



Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination

Muhammed Serdar Öztürk¹, Tolga Demircan*²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Highlights:

- A hybrid cooling system consisting of cross-flow and jet flow combination.
- As the V_j/V_k ratio increased, heat transfer increased.
- As the fin angle increased, heat transfer increased.

Keywords:

- Cross-flow
- Jet flow
- Fin angle
- Electronic component cooling

Article Info:

Research Article
Received: 25.09.2020
Accepted: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.799793

Correspondence:

Author: Tolga Demircan
e-mail:
tolgademircan@gmail.com
phone: +90 554 314 4007

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the cooling of the electronic component with constant heat flux positioned at the base of a rectangular cross-sectional channel was analyzed. For this purpose, a hybrid flow with uniform constant V_k velocity and air send from a circular nozzle at V_j velocity simultaneously is considered. It was planned that a complex flow structure and heat transfer will occur around the electronic component when these two flow impinges to the electronic component. Schematic representation of this problem geometry was given in Figure A. Within this scope, the effects of change of flow-guiding fin angle positioned inside the problem geometry on flow structure and heat transfer is considered. The numerical analysis is conducted for different V_j/V_k (jet inlet velocity to channel inlet velocity ratio) and different fin angle are conducted with Computational Fluid Dynamics (CFD).

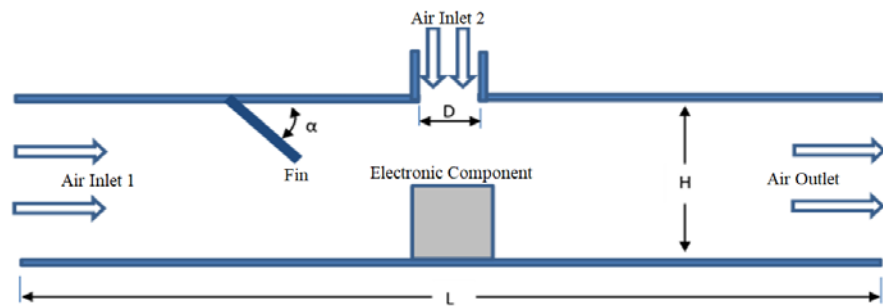


Figure A. Schematic representation of the problem

Purpose: The purpose is to cool down a high-temperature electronic component more effectively with a hybrid cooling system consisting of cross-flow and jet flow.

Theory and Methods:

In this study, H/D (the ratio between jet and impinging surface distance and jet diameter) ratio is taken constant as 3, V_j/V_k ratio values are changed as 0, 1, 2 and 3 and fin angle value (α) is changed 0°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90° and simulations are repeated. To better see the effects of the fin angle, the obtained results are compared with non-fin state ($\alpha=0$). Within this scope, the effect of V_j/V_k ratio and fin angle (α) on flow structure on electronic component, temperature distribution and Nusselt numbers are analyzed.

Results:

When the obtained results are analyzed, with increasing fin angle (α) or V_j/V_k ratio when other parameters are constant, it is seen that heat transfer on the electronic component surfaces generally increased. The maximum heat transfer on the electronic component surface is reached for $V_j/V_k=3$ and $\alpha=90^\circ$. It is observed that higher heat transfer can occur for higher fin angle and V_j/V_k ratio compared to other fin angles.

Conclusion:

As a result, it is possible to say that the increase in flow-guiding fin angle with channel upper surface and V_j/V_k ratio have a positive effect on the heat transfer.



Elektronik bir elemanın çarpın jet ve çapraz akış kombinasyonu ile soğutulmasında, kanatçık açısının akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerinin sayısal olarak incelenmesi

Muhammed Serdar Öztürk¹, Tolga Demircan*²

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Çapraz akış ve jet akışın kombinasyonundan oluşan hibrit bir soğutma sistemi
- V_j/V_k oranı arttıkça ısı transferi de artmıştır
- Kanatçık açısı arttıkça ısı transferi de artmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 25.09.2020
Kabul: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.799793

Anahtar Kelimeler:

Çapraz akış,
jet akış,
kanatçık açısı,
elektronik eleman
soğutulması

ÖZ

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpın hava jeti ve çapraz akış kombinasyonu ile soğutulması sayısal olarak incelenmiştir. Problem geometrisi içerisine yerleştirilmiş akış yönlendirici kanatçığın açısının değişiminin, akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkileri üzerine odaklanılmıştır. Bu amaçla, farklı V_j/V_k (jet giriş hızının kanal giriş hızına oranı) oranları ve farklı kanatçık açıları için Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımı ile sayısal analizler yapılmıştır. Bu kapsamda, H/D (jet ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafenin jet çapına oranı) oranı 3 olarak sabit alınmış, V_j/V_k oranının değeri 0, 1, 2 ve 3 ve kanatçık açısının (α) değeri ise 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° olacak şekilde değiştirilerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Kanatçık açısının etkilerinin daha iyi görülebilmesi için elde edilen sonuçlar, kanatçiksiz ($\alpha = 0$) durum ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, diğer parametreler sabit iken kanatçık açısının (α) veya V_j/V_k oranının artması ile elektronik elemanın yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferinin genel olarak arttığı görülmüştür. Elektronik elemanın yüzeylerinden gerçekleşen maksimum ısı transferine $V_j/V_k=3$ ve $\alpha=90^\circ$ de ulaşılmıştır. Yüksek kanatçık açısı ve V_j/V_k oranında diğer kanatçık açılarna kıyasla daha yüksek ısı transferi gerçekleştirileceği gözlemlenmiştir.

Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination

HIGHLIGHTS

- A hybrid cooling system consisting of cross-flow and jet flow combination
- As the V_j/V_k ratio increased, heat transfer increased
- As the fin angle increased, heat transfer increased

Article Info

Research Article
Received: 25.09.2020
Accepted: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.799793

Keywords:

Cross-flow,
impinging jet,
fin angle,
electronic cooling

ABSTRACT

In this study, cooling by using impinging air jet and cross-flow combination (IJCF) for an electronic component with constant heat flux is investigated. The effects of change of flow-guiding fin angle positioned inside the problem geometry on flow structure and heat transfer is considered. For this purpose, numerical analysis is conducted for different V_j/V_k (jet inlet velocity to channel inlet velocity ratio) and different fin angle is conducted with Computational Fluid Dynamics (CFD). Within this context, H/D (the ratio between the jet and impinging surface distance and jet diameter) ratio is taken constant as 3, V_j/V_k ratio values are changed as 0, 1, 2 and 3 and fin angle value (α) is changed 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ and 90° and simulations are repeated. To better see the effects of the fin angle, the obtained results are compared with the non-fin state. When the obtained results are analysed, with increasing fin angle (α) or V_j/V_k ratio when other parameters are constant, it is seen that heat transfer on the electronic component surfaces generally increased. The maximum heat transfer on the electronic component surface is reached for $V_j/V_k=3$ and $\alpha=90^\circ$. It is observed that higher heat transfer can occur for higher fin angle and V_j/V_k ratio compared to other fin angles.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : muhammedserdarozturk@gmail.com, *tolgademircan@gmail.com /

Tel: +90 554 314 4007

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde bilim ve teknolojinin ilerlemesine paralel olarak elektronik cihazlarda sürekli gelişmektedir. Genel olarak tüm elektronik cihazlar, elektronik devreler içermektedir. Elektronik cihazlar çalışırken, elektronik devreler ısınmakta ve yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Eğer bu devre elemanları soğutulmaz ve güvenli çalışma sıcaklıklarına indirilemez ise, cihazın bozulmasına sebep olabilmektedir. Isınan elektronik devrelerin soğutulabilmesi için birçok soğutma yöntemi kullanılabilir. Bunlardan en bilineni çapraz akış ile soğutma işlemidir. Bu yöntem, bir fan yardımı ile soğuk akışkanın tüm elektronik devre üzerine gönderilmesi ve tüm devre elemanlarının birlikte soğutulması prensibi ile çalışır. Ancak bu yöntem, çok yüksek sıcaklıklara ulaşmış devre elemanlarının soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Diğer bir soğutma yöntemi ise, lokal bölgelerin soğutulabilmesi için kullanılan çarpan jet ile soğutma yöntemidir. Bu yöntem ise, bir lüle aracılığı ile soğuk akışkanın, yüksek sıcaklıktaki bir yüzeye püskürtülmesi prensibine dayanır. Çarpan jetler, çok yüksek sıcaklığa ulaşmış bir devre elemanının soğutulmasında yeterli iken, tüm elektronik devrenin tamamının soğutulmasında ise yetersiz kalabilmektedir.

Bir elektronik devre birçok farklı tip elektronik eleman içerebilmektedir. Bu elemanların ulaştığı sıcaklık değerleri birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Dolayısıyla sadece çapraz akış ile soğutma veya sadece çarpan jet ile soğutma, tüm devre elemanlarının tamamının birlikte soğutulması ve güvenli çalışma sıcaklıklarına ulaştırılabilmesi için yetersiz kalabilmektedir. Bu iki tip soğutma yönteminin birlikte, kombine bir şekilde kullanılmasında daha verimli bir soğutma sağlayabilmektedir. Bu yöntemde, çapraz akış vasıtası ile tüm devre elemanları belirli bir aşamaya kadar soğutulurken, devre içerisinde sadece çok yüksek sıcaklıklara çıkmış olan elektronik elemanlar ise jet akış vasıtası ile lokal olarak soğutulabilmektedir. Literatür incelendiğinde çapraz akış veya jet akışın tekil olarak kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen geometrinin daha çok jet akışı anımsatmasından ötürü, literatür araştırmasında jet akış üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde çarpan jetler ile ilgili çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda genel olarak çarpan jetlerin akışkan seçimi, akış alanının geometrisi, seçilen türbülans modeli, Reynolds sayısı, lüle ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe ve elektronik elemanın ısı akışı gibi parametrelerin ısı transferine etkileri üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür. Bu çalışmalardan bir kısmına aşağıda değinilmiştir.

Hadipour vd. [1], sabit ısı akısına sahip içbükey bir yüzey üzerine çarpan dairesel bir jetin akış ve ısı transferi özelliklerini, küçük jet-plaka mesafelerinde deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. H/D oranı 0,1-4, Reynolds sayısının 10000-35000 ve jet çaplarının 18-30 mm arasındaki değerlerini için çalışmışlardır. Aynı Reynolds sayılarında jet çapının artmasının ısı transferini arttırdığını

gözlemlemişlerdir. Küçük jet plaka mesafelerinde daha iyi ısı transferi sağlandığını belirtmişlerdir. Reynolds sayısı 10000 ve H/D oranı 0,1 iken, sırasıyla H/D oranı 0,4, 1 ve 4'e kıyasla ortalama Nusselt sayısının değerinin %44,5, %55,3 ve %92 oranında daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Wongcharee vd. [2], dönen akışın çarpan jet soğutmasındaki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada soğutucu akışkan olarak su ve değişken nano parçacık konsantrasyonlu (%2,0, %3,0 ve %4,0) CuO nano akışkanını kullanmışlardır. H/D oranı 2-4, y/w (bükülme genişlik oranı) oranı 1,43-4,28 ve Reynolds sayısı 1600-9400 değerleri arasında çalışmalar yapmışlardır. H/d oranı arttıkça Nusselt sayısının azaldığını belirtmişlerdir. %2,0 ve %3,0 nano parçacık konsantrasyonlu nano akışkanların saf sudan daha yüksek ısı transferi sağladığını ama %4,0 nano parçacık konsantrasyonlu nano akışkanın saf sudan daha düşük sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Maksimum ısı transferini H/d=2, y/w=1,43 ve %2,0 nano parçacık konsantrasyonunda gözlemlemişlerdir.

Çalışır [3] yapmış olduğu çalışmada üçgen, kare ve yamuk kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış ve ısı transferini çarpmalı jet dizileri kullanarak PHOENICS paket programı ile sayısal olarak incelemiştir. Tek bir büyük jet kullanmak yerine dikdörtgenel biçimde dizilmiş jetleri tercih etmişler ve jetlerin tam altında ve iki jetin tam ortasında olacak şekilde iki farklı kanatçık düzenlemesi uygulamıştır. Reynolds sayısı 3000-10000, H/d oranı 2-8 ve d/e (jet çapının kanatçık yüksekliğine oranı) oranı 1,5-3 değerleri için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Tüm simülasyonlarda en yüksek ısı transferini H/d=4-6 aralığında, en düşük ısı transferini ise H/d=8'de gözlemlemiştir. Kanatçık yüksekliğinin ısı transferi üzerindeki etkisinin az olduğunu belirtmiştir. Baydar [4], alt yüzeye doğru dik bir şekilde püskürtülmesi sonucu oluşan akış alanını deneysel olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 500-10000 arasındaki değerleri ve H/D oranının 0,5-4 arasındaki değerleri için incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Reynolds sayısının 2700'den büyük ve H/D oranının 2'den düşük olduğu durumlarda, tek ve çift jet uygulamaları için çarpma plakasının üzerinde atmosfer basıncından düşük basınçlı bölgelerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu bölgelerin ikincil tepe noktaları ile bağlantılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Köseoğlu [5], jet ile çarpma yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ısı transferine etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 250-10000, H/D oranı 2-12, ısı akısı (q'') 10-3000 değerleri arasında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Düşük Reynolds sayılı jet akışlarında ısı transferinde %35 civarında artış görmüştür. Jet kesit alanının artmasının ısı transferini ciddi bir şekilde etkilediğini ve artan en boy oranının ısı transferini azalttığını belirtmiştir.

Choo vd. [6] eğimli bir çarpan jetin, küçük jet-plaka mesafelerinde ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda eğim açısının $0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$, jet plaka mesafesinin $H/dh \leq 1$ ve Reynolds sayısının 5000-

15000 arasındaki değerlerini incelemişlerdir. Ayrıca küçük jet plaka mesafesini ($H/dh \leq 1$), büyük jet plaka mesafesiyle ($H/dh > 1$) karşılaştırmışlardır. Küçük jet plaka mesafelerinde çarpma noktası ve ortalama Nusselt sayısının eğim açısı arttıkça arttığını, büyük jet plaka mesafelerinde ise çarpma noktası ve ortalama Nusselt sayısının eğim açısı arttıkça düştüğünü gözlemlemişlerdir. Çelik [7], çarpan jetlerin optimum lüle şekli belirleyebilmek için birbirinden farklı düz dairesel ve eş eksenli lülelerin ısı transferi etkilerini ve akış dinamiğini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada Reynolds sayısı 5000-25000, h/d oranı 4-12 arasındaki değerleri incelemiştir. Yaptığı çalışmaların sonucunda eş eksenli lülelerde kesitten geçen akımların karışması sonucunda akış hızlarının artması ısı transferini olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir. Ancak h/d oranının artması ile ısı transferinin olumsuz yönde etkilenmeye başladığını görmüştür. Bölek [8], çarpan jetlerin farklı düzlemlere çarpıtılması sonucu oluşan akış ve ısı transferini farklı Reynolds sayılarında ve H/D oranlarında sayısal olarak incelemiştir. En uygun türbülans modelini seçebilmek için yedi farklı türbülans modelini karşılaştırmıştır ve çalışmasının sonucunda en uygunu olarak Standart $k-\epsilon$ türbülans modelini seçmiştir. En yüksek ısı transferini Reynolds sayısı 20000 ve H/D mesafesi 6 iken gözlemlemiştir.

San ve Chen [9], sabit ısı akısına sahip düz bir plakaya dikey olarak yerleştirilen beş adet dairesel jetin ısı transferine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında s/d (jet-jet aralığının jet çapına oranı) oranı 2-8, H/d oranı 0,5-3 ve Reynolds sayısının 20000 değerleri için incelemelerde bulunmuşlardır. Çarpma plakasındaki jet etkileşiminin s/d ve H/d oranları arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. s/d oranının 6 ve üst değerlerine çıkınca bütün H/d oranları için jetler diğer jetleri ciddi bir şekilde etkileyemeyecek duruma geldiğinden dolayı, s/d oranının artması ile jet dizilerinin etkili soğutma alanlarını büyük ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir. s/d oranının 2'den 8'e yükselmesinin maksimum Nusselt sayısını %7'den %45'e kadar arttırdığını görmüşlerdir. Sun vd. [10], çarpan jetlerin soğutma performansını farklı nano parçacık konsantrasyonlarına, jet çaplarına ve jet uzunluğuna göre değişimini deneysel olarak incelemişlerdir. Jet açısının $30^\circ-90^\circ$ ve Reynolds sayısının 2000-7000 arasındaki değerleri için çalışmışlardır. Nano parçacık konsantrasyonunun artması genel olarak ısı transferini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Jet açısının artmasının ısı transferini pozitif yönde etkilediğini belirtmişlerdir. En yüksek ısı transferini $H/D=2$ iken, %4,0 nano parçacık konsantrasyonlu nano akışkan kullanılması durumunda 90° 'lik jet açısında gözlemlemişlerdir. Lv vd. [11], SiO_2 -su nano akışkanı kullanarak çarpan jetin ısı transferi performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Değişken nano parçacık konsantrasyonlu SiO_2 -su nano akışkanı kullanmışlardır. H/D oranı 2-5, Reynolds sayısı 5000-13000 ve farklı çarpma açıları (50° , 70° , 90°) için, nano akışkanların ısı transfer katsayılarını incelemişlerdir. SiO_2 -su nano akışkanının nano partikül konsantrasyonunun artmasının ısı transferini arttırdığını belirtmişlerdir. %3,0 SiO_2 -su nano akışkanı, saf su ile kıyaslandığında %40

oranında ısı transferinde artışı sağladığını gözlemlemişlerdir. Yu vd. [12], yüksek sıcaklıktaki (953K) düz plaka üzerine jet akış uygulanması ile gerçekleşen ısı transferi özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir. H/D oranı 0,2-2 ve Reynolds sayısını 20000-60000 arasındaki değerleri incelemişlerdir. H/D oranının artması ile bütün Reynolds sayılarında soğutma sürelerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. En yüksek ısı transferini $H/D=2$ iken hesaplamışlardır.

Barewar vd. [13], ısıtılan bakır plaka yüzeyine uygulanan çarpan jetin ısı transferi özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında DI su ve değişken nano parçacık konsantrasyonlu ($\phi=0,02\%$, $0,04\%$, $0,06\%$ ve $0,1\%$) ZnO nano akışkanı olmak üzere iki farklı soğutucu sıvı kullanmışlardır. H/D oranı 2,5-7,5, Reynolds sayısı 2192-9241 değerleri arasında çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. ZnO nano akışkanların nano partikül konsantrasyonunun artmasıyla ısı transferi katsayısında artışa neden olduğunu görmüşlerdir. En yüksek Reynolds sayısında ve $\phi=0,1$ iken saf suya kıyasla %51 oranında ısı transferi artışı gözlemlemişlerdir. Soğutma hızını, nano parçacık konsantrasyonunun $\phi=0,02$ 'den $\phi=0,1$ 'e yükselmesiyle arttırmışlardır. En iyi soğutma performansı $H/D=3,5$ ve $\phi=0,1$ 'da elde etmişler ve saf suya kıyasla soğutma hızında %54,70 civarında artış gözlemlemişlerdir. Zhu vd. [14], küçük jet plaka mesafelerinde, yüksek sıcaklıktaki düz plaka üzerine dikey olarak yerleştirilmiş bir dizi hava jetinin ısı transfer özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir. H/D oranı 0,2-1, S/D (jetler arasındaki mesafenin jet çapına oranı) oranı 5-10 ve Reynolds sayısı 7499-3000 arasındaki değerler için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ters akışlı jetlerin ısı transfer oranını önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Kılıç ve Muhammad [15], nano akışkanların ve çoklu çarpan jetlerin, ısıtılmış bir yüzeyden gerçekleşen ısı transferi üzerinde ki etkisi üzerine odaklanmışlardır. Bu kapsamda, farklı hacim oranlarının, farklı ısı akılarının ve farklı nanoakışkan türlerinin ısı transferi ve akışkan akışı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, hacim oranının %2 değerinden %8'e çıkarılmasının, ortalama Nusselt Sayısında %10,4 artış sağladığını gözlemlemişlerdir.

Kılıç ve Özcan [16], yüksek ısı akısına sahip bakır bir plaka yüzeyinin nano akışkan ve çarpan jet yardımıyla soğutulmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı 12000-18000, nano akışkanların hacim oranları (ϕ) %2, %4, %6 ve %8 için çalışmışlardır. Reynolds sayısının 12000 değerinden 18000 değerine ulaşması sonucunda ortalama Nusselt sayısının %28 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Nano akışkanın içerisindeki nano parçacık çapı küçüldükçe ısı transferinin arttığını belirtmişlerdir. Hacim oranı %2'den %8'e çıkarıldığında ortalama Nusselt sayısında %7,1 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Ingole ve Sundaramb [17], düz bir yüzeye çarpan eğimli hava jetinin soğutma üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerini H/D oranı 0,5-6,8, eğim açısı $15^\circ-75^\circ$ ve Reynolds sayısı 2000-20000 arasındaki değerlerde gerçekleştirmişlerdir. H mesafesi arttıkça ortalama Nusselt sayısının azaldığını

gözlemlemiştir. 45° ve 60° eğim açılarının 15° ve 75° eğim açılara göre daha iyi soğutma performansı sağladığını belirtmişlerdir. Karabulut ve Alnak [18], 1000 W/m^2 sabit ısı akısına sahip değişik geometrik şekillerde tasarlanmış yüzeylerin hava jeti ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Bu kapsamda, sur ve dikdörtgen desenli yüzeylerden oluşan bakır plakaları çarpan jet ile soğutmaya çalışmışlardır. Her 2 desen geometrisi için de, artan Reynolds sayısı ile ortalama Nusselt sayısının arttığını belirtmişlerdir. $Re=4000$ ve $H/D=4$ için, dikdörtgen desenli geometrilerde sur geometrisine göre, ortalama Nusselt sayısının değerinin %31,45 daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Karabulut [19] elektronik elemanların yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferinin, çarpan hava jeti kullanımı ile iyileştirilmesini sayısal olarak incelemiştir. Bu kapsamda, dikdörtgen kanallar içerisine ters ve düz daire şeklinde farklı desenlere sahip yüzeyler yerleştirmiştir. Reynolds sayısının artması ile bütün desenlerde ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlemlemiştir. $H/D=12$ ve $Re=10000$ için düz dairesel desenlerin ters dairesel desenlere kıyasla ortalama Nusselt sayısını %24,13 oranında arttırdığını belirtmiştir. Çalışır vd. [20], üçgen ve kare kanatçığa sahip yüzeylerin çoklu çarpan jet ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Farklı Re sayıları, farklı jet ile plaka arasındaki mesafeler ve farklı kanatçık dizilimleri için simülasyonlar yapmışlardır. İnceledikleri tüm kanatçık geometrileri için, maksimum ortalama ısı transferinin değerini H/d oranı 8 olduğunda gözlemlemiştir.

Nakod vd. [21] dairesel çarpan hava jeti ile yapılan bir soğutmada, kanatçık ve girdap üreticisi kullanımının ısı transferi üzerindeki etkisini incelemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla Reynolds sayısının 7000-30000 ve jet ile plaka arasındaki mesafenin 0,5-6 arasındaki değerleri için incelemelerde bulunmuşlardır. Yaptıkları çalışmaların sonucunda, gerçekleşen ısı transferinin kanat şekline karşı duyarlı olduğunu gözlemlemiştir. Kanat şekline, H/D oranına ve Reynolds sayısına bağlı olarak ısı transferinde %77'ye varan bir oranda artış sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Alnak vd. [22] dikdörtgen bir kanalın içerisine yerleştirilmiş kare desenli bakır plakalardan oluşan bir sistemin hava jeti yardımıyla soğutulmasını incelemiştir. Bu kapsamda Reynolds sayısını 4000 ile 10000 aralığında jet ile plaka arasındaki mesafeyi ise 4 ile 12 aralığında değiştirerek incelemeler yapmışlardır. H/D oranı 4 olduğu durumda, Reynolds sayısının artması ile ortalama Nusselt sayısında %59,28 civarında bir artış gözlemlemiştir. Maksimum ortalama Nusselt sayısı değerine, Reynolds sayısının 10000 ve H/D oranının 6 olduğu durumda ulaştıklarını belirtmişlerdir. Kılıç ve Başkaya [23], yüksek ısı akısına sahip yüzeylerin çarpan jet ile soğutulmasında akış yönlendirici kullanımının akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, Reynolds sayısının artması ile ısı transferinin arttığını, kanal yüksekliğinin azalmasıyla ise Nusselt sayısını fazla etkilemediğini belirtmişlerdir. Çalıştıkları parametre aralığında, üçgen geometriye sahip akış yönlendirici kullanılması durumunda en etkili ısı transferinin gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

Wang vd. [24] girdap oluşturuçu kullanımının çarpan jet üzerindeki etkilerini, farklı çapraz akış Reynolds sayıları için deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında jet Reynolds sayısının değerini 15000 değerinde sabit tutmuşlar ve çapraz akış Reynolds sayısının 40000 ile 64000 arasındaki değerleri için incelemelerde bulunmuşlardır. Sonuç olarak, gerçekleşen ısı transferindeki artışın girdap oluşturuçuların şekline, yüksekliğine ve çapraz akış Reynolds sayısına bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Karabulut vd. [25], bir kanal içerisinde bulunan bakır plakalardan oluşan sistemin hava jeti kullanarak soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. H/D oranı 6 için, Reynolds sayısının değerini 4000'den 10000'e artırılması ile ortalama Nusselt sayısında %64,85 artış sağlandığını belirtmişlerdir. Çalışır vd. [26], sıralı çarpan jetlerin üçgen ve kare kanatçık kullanılan yüzeylere çarptırılması ile oluşan akış yapısını incelemiştir. Çalışmalarında akış hızının artırılması ile kare kanatçıklar üzerinde gerçekleşen ayrışmanın daha erken gerçekleştiğini belirtmişlerdir. H/d oranı 2 olduğunda duvar jet bölgelerinin daha etkili olduğunu ve iki komşu jetin duvar jeti bölgelerinin birbirini etkilediğini gözlemlemiştir. H/d değeri 8 olduğunda ise duvar jet bölgelerinin birbirlerini fazla etkilemediğini belirtmişlerdir.

Larraona vd. [27], sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpan jet ve çapraz akış kombinasyonu (IJCF) kullanılarak soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, ortalama Nusselt sayısının elektronik elemanın yüksekliği ile ters orantılı, kanal Reynolds sayısı ve hız oranlarıyla (V_j/V_k) doğru orantılı olarak arttığını görmüşlerdir. Jet çapının artması ile ortalama Nusselt sayısının bir miktar arttığını belirtmişlerdir. Kanal Reynolds sayısı, jet çapı ve hız oranlarının artmasının, basınç kaybının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Kombine akışın, sadece kanal akış kullanılmasına göre daha yüksek soğutma verimliliği sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Demircan [28], bir elektronik devre elemanının, çapraz akış ve jet kombinasyonu ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Kanal giriş hızı baz alınarak hesaplanan Reynolds sayısının 30000 – 90000 aralığı, V_j/V_k oranının farklı değerleri için analizler yapmıştır. Sonuç olarak, Reynolds sayısının ve V_j/V_k oranının artması ile ısı transferinin önemli oranda arttığını belirtmiştir. Mergen [29], sabit ısı akısına ($\dot{q}''=3500 \text{ W/m}^2$) sahip bir elektronik elemanın çarpan jet ve kanal içi akışla soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Kanal Reynolds sayısı 2000-8000, jet Reynolds sayısı 10000-25000, H/D oranı 1,5-2 değerleri için çalışmalar yapmıştır. Çalışmasının sonucunda jet Reynolds sayısının kanal Reynolds sayısına oranı azaldıkça elektronik elemanın yüzeyindeki sıcaklık arttırdığından dolayı ısı transferinin olumsuz yönde etkilendiğini gözlemlemiştir.

Saleha vd. [30], sabit sıcaklığa sahip bir elektronik elemanın kanal içi akış ve çarpan jet ile soğutulmasını, farklı pah yüksekliklerine ve farklı Reynolds sayılarına göre değişimini sayısal olarak incelemiştir. Jet Reynolds sayısı 0-5115, elektronik elemanın pah yüksekliği 0-4 mm, kanal Reynolds sayısı 3410 ve H/D oranı 2,5 için simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Uygun pah yüksekliğinin soğutma

performansını arttırabileceğini görmüşlerdir. En yüksek ısı transferini $Re_j/Re_k=1,5$ ve 4mm pah yüksekliğinde gözlemlenmişler ve ısı transferinin yaklaşık %26 oranında arttığını belirlemişlerdir. Örs [31], kanal içerisine yerleştirilmiş sabit yüzey sıcaklığına sahip bir elektronik elemanın çarpın jet ve çapraz akış ile farklı pah yüksekliklerinde ve Reynolds sayılarında soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Jet Reynolds sayısının 0-15000, çapraz akış Reynolds sayısının 0-8000, pah yüksekliklerinin ise 0-4 mm arasındaki değerlerini incelemiştir. Maksimum ısı transferine pah yüksekliği 4 mm, jet Reynolds 15000 ve kanal Reynolds 8000 değerlerindeki ulaşılmıştır. Pah yüksekliğinin ve jet Reynolds sayısındaki artışın elektronik eleman üzerindeki ısı transferini önemli ölçüde arttırdığını belirtmiştir. Maghrabie vd. [32], bir kanal boyunca sıralanmış yedi adet elektronik elemandan oluşan bir sistemi sadece çapraz akış (CF) ve çarpın jet-çapraz akış kombinasyonu (JICF) ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Jetin elektronik elemanların üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için jetin kanal üzerindeki yerini değiştirmişlerdir. Yedi farklı jet pozisyonu ve $Re_j/Re_c=1, 2$ ve 4 için incelemeler yapmışlardır. K kombine bir akışta, jet pozisyonun değiştirilmesinin ısı transferini etkilediğini belirtmişlerdir.

Literatür araştırmalarından da anlaşıldığı üzere çarpın jetlerle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak jet akış ile çapraz akışın birlikte ele alındığı çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada literatürde bulunan diğer araştırmalardan farklı olarak, jet akış ile çapraz akışın birlikte uygulandığı bir geometriye ek olarak akış yönlendirici bir kanatçık eklenmesi düşünülmüştür. Bu akış yönlendirici kanatçığın, elektronik eleman üzerindeki ısı transferini iyileştirebileceği varsayılmıştır. Bu amaçla, akış yönlendirici kanatçık için 5 farklı açı belirlenmiş ve tüm bu açılar için farklı V_j/V_k (jet giriş hızının kanal giriş hızına oranı) oranlarındaki akışlar simule edilerek, kanatçık açısının ve V_j/V_k oranının değişiminin elektronik elemandan gerçekleşen ısı transferi ve akış yapısı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMULASYON (PROBLEM INTRODUCTION AND MATHEMATICAL FORMULATION)

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli bir kanalın, taban yüzeyine yerleştirilmiş olan sabit ısı akısına sahip bir elektronik

elemanın soğutulması ele alınmıştır. Bu amaçla, kanal girişinden üniform olarak sabit V_k hızı ile gönderilen hava ile, eş zamanlı olarak elektronik elemanın hemen üstünde bulunan dairesel bir lüleden V_j hızı ile gönderilen havanın oluşturduğu bir akış düşünülmüştür. Bu iki akışın elektronik elemana çarpması sonucu, elektronik eleman etrafında karmaşık bir akış yapısı oluşturması ve ısı transferini gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu çalışmada incelenen problemin geometrisinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Jet akışın gönderildiği lülenin çapı literatürde bulunan benzer çalışmalara [27, 30, 31, 33] yakın olarak $D=15\text{mm}$ alınmış ve diğer tüm büyüklükler bu lüle çapı kullanılarak belirlenmiştir. Kanalın uzunluğu $L=66D$, yüksekliği $H=3D$, genişliği ise $W=4D$ büyüklüğündedir. Elektronik eleman küp şeklindedir ve bir kenarının uzunluğu $h=4D/3$ olarak belirlenmiştir. Akış yönlendirici kanatçığın uzunluğu D , kanatçık ile jet arasındaki mesafe D , kanatçığın genişliği ise $D/7,5$ büyüklüğündedir. Kanatçık açısı (α) 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° olacak şekilde değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan akışın, zamandan bağımsız, sıkıştırılmaz, üç boyutlu ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca doğal taşınım etkileri ihmal edilmiştir. Türbülans modeli olarak $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan kabullere göre, problemin temel diferansiyel denklemleri aşağıda verilmiştir [29, 31].

2.1. Problemin Diferansiyel Denklemleri (Differential Equation of Problem)

Süreklilik denklemi

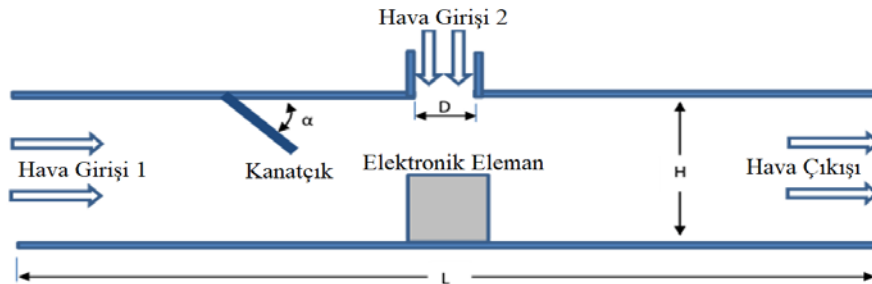
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \quad (2)$$

Enerji denklemi

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \cdot \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho C_p \bar{T}'_i \bar{u}'_i \right] \quad (3)$$



Şekil 1. Problemin şematik gösterimi (Schematic representation of the problem)

Türbülanslı kinetik enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

Türbülanslı kinetik enerji yutulma denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

Bu denklemlerde (Eş. 1-Eş. 5) ρ akışkanın yoğunluğunu, k türbülanslı akışın kinetik enerjisini, u_i , x , y ve z eksenleri doğrultusundaki hız bileşenlerini, μ akışkanın viskozitesini, σ_k türbülanslı kinetik enerji Prandtl sayısını ($\sigma_k = 1$) göstermektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi (G_k) ve türbülanslı akışın viskozitesini (μ_t) veren eşitlikler (Eş. 6 ve Eş. 7) aşağıda verilmiştir [29, 31].

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve C_μ katsayıları, σ_ε ise türbülans yutulma Prandtl sayısını temsil etmektedir ve sırasıyla $C_{1\varepsilon}=1,44$, $C_{2\varepsilon}=1,92$, $C_\mu=0,09$ ve $\sigma_\varepsilon=1,3$ olarak alınmıştır [29, 31].

Kanal ve lüle girişlerindeki hava sıcaklığı çevre sıcaklığına (20°C) eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Kanalin tüm yüzeyleri adiyabatik (ısı olarak yalıtılmış) olarak alınmıştır.

2.2. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Lüle girişinden üniform V_j hızında ve sabit $T_j = 20^\circ\text{C}$ sıcaklığında ki hava, elektronik elemanın tam üst yüzeyine doğru dik olarak püskürtülmektedir. Kanal girişinden ise, havanın sabit $V_k=2,94\text{m/s}$ hızında ve $T_k=20^\circ\text{C}$ sıcaklığında girdiği ve sadece yatay yönünde bir bileşeni ($u=V_k$) olduğu kabul edilmiştir. Kanal çıkışının atmosfere açıldığı kabul edilmiştir. Bu nedenle kanalin çıkış basıncı atmosfer basıncına eşit ($P_c=P_{atm}$) olarak alınmıştır. Kanalin çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilmiş ve $\partial T/\partial x = 0$ olarak belirlenmiştir. Kanal ve elektronik elemanın duvarlarında kaymasızlık sınır şartı olduğu, bundan dolayı tüm hız bileşenlerinin değerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Kanalin tüm duvarlarının yalıtıldığı kabul edilerek, $\partial T/\partial n = 0$ olarak alınmıştır. Elektronik elemanın yüzeylerinde ise, literatürde [5, 29] bulunan diğer çalışmalara benzer olarak sabit 3000 W/m^2 lik bir ısı akışı olduğu varsayılmıştır.

2.3. Problemin irdelemesinde kullanılan denklemler (Equations for the problem analysis)

Elektronik elemanın yüzeylerindeki ortalama taşınım ısı transferi katsayısı Eş. 8, ortalama Nusselt sayısı ise Eş. 9 vasıtasıyla hesaplanmıştır [34].

$$h = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \frac{hL}{k_h} \quad (9)$$

Kanal hidrolik çapı ise Eş. 10 ile hesaplanmıştır [34].

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} \quad (10)$$

Bu denklemden A_k Kanalin kesit alanı, P_k ise kanalin ıslak çevresidir ve sırasıyla Eş. 11. ve Eş. 12. ile belirlenmektedir [34].

$$A_k = H * W \quad (11)$$

$$P_k = 2(H + W) \quad (12)$$

Kanal ve Jet Reynolds sayıları ise Eş. 12 ve Eş. 14 yardımıyla belirlenmiştir [34].

$$Re_j = \frac{\rho V_j D}{\mu} \quad (13)$$

$$Re_k = \frac{\rho V_k D_{kh}}{\mu} \quad (14)$$

3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ (NUMERICAL SOLUTION METHOD)

Bu çalışmada incelenen problemin temel diferansiyel denklemleri olan süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemleri, problemin sınır şartları kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Bu amaçla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) temeli ile çalışan Fluent paket yazılımı kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak Realizable $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Ayırıştırma yöntemi olarak enerji, momentum denklemleri için "Second Order Upwind" yöntemi, türbülans denklemleri için ise "First Order Upwind" yöntemleri tercih edilmiştir. Sayısal çözümlerin yakınsaması için, yakınsama kriteri momentum ve türbülans denklemleri için 10^{-3} enerji denklemi için ise 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Ayrıca çözüm hacmine giren kütleli debi ile çıkan kütleli debinin karşılaştırılarak, net kütleli debi kaybının 10^{-7} seviyelerinde kalmasına dikkat edilmiştir.

Problemin çözüm alanı, kontrol hacimlerine bölünerek bir ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapısı, hız ve sıcaklık gibi parametrelerin değişimlerin az olduğu bölgeler (kanal iç kısmına) seyrek, çok olduğu bölgeler (kanal yüzeyleri ve elektronik elemanın etrafı) ise daha sık olacak şekilde oluşturulmuştur. İlk düğüm noktasının viskoz sınır tabaka altında kalabilmesi amacıyla, y^+ değerinin yaklaşık olarak 1 olabileceği ilk mesh yüksekliği hesaplanmıştır. Bu kapsamda elektronik eleman yüzeylerine en yakın olarak atılan mesh elemanın yüksekliği 0,075 mm olarak seçilmiştir. Örnek olarak 45° lik kanat açısına sahip geometri için kullanılan ağ yapısının görünümü için Şekil 2'de verilmektedir.

Ayrıca, sayısal analiz sonuçlarının ağ yapısından bağımsız olup olmadığını anlamak amacıyla farklı eleman

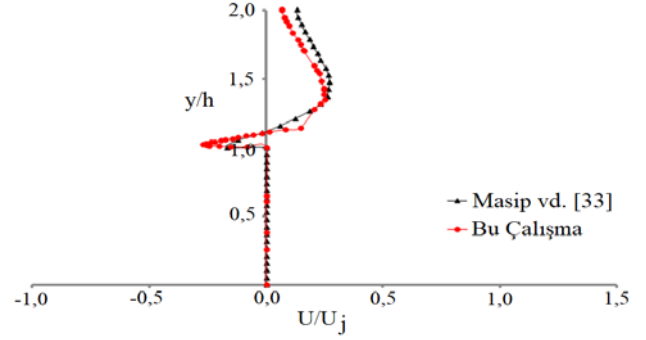
sayılarına sahip ağ yapıları oluşturulmuştur. Bu ağ yapıları için elde edilen sonuçlar Şekil 3'de birlikte verilmektedir. Yapılan irdeleme sonucu yaklaşık olarak 873000 adet düğüm noktasına sahip ağ yapısının, optimum ağ yapısı olarak kullanılabilmesine karar verilmiş ve bu çalışma kapsamında yapılan tüm analizlerde bu optimum ağ yapısı kullanılmıştır.

3.1. Sayısal Yöntemin Güvenilirliğinin Test Edilmesi (Reliability Test for Numerical Method)

Literatürde bu çalışmaya benzer diğer çalışmalar incelenmiş ve Masip vd. [33] yapmış oldukları deneysel bir çalışma, bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sayısal verilerin doğrulanmasında referans olarak kullanılmıştır. İlgili çalışmada, Masip ve arkadaşları çapraz akış ve çarpan jet akış kombinasyonuna maruz kalan bir küp etrafındaki türbülanslı akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, 2000x300x30 mm boyutlarında bir kanal içerisine, 15 mm yüksekliğe ve 60°C yüzey sıcaklığına sahip bir elektronik eleman yerleştirmişlerdir. Jet akışı sağlamak amacıyla, kanalın üst yüzeyine D=12 mm çapında bir lüle eklemişlerdir. Kanalın bütün yüzeylerinin adiyabatik olarak alındığını ve çevre sıcaklığının ise 20°C'de sabit tutulduğunu belirtmişlerdir. Bu kapsamda, kanal Reynolds sayısının 3 farklı değeri (3410, 5752 ve 8880) için, kanal Reynolds sayısının jet Reynolds sayısına oranının farklı değerlerinde (0,5, 1,0 ve 1,5) deneyler yapmışlar ve elektronik elemanın etrafındaki akış yapılarını detaylı olarak incelemişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin güvenilirliğinin test edilmesi amacıyla, ilgili çalışmanın [33] geometrisi ve sınır şartları kullanılarak, kanal Reynolds sayısının 3410 ve

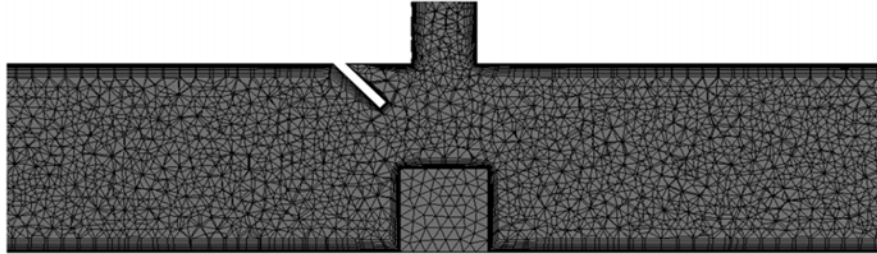
jet Reynolds sayısının 3410 olduğu durum için analiz yapılmış ve elde edilen hız profilleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan ve Masip ve diğerlerinin [33] yapmış olduğu çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 4'te birlikte verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, her iki çalışmadan elde edilen sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



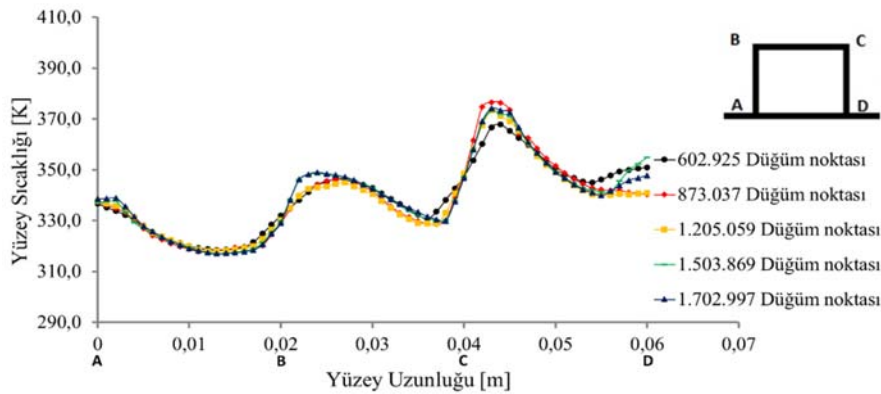
Şekil 4. Masip vd. [33] ve bu çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması

(Comparison of results in Masip et al. [33] and our study)

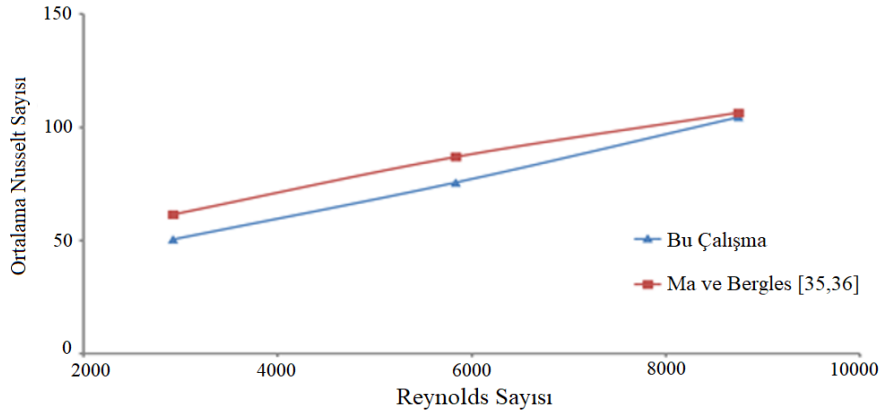
Ayrıca Ma ve Bergles [35, 36] tarafından verilen aşağıdaki ampirik bağıntı kullanılarak bir kıyaslama yapılmıştır. Bu kapsamda, sadece jet akışın olduğu bir durum için, farklı Reynolds sayılarında analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar ile ampirik bağıntıdan elde edilen sonuçlar Şekil 5'de birlikte verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, bu çalışma ve ampirik bağıntı için çizilen eğrilerin birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Problemin ağ yapısı (Problem mesh structure)



Şekil 3. Farklı ağ yapıları için, elektronik elemanın yüzey sıcaklığının yüzey uzunluğu ile değişimi
(Change of electronic component surface temperature with the surface length for different mesh structures)



Şekil 5. Ma ve Bergles [35, 36] ampirik bağıntısı ve bu çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması
(Comparison of Ma and Bergles [35, 36] empirical relations and the results of our study)

$$\overline{Nu} = 1,29Re^{0,5}Pr^{0,4} \quad (15)$$

Her iki şekilden de görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemden elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin problemi yeterli doğrulukta çözebildiği kabul edilebilir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpan jet ve çapraz akış kombinasyonu ile soğutulması sayısal olarak incelenmiş ve akış yönlendirici kanatçığın açısının değişiminin ısı transferi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Sabit kanal giriş hızı ve H/D (jet ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafesinin jet çapına oranı) oranı için, V_j/V_k (jet giriş hızının kanal giriş hızına oranı) oranının 0, 1, 2 ve 3 değerleri ve kanatçık açısının (α) 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla çizilen grafiklerden bir kısmı aşağıda verilmiştir.

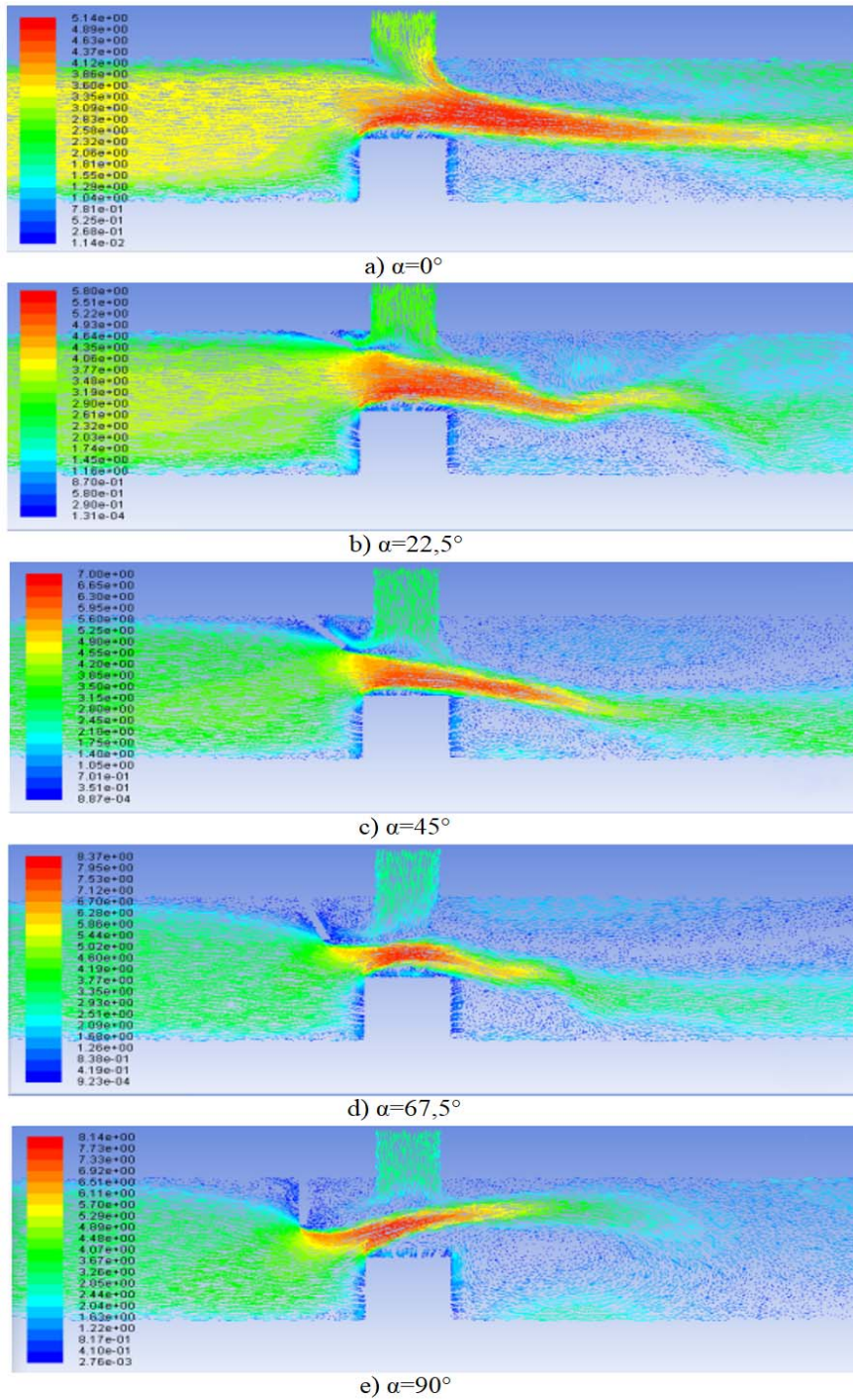
$V_j/V_k=1$ olduğunda, farklı kanatçık açıları için hız vektör dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde V_j/V_k oranı için genel olarak, jet akış ile çapraz akış elektronik elemanın üstünde kalan bölgede çarpışmakta ve sağ kısmında döngüsel akış bölgeleri oluşmaktadır. Kanatçık açısının artması ile elektronik elemanın etrafındaki hız vektörlerinin sıklaştığı ve akım çizgilerinin elektronik elemanın üst yüzeyine doğru yaklaştığı görülmüştür. Akış yönlendirici kanatçığın açısı 45° 'yi geçtikten sonra hız vektörlerinin yönü değişmekte ve akış blok üst yüzeyinden uzaklaşmaya başlamıştır. Kanatçığın açısının değişimi, elektronik elemanın sağ yüzeyinde oluşan döngüsel akış bölgelerinin büyüklüğünü ve yerini etkilediği görülmüştür.

$V_j/V_k=1$ olduğunda, farklı kanatçık açıları için çizilen sıcaklık dağılımları ise Şekil 7'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, tüm kanatçık açıları için sıcaklık dağılımlarının genel olarak birbirine benzer bir yapıda olduğu görülmektedir. Genel olarak, kanal girişinden giren

akışkanın elektronik elemanın sol yüzeyine çarpması sonucu sınır tabakayı bozduğu ve bu yüzeyde sıcaklığı düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca üst lüleden gönderilen havanın ise elektronik elemanın üst bölgesinden geçen çapraz akışı baskılayarak, elektronik elemanın üst yüzey sıcaklığının azalmasını sağlamaktadır. Birbirine karışan çapraz ve jet akışların kanal çıkışına doğru giderken farklı kanat açıları için farklı konumlarda döngüsel akış bölgeleri oluşturmasından dolayı, elektronik elemanın sağ yüzeyinde ısı sınır tabaka kalınlıklarının değiştiği görülmektedir. Kanatçık açısının artması sonucunda ise ısı sınır tabakanın bozulmasından kaynaklı olarak elektronik elemanın maksimum sıcaklığı azalmaya başlamıştır.

Kanatçık açısı (α) 45° olduğunda, farklı V_j/V_k oranları için hız vektör dağılımları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde $V_j/V_k=0$ için, herhangi bir jet akış girişi olmadığından kanal içi akış karakteristiklerinin olduğu görülmektedir. $V_j/V_k=1, 2$ ve 3 için ise genel akış profilinin benzer olduğu söylenebilir. Genel olarak, çapraz akış akım çizgilerinin akış yönlendirici kanatçığın etkisi ile sıkıştırıldığı ve jet akış ile elektronik elemanın üstünde kalan bir bölgede çarpıştığı görülmektedir. Bu çarpışmanın sonucunda elektronik elemanın sağ kısmında döngüsel akış bölgeleri oluşmaktadır. Kanatçığın etkisi ile döngüsel akış bölgelerinin elektronik elemanın etrafında yoğunlaşmış ve V_j/V_k oranının artması ile de jetin durma noktası elektronik elemana doğru yaklaşmıştır. Bu döngüsel akış bölgeleri elektronik elemanın etrafına yoğunlaşması sonucunda ısı transferinde bir miktar artış gözlemlenmiştir.

Kanatçık açısı (α) 45° olduğunda, farklı V_j/V_k oranları için çizilen sıcaklık dağılımları Şekil 9'da birlikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm V_j/V_k oranları için sıcaklık dağılımlarının genel olarak birbirine benzer bir yapıda olduğu görülmektedir. Kanal girişinden giren akışkan kanatçığın etkisi ile hızlanarak elektronik elemanın sol yüzeyine çarpması sonucu sınır tabakayı bozmuş ve çarpıştığı yüzeydeki sıcaklığı düşürmüştür. Jet ile gönderilen hava ise elektronik elemanın üstünden geçen havayı baskılamaya çalışarak elektronik elemanın üst yüzeyindeki sıcaklığın azalmasını sağlamıştır. Birbirine karışan çapraz ve jet

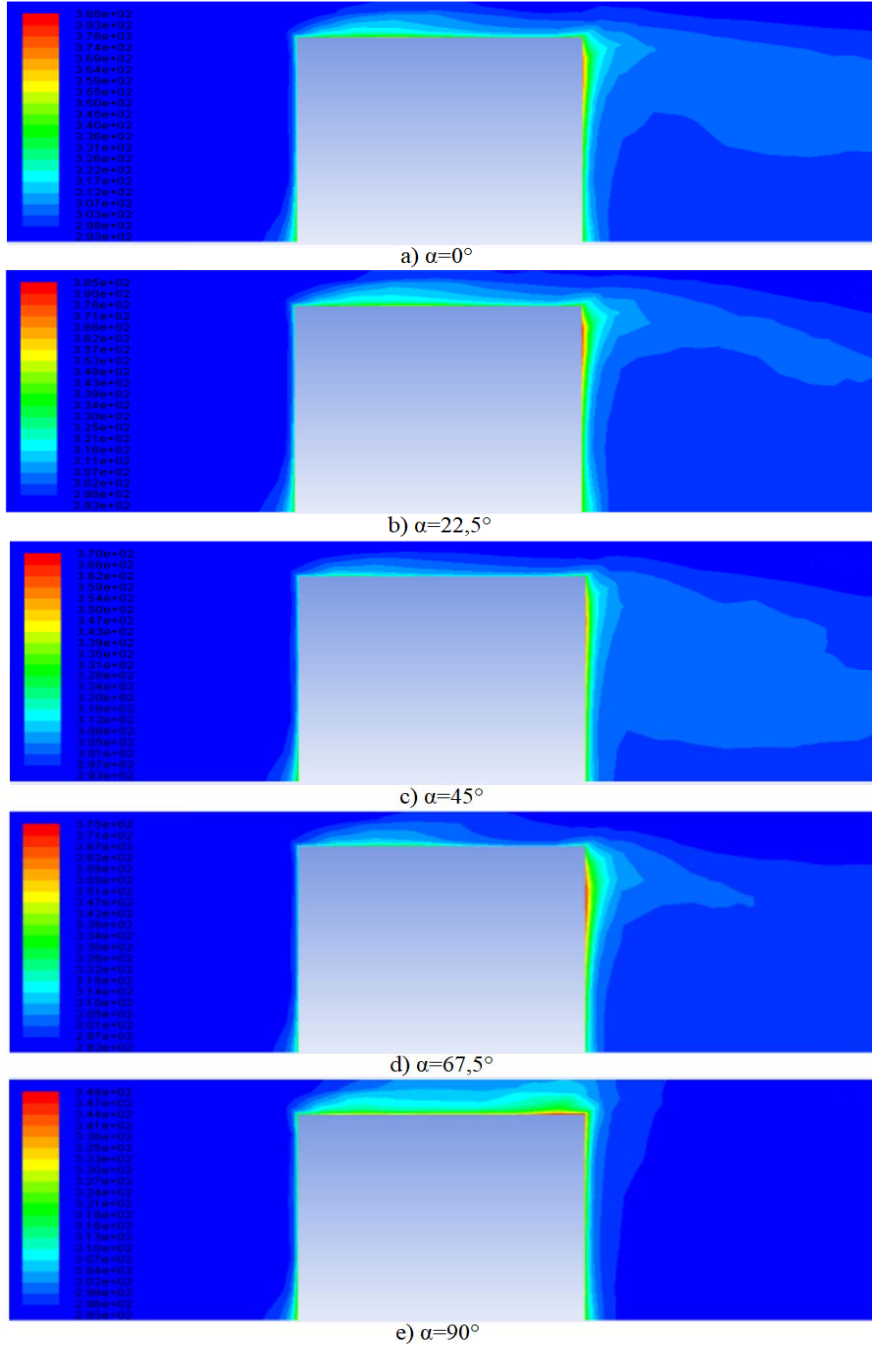


Şekil 6. $V_j/V_k=1$ olduğunda, farklı kanatçık açıları için hız vektör dağılımları a) $\alpha=0^\circ$, b) $\alpha=22,5^\circ$, c) $\alpha=45^\circ$, d) $\alpha=67,5^\circ$ ve e) $\alpha=90^\circ$ (Velocity vector distribution for different fin angles when $V_j/V_k=1$)

akışların kanal çıkışına doğru giderken döngüsel akış bölgeleri oluşturduğu bu durumun elektronik elemanın sağ yüzeyinde sıcaklık değerini etkilediği görülmektedir. V_j/V_k oranının artması sonucunda elektronik elemanın üst yüzey sıcaklığının azaldığı görülmüştür.

Elektronik elemanın yüzeylerindeki sıcaklığın artan V_j/V_k oranına ve kanatçık açısına göre değişimi Şekil 10'da

verilmiştir. Şekil incelendiğinde, V_j/V_k oranı arttıkça beklenildiği gibi elektronik elemanın yüzey sıcaklığının düşmeye başladığı görülmüştür. Kanatçık açısının artması ile bütün V_j/V_k oranlarında elektronik elemanın sol yüzeyindeki sıcaklıkların düştüğü görülmüştür. Düşük V_j/V_k oranlarında kanatçık açısının artması ile elektronik elemanın üst ve sağ yüzeylerindeki sıcaklığın kanatçık açısı 45° 'ye ulaşana kadar azaldığı bu açıyı geçtikten sonra ise sıcaklığın artmaya

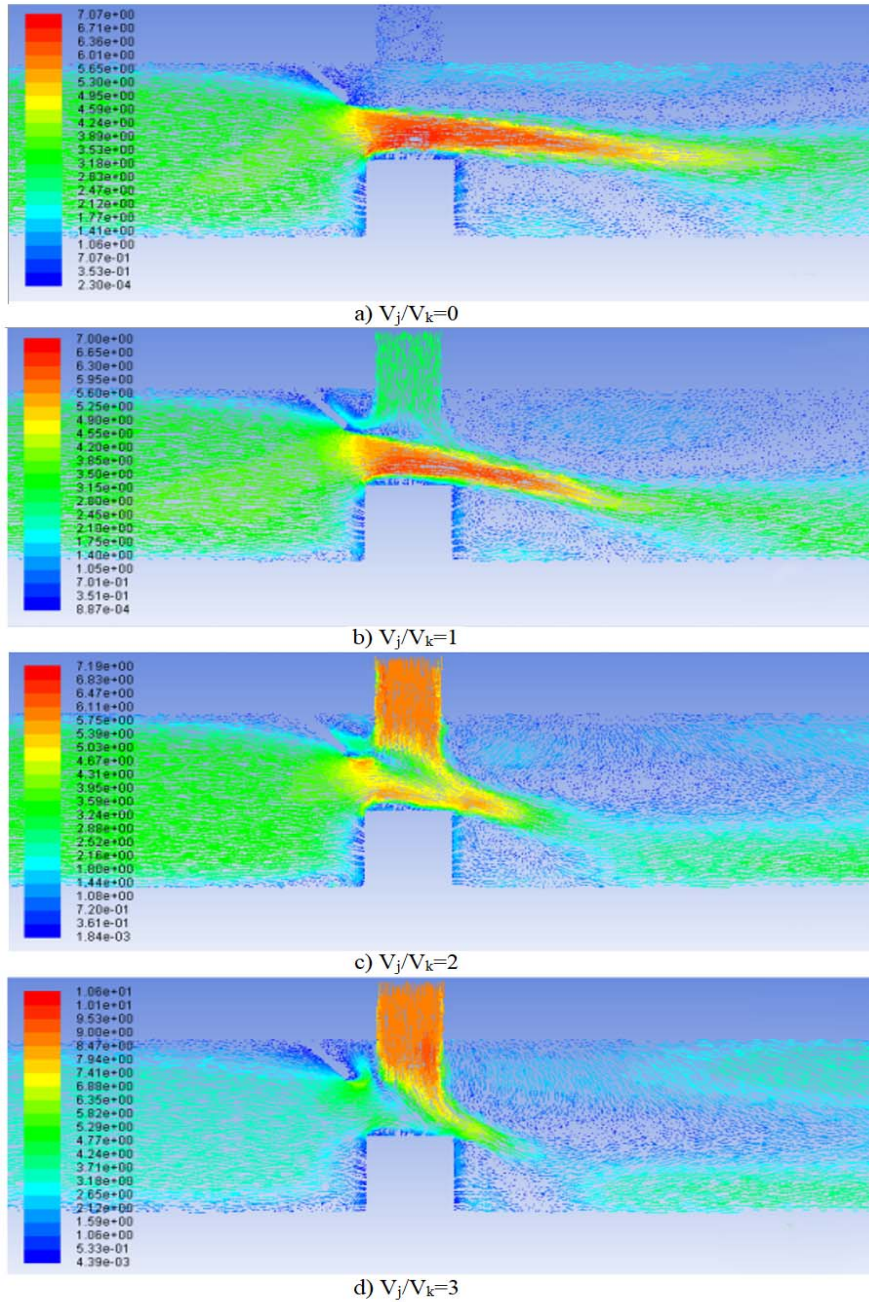


Şekil 7. $V_j/V_k=1$ için sıcaklığın kanatçık açısı ile değişimi a) $\alpha=0^\circ$, b) $\alpha=22,5^\circ$, c) $\alpha=45^\circ$, d) $\alpha=67,5^\circ$ ve e) $\alpha=90^\circ$
(Temperature change with fin angle for $V_j/V_k=1$)

başladığı görülmