektedir. Ayrıca, bu bölgede ilk jetin momentum katkısından dolayı yüksek hız bölgeleri ortaya çıkmaktadır. Çalışılan tüm durumlarda nozüller ile kanal cidarı arasındaki bölgede (jet nozüllerinin hemen sağında) ikincil akış bölgeleri ortaya çıkmaktadır. Bu bölgelerdeki resirkülasyon hücreleri saat yönünün tersi yönde dönmekte olup Reynolds sayısındaki artış ile genişlemektedir. Benzer şekilde ısı kaynaklarının arasında ve son kaynağın art bölgesinde ana akıştan ayrılan ikincil akışlar oluşmakta, bu bölgelerdeki resirkülasyon hücrelerinin genişliği Reynolds sayısı ile artmaktadır. Tüm nozül konumlarında ilk nozülden çıkan hava birinci kaynağa çarptıktan sonra ikinci kaynağa doğru yönelmekte ardından ikinci kaynağın köşe noktasına çarptıktan sonra yüzeyden ayrılmaktadır. JK 1-3, JK 1-4 ve JK 1-5 konumlarında ve $Re=500$ değerinde ise ikinci kaynağın üstünde meydana gelen ayrılmaya bağlı olarak ikinci kaynağın ardında oluşan ve saat yönünün tersi yönde dönen resirkülasyon hücresi üst yüzeyin merkezine doğru genişlemektedir. İkinci kaynağın hemen üzerinde ortaya çıkan hücrenin genişliği ikinci nozülün kanal çıkışına kaymasıyla birlikte artmaktadır. Son olarak, JK 1-2’de ikinci nozül hemen ikinci kaynağın üstünde konumlandırıldığından dolayı ilk nozülün momentum katkısı ile ortaya çıkan yüksek hız bölgeleri kanal içerisinde daha büyük bir bölgede etkili olmaktadır. İkinci nozülün çıkışa doğru kayması ile jet nozülleri arasında kalan bölgede akışkan hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir.

Farklı Reynolds sayıları ve nozül konumları için sıcaklık konturları Şekil 5’te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kanal içerisindeki sıcaklık dağılımı nozül konumu ve Reynolds sayısından önemli ölçüde etkilenmektedir. $Re=100$ için tüm nozül konumlarında daha geniş bir bölgede akışkan sıcaklığı daha yüksek iken $Re=500$ ’de kanalın üst cidarına yakın bölümlerde akışkan sıcaklığı daha düşüktür. JK 1-2’de özellikle bir ve ikinci kaynağın çevresinde ısı sınır tabaka daha inceyken çıkışa doğru ısı sınır tabaka kalınlaşmaktadır. JK 1-3, JK 1-4 ve JK 1-5’te ikinci kaynağın üst yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmasının etkisi sıcaklık konturlarında görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, bu bölgedeki akış ayrılması ve ikinci kaynağa doğru genişleyen resirkülasyon hücresinin varlığı ısı sınır tabaka kalınlığını önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, kaynakların arasındaki ikincil akışların akış bölgesindeki sıcaklık dağılımına olan etkileri sıcaklık konturlarından net şekilde görülmektedir. Bu bölgelerdeki saat yönünün tersi yönde oluşan resirkülasyon ısının da kaynaklardan aynı yönde uzaklaştırılmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, Reynolds sayısının artışı bu bölgelerdeki resirkülasyonun şiddetini artırdığından ısı kaynağından daha fazla ısı çekilmekte ve bu bölgelerde daha yüksek akışkan sıcaklıkları görülmektedir.



Şekil 4. Farklı Reynolds sayıları ve nozül konumları için üst üste bindirilmiş hız konturları ve akım çizgileri (Superimposed velocity contours and streamlines for various Reynolds numbers and nozzle positions)



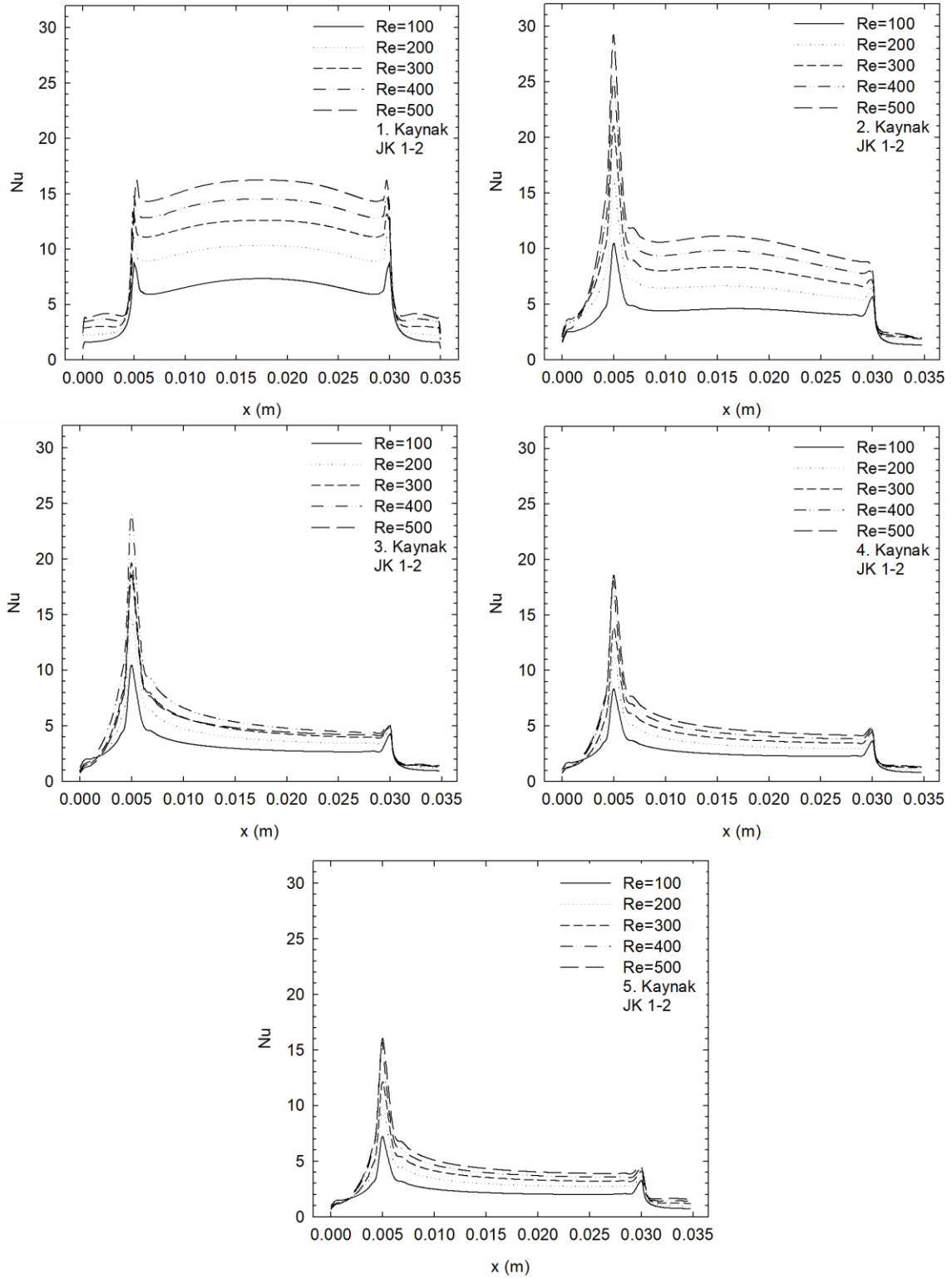
Şekil 5. Farklı Reynolds sayıları ve nozül konumları için elde edilen sıcaklık konturları (Temperature contours for various Reynolds numbers and nozzle positions)

Elektronik bileşenlerin yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayılarının nozül konumu ve Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6'da sunulmuştur. Beklendiği üzere Reynolds sayısının artışı yerel Nusselt sayısında artışa sebep olmakta, ısı kaynaklarından havaya taşınımıyla ısı transfer hızı artmaktadır. Jet akışının kaynaklara çarptığı üst yüzeylerde yerel Nusselt sayısı daha yüksek değerler alırken, zayıf ikincil akışların görüldüğü bölgelerde

taşınımıyla ısı transferi oldukça zayıftır. Problemin simetrik yapısından dolayı çalışılan tüm durumlarda ilk kaynağın yüzeylerinde yerel Nusselt sayısı simetrik bir değişim sergilemektedir. Tüm nozül konumları ve Reynolds sayılarında ilk kaynağın üst yüzeyinde yerel Nusselt sayısı merkezden köşelere doğru azalmaktadır. Bununla birlikte, yerel Nusselt sayısında kaynağın köşe noktalarında az da olsa bir artış olduğu görülmektedir. İlk kaynağın yan yüzeylerinde ise taşınımıyla ısı transferi oldukça zayıf olup yerel Nusselt sayısı sıfıra oldukça yakın değerler alır. Ayrıca tüm nozül konumları için ilk kaynağın yüzeylerinden havaya taşınımıyla ısı transfer hızı birbirlerine oldukça yakın olup bu durum yerel Nusselt sayısındaki değişimden anlaşılmaktadır. JK 1-2'de ikinci nozülün ikinci kaynağın hemen üzerinde olmasından dolayı bu kaynaktan havaya taşınımıyla ısı transfer hızı üçüncü, dördüncü ve beşinci kaynaklara oranla daha fazladır. Yukarıda bahsedildiği gibi, ikinci kaynağın köşesine ($x=0.005$ m) çarpan akışkan bu bölgede yerel Nusselt sayısının önemli ölçüde artmasına sebep olmakta, sonrasında ise üst yüzeyde yerel Nusselt sayısı akışkan sıcaklığındaki artışa bağlı olarak giderek azalmaktadır. Zayıf ikincil akışların olduğu kaynaklar arasındaki bölgelerde ise yerel Nusselt sayısı oldukça düşük değerler almaktadır. JK 1-3'te üçüncü kaynağın üst yüzeyindeki yerel Nusselt sayıları daha yüksek iken ikinci, dördüncü ve beşinci kaynak için hesaplanan değerler beklendiği gibi daha düşüktür. İkinci nozülün kanal çıkışına doğru kaymasıyla birlikte, birinci kaynağın yüzeylerinde hesaplanan değerler haricinde ikinci ve üçüncü kaynakların yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayıları çok düşük değerler almaktadır. Bu durum, yukarıda açıklandığı gibi ikinci nozülün çıkışa kaymasıyla birlikte yüksek hızların sınırlı bir bölgede etkili olmasından kaynaklıdır. JK 1-4 ve JK 1-5'te ise beklendiği gibi sırasıyla dördüncü ve beşinci kaynaklardan havaya taşınımıyla ısı transfer hızı diğer kaynaklara oranla daha yüksektir.

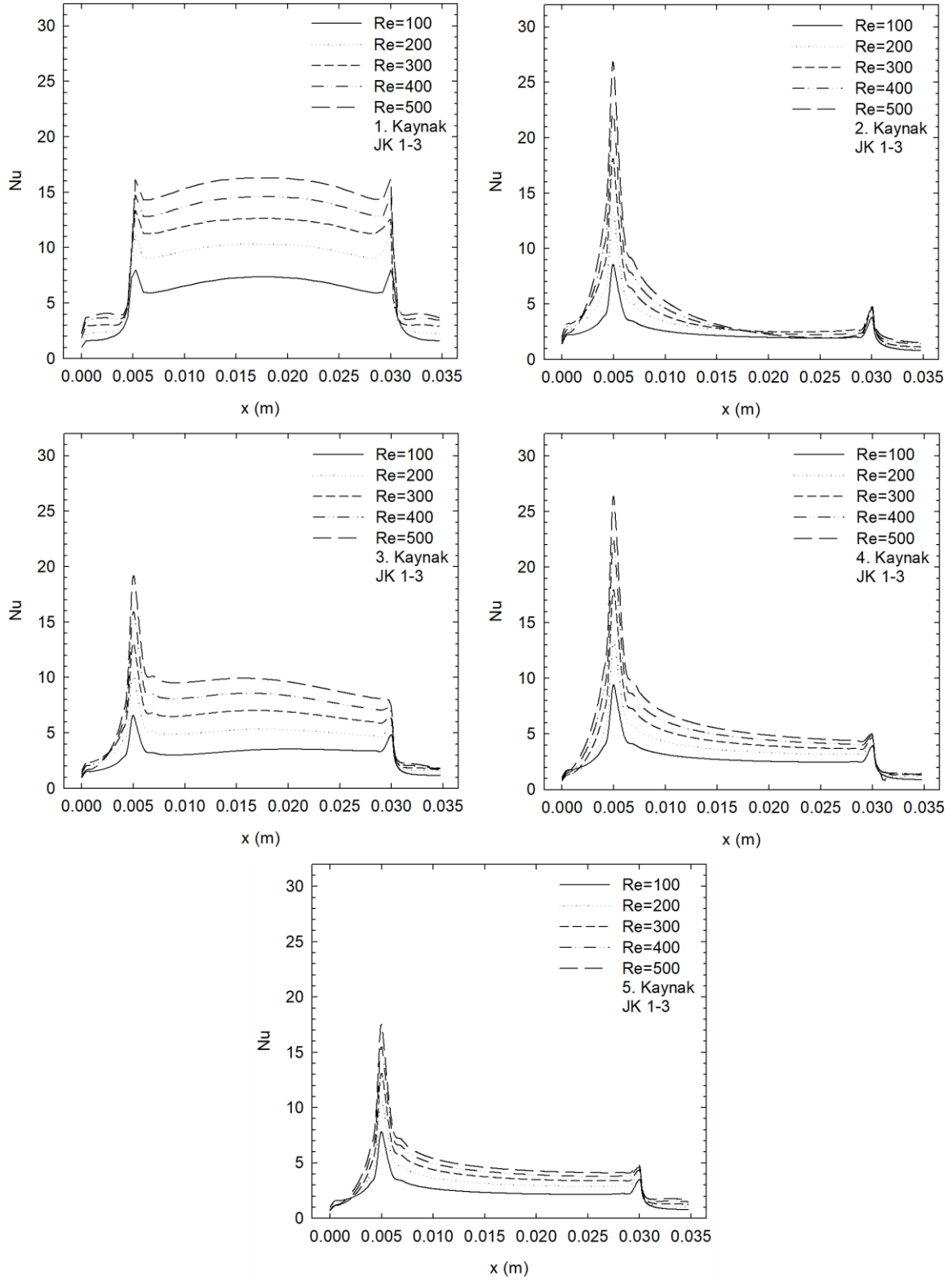
Ortalama Nusselt sayısının nozül konumu ve Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 7'den görüldüğü üzere, tüm nozül konumlarında Reynolds sayısı ile birlikte ortalama Nusselt sayısı artmaktadır. Bu, beklenen bir durum olup akışkanın artan hızına bağlı olarak ısı kaynaklarından havaya taşınımıyla ısı transferinin arttığını gösterir. JK 1-2'de ortalama Nusselt sayısı ilk bileşenden son bileşene doğru giderek azalmaktadır. Bu durum, bileşenlerden ısıyı çeken havanın giderek ısınmasından dolayı soğutma kapasitesinin azalmasından kaynaklanır. JK 1-3'te ikinci nozül üçüncü kaynağın hemen üstünde konumlandırıldığından dolayı ikinci kaynaktan havaya taşınımıyla ısı transferinde ani bir düşüş görülürken üçüncü kaynak yüzeyinde ise ortalama Nusselt sayısında artış meydana gelmektedir. Ardından, beklendiği gibi kanal çıkışına doğru ortalama Nusselt sayısı giderek azalmaktadır. JK 1-4 konumunda, JK 1-3'e benzer şekilde ilk üç kaynak için hesaplanan ortalama Nusselt sayıları giderek azalırken dördüncü kaynaktan ani bir artış meydana gelmekte, sonrasında ise ortalama Nusselt

sayısı tekrar azalmaktadır. JK 1-5'te ise taşınımla ısı transferi birinci kaynaktan itibaren giderek azalırken ikinci nozülün konumuna bağlı olarak beşinci kaynaktaki ani şekilde artış sergilemiştir.



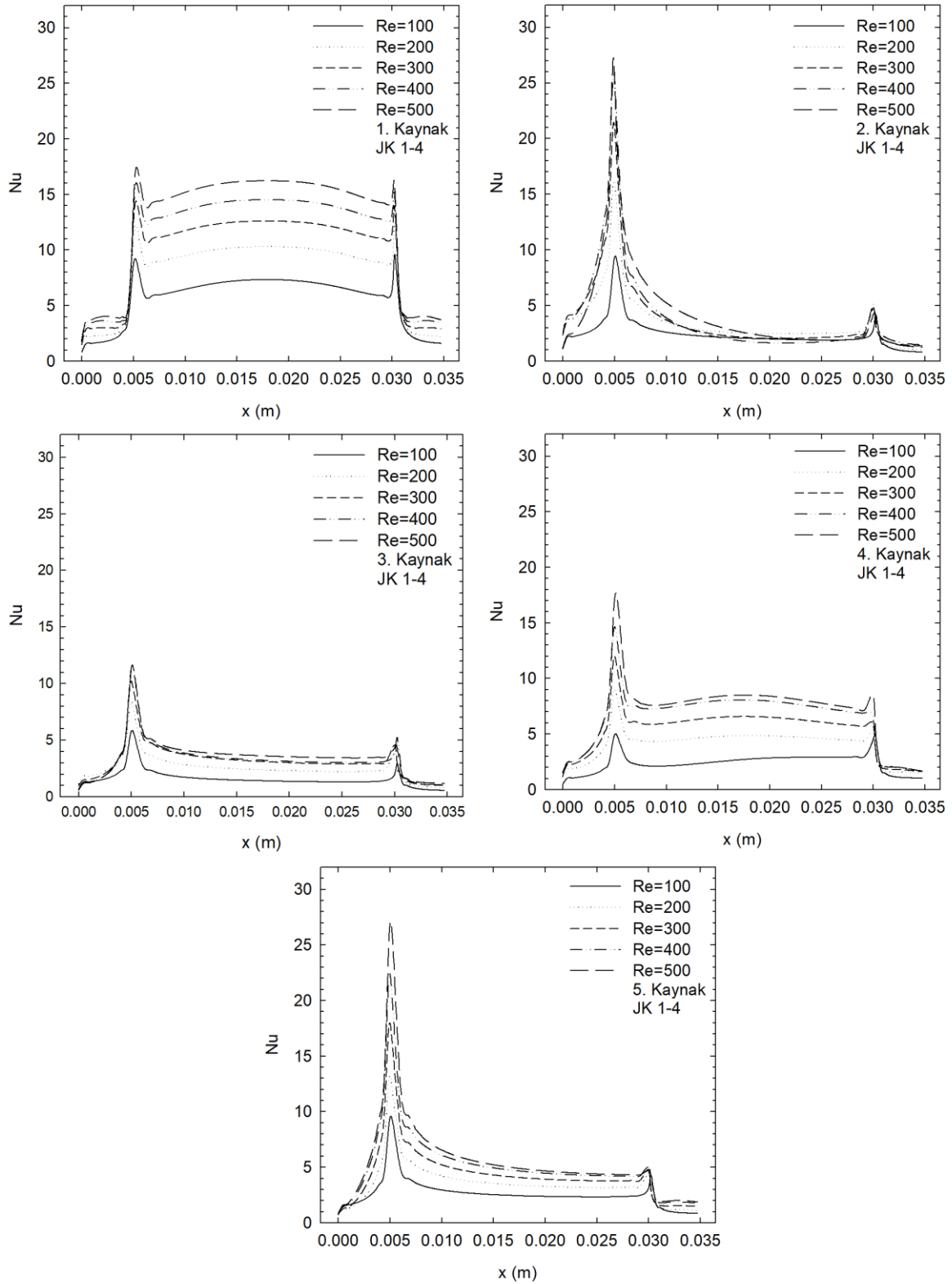
a

Şekil 6. Isı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Local Nusselt number variation on the heat sources' surfaces with Reynolds number and nozzle position)



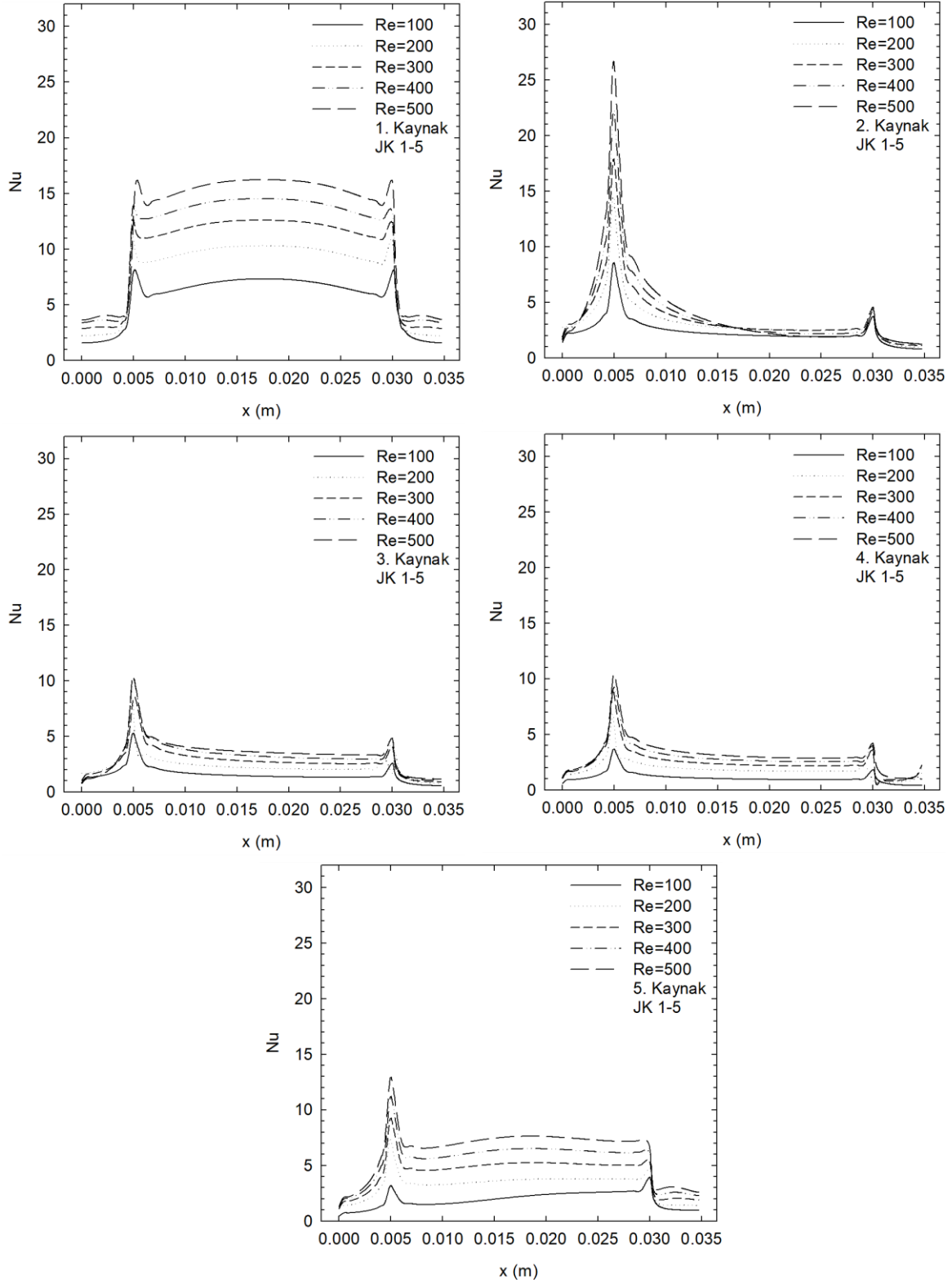
b

Şekil 6. Isı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Local Nusselt number variation on the heat sources' surfaces with Reynolds number and nozzle position)



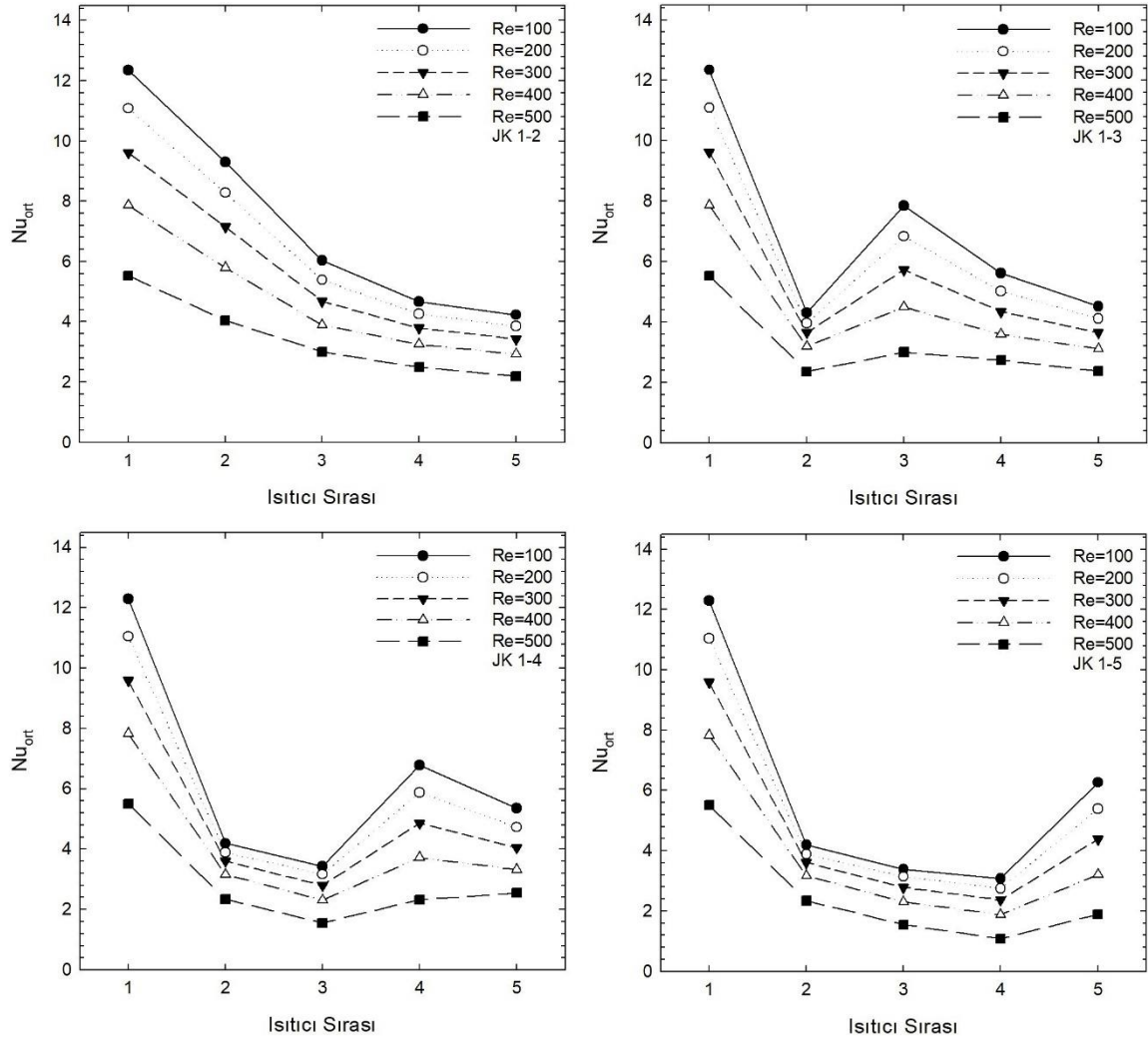
C

Şekil 6. Isı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Local Nusselt number variation on the heat sources' surfaces with Reynolds number and nozzle position)



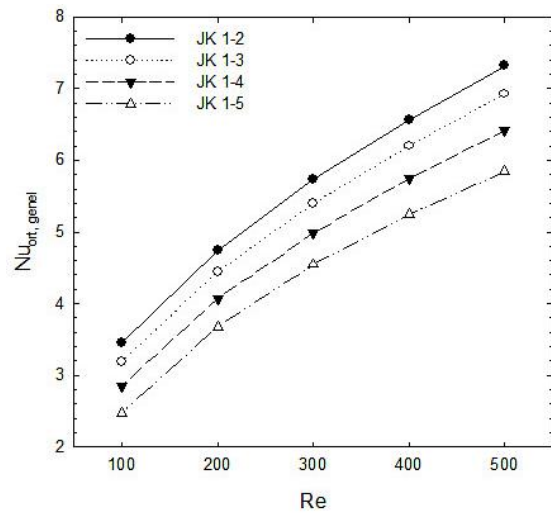
d

Şekil 6. Isı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan yerel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Local Nusselt number variation on the heat sources' surfaces with Reynolds number and nozzle position)



Şekil 7. Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Mean Nusselt number variation with Reynolds number and nozzle position)

Isı kaynaklarının tamamı için hesaplanan genel ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, genel ortalama Nusselt sayısı, tüm ısı kaynaklarının yüzeylerinde hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Şekil 8’den görüldüğü gibi, genel ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısı ile birlikte artarken taşınımın ısı transferinin en yüksek olduğu durum JK 1-2’dir. İkinci nozülün kanal çıkışına doğru kayması ise genel ortalama Nusselt sayısını azaltmaktadır. İncelenen tüm çalışma durumları göz önünde bulundurulduğunda, birinci nozülün konumu sabit tutulurken jet nozülleri arasındaki mesafenin artışı ile yüksek hızların etkili olduğu bölgenin küçülmesi ile sistemin ısı transfer kapasitesinin giderek azaldığı sonucuna ulaşılır.



Şekil 8. Genel ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve nozül konumu ile değişimi (Overall mean Nusselt number variation with Reynolds number and nozzle position)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında ayrıık ısı kaynaklarının bir çift slot jet ile soğutulmasında nozül konumunun akış ve ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çalışılan tüm durumlarda jet nozülleri ile kanal duvarı arasında kalan bölümde saat yönünün tersi yönde dönmekte olan ikincil akışlar oluşmaktadır.
- Isı kaynaklarının arasında ve son kaynağın ardında oluşan zayıf ikincil akışlara bağlı olarak bu bölgelerdeki taşınım ile ısı transfer hızları da düşüktür.
- JK 1-2’de yüksek akışkan hızları geniş bir bölgede etkili olurken ikinci jetin konumu kanal çıkışına kaydıka yüksek akışkan hızları daha sınırlı bir bölgeye etki etmektedir.
- İkinci jetin konumundan bağımsız olarak birinci ısı kaynağının yüzeylerinde hesaplanan ortalama Nusselt sayıları her zaman için en yüksek değerleri almaktadır.
- İkinci jetin konumundaki değişimle birlikte sistemin genel ısı transfer hızı da değişmekte olup en yüksek ısı transfer hızları JK 1-2’de, en düşük ısı transfer hızları ise JK 1-5’te elde edilmektedir.
- Daha geniş bir Reynolds sayısı aralığında türbülanslı akış rejimini kapsayacak şekilde farklı hız oranları için yapılan çalışmalar genişletilebilir.
- Zayıf ikincil akış bölgelerindeki ısı transferini iyileştirmek amacıyla bu bölgelerde akış yönlendiriciler kullanılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Buğra SARPER: Sonuçların analizi, taslağın revizyonu.

Nida Emin KİRİŞÇİ: Sayısal çalışmalar, sonuçların analizi, ilk taslak metin.

Melisa ALBAYRAK: Sayısal çalışmalar, sonuçların analizi, ilk taslak metin.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Sarper, B., Birinci, S., Saglam, M. and Aydin, O., “Constructal Enhancement of Cooling Performance of Local Heating Elements with Different Heat Generation Rates under Free and Mixed Convection”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 135: 106145, (2022).
- [2] Yeh, L. T., “Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment”, *Journal of Electronic Packaging*, 117, 333-339, (1995).
- [3] Bar Cohen, A., Watye, A. A., Prasher, R. S., “Heat Transfer in Electronic Equipment”, in: Bejan, A., Kraus, A. D. (Eds.), *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons Inc., New York, 947-1028, (2003).
- [4] Barik, A. K., Rout, S. and Mukherjee, A., “Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement from a Protruded Surface by Cross-flow Jet using Al₂O₃-water Nanofluid”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101: 550-561, (2016).
- [5] Dutta, S. and Singh, P., “Opportunities in Jet-Impingement Cooling for Gas-Turbine Engines”, *Energies*, 14: 6587, (2021).
- [6] Shariatmadar, H., Momeni, A., Karimi, A. and Ashjaee, M. “Heat Transfer Characteristics of Laminar Slot Jet Arrays Impinging on a Constant Target Surface Temperature”, *Applied Thermal Engineering*, 76: 252-260, (2015).
- [7] Yang, L., Li, Y., Ligrani, P.M., Ren, J. and Jiang, H., “Unsteady Heat Transfer and Flow Structure of a Row of Laminar Impingement Jets, Including Vortex Development”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88: 149-164, (2015).
- [8] Sarper, B., Saglam, M. and Aydin, O., “Constructal Placement of Discrete Heat Sources with Different Lengths in Vertical Ducts under Natural and Mixed Convection”, *Journal of Heat Transfer*, 140: 121401, (2018).
- [9] Birinci, S., Saglam, M., Sarper, B. and Aydin, O., “Effect of Heaters’ Clearance on Mixed Convection Cooling Performance in a Discretely Heated Horizontal Duct”, *International Journal of Thermal Sciences*, 163: 106859, (2020).
- [10] Al-Sanea, S., “Numerical Study of the Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Laminar Slot-jet Including Crossflow Effects”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35: 2501-2513, (1991).
- [11] Chen, M., Chalupa, R., West, A.C. and Modi, V., “High Schmidt Mass Transfer in a Laminar Impinging Slot Jet Flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 3907-3915, (2000).
- [12] Garimella, S.V. and Schroder, V.P., “Local Heat Transfer Distributions in Confined Multiple Air Jet Impingement”, *Journal of Electronic Packaging*, 123: 165-172, (2001).
- [13] Li, X., Gaddis, J.L. and Wang, T., “Multiple Flow Patterns and Heat Transfer in Confined Jet Impingement”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26: 746-754, (2005).
- [14] Arquis, E., Rady, M.A. and Nada, S.A., “A Numerical Investigation and Parametric Study of Cooling an Array of Multiple Protruding Heat Sources by a Laminar Slot Air Jet”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28: 787-805, (2007).
- [15] Sivasamy, A., Selladurai, V. and Kanna, P.R., “Numerical Simulation of Two-Dimensional Laminar Slot-Jet Impingement Flows Confined by a Parallel

- Wall”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55: 965–983, (2007).
- [16] Dağtekin, İ. and Öztop, H.F., “Heat Transfer Due to Double Laminar Slot Jets Impinging onto an Isothermal Wall within One Side Closed Long Duct”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35: 65–75, (2008).
- [17] Saeid, N.H., “Effect of Oscillating Jet Velocity on the Jet Impingement Cooling of an Isothermal Surface”, *Engineering*, 1: 133-139, (2009).
- [18] Nada, S.A., “Buoyancy and Cross Flow Effects on Heat Transfer of Multiple Impinging Slot Air Jets Cooling a Flat Plate at Different Orientations”, *Heat Mass Transfer*, 45:1083–1097, (2009).
- [19] Lee, D.H., Park, H.J. and Ligrani, P., “Milliscale confined impinging slot jets: Laminar Heat Transfer Characteristics for an Isothermal Flat Plate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 2249–2260, (2012).
- [20] Di Lorenzo, G., Manca, O., Nardini, S. and Ricci D., “Numerical Study of Laminar Confined Impinging Slot Jets with Nanofluids”, *Advances in Mechanical Engineering*, 248795, 15, (2012).
- [21] Afroz F. and Sharif, M.A.R., “Numerical Study of Heat Transfer from an Isothermally Heated Flat Surface due to Turbulent Twin Oblique Confined Slot-jet Impingement”, *International Journal of Thermal Sciences*, 74: 1-13, (2013).
- [22] Yousefi-Lafouraki, B., Ramiar, A. and Ranjbar, A.A., “Laminar Forced Convection of a Confined Slot Impinging Jet in a Converging Channel”, *International Journal of Thermal Sciences*, 77: 130-138, (2014).
- [23] Al-Rmah, M.A. and Mohamad, A.A., “Simulation of Multi-internal Confined Impinging Jets using the Lattice Boltzmann Method”, *Applied Thermal Engineering*, 81: 288-296, (2015).
- [24] Lam, P.A.K. and Prakash, K.A., “A Numerical Investigation of Heat Transfer and Entropy Generation During Jet Impingement Cooling of Protruding Heat Sources Without and with Porous Medium”, *Energy Conversion and Management*, 89: 626–643, (2015).
- [25] Lam, P.A.K. and Prakash, K.A., “Thermodynamic Investigation and Multi-Objective Optimization for Jet Impingement Cooling System with Al₂O₃/Water Nanofluid”, *Energy Conversion and Management*, 111: 38–56, (2016).
- [26] Guoneng, L., Zhihua, X., Youqu, Z., Wenwen, G. and Cong D., “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, (2016).
- [27] Zhou, T., Xu, D., Chen, J., Cao, C. and Ye, T., “Numerical Analysis of Turbulent Round Jet Impingement Heat Transfer at High Temperature Difference”, *Applied Thermal Engineering*, 100: 55–61, (2016).
- [28] Goodfriend, E., Chow, F.K., Vanella, M. and Balaras, E., “Large-Eddy Simulation of Flow Through an Array of Cubes with Local Grid Refinement”, *Boundary-Layer Meteorology*, 159: 285–303, (2016).
- [29] Buonomo, B., Lauriat, G., Manca, O. and Nardini, S., “Numerical Investigation on Laminar Slot-jet Impinging in a Confined Porous Medium in Local Thermal Non-equilibrium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98: 484–492, (2016).
- [30] Buonomo, B., Manca, O., Nappo, S. and Nardini S., “Numerical Investigation on Laminar Slot-Jet Impinging on a Surface at Uniform Heat Flux in a Channel Partially Filled with a Porous Medium”, *Energy Procedia*, 148: 790–797, (2018).
- [31] Lam, P.A.K. and Prakash, K.A., “A Numerical Investigation and Design Optimization of Impingement Cooling System with an Array of Air Jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108: 880–900, (2017).
- [32] Kılıç, M., “Elektronik Sistemlerin Soğutulmasında Nanoakışkanlar ve Çarpan Jetlerin Müşterek Etkisinin İncelenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi*, 33: 121-132, (2018).
- [33] McInturff, P., Suzuki, M., Ligrani, P., Nakamata, C. and Lee D.H., “Effects of Hole Shape on Impingement Jet Array Heat Transfer with Small-Scale, Target Surface Triangle Roughness”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127: 585–597, (2018).
- [34] Kashi, B. and Haustein, H.D., “Dependence of Submerged Jet Heat Transfer on Nozzle Length”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121: 137–152, (2018).
- [35] Gurturk, M. and Oztop, H.F., “Cooling of the Heated Circular Porous Disc with a Circular Jet”, *Sakarya University Journal of Science*, 23: 676-695, (2019).
- [36] Alnak, D.E., Karabulut, K. and Koca, F., “Investigation of heat transfer from heated square patterned surfaces in a rectangular channel with an air jet impingement”, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3: 78-86, (2019).
- [37] Wang, C., Wang, Z., Wang, L., Luo, L. and Sundén B., “Experimental Study of Fluid Flow and Heat Transfer of Jet Impingement in Cross-Flow with a Vortex Generator Pair”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135: 935–949, (2019).
- [38] Paulraj, M.P., Byon, C., Vallati, A. and Parthasarathy, R.K., “A Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer of Laminar Multiple Slot Jets Impinging on Multiple Protruding Heat Sources”, *Heat Transfer Engineering*, 41: 65-83, (2020).
- [39] Kaya, H., “İkili Çarpan Jet ile Soğutulan Sıcak Plakanın Yüzey Şeklinin Isı Transferine Etkisinin Sayısal Analizi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9: 152-163, (2021).
- [40] Hosseinalipour, S.M., Rashidzadeh, S., Moghimi, M. and Esmailpour, K., “Numerical Study of Laminar Pulsed Impinging Jet on the Metallic Foam Blocks using the Local Thermal Non-Equilibrium Model”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141: 1859–1874, (2020).
- [41] Li, H., Deng, H. and Qui, L., “Effect of Channel Orientation on Heat Transfer in a Rotating Impingement Cooling Channel”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 187: 122493, (2022).
- [42] Martinez-Filguera, P., Portal-Porras, K., Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E. and Soriano, J., “Experimental and Numerical Modeling of an Air Jet Impingement System”,

- European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 94: 228-245, (2022).
- [43] Singh, P.K., Renganathan, M., Yadav, H., Sahu, S.K., Upadhyay, P.K. and Agrawal, A., “An Experimental Investigation of the Flow-Field and Thermal Characteristics of Synthetic Jet Impingement with Different Waveforms”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 187: 122534, (2022).
- [44] Albayrak, M., Sarper, B., Birinci, S., Saglam, M. and Aydin, O., “Effect of Surface Radiation on Jet Impingement Cooling of a Concave Surface”, Proceedings of CONV-22: *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer*, Turkey, June 5 – 10, 512-522, (2022).
- [45] “ANSYS Fluent Release 21 R2 Theory Guide”, *Ansys Inc.*, (2021).
- [46] Sharif, M. A. R., “Heat Transfer from an Isothermally Heated Flat Surface due to Confined Laminar Twin Oblique Slot-Jet Impingement” *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 7, 031001, (2015).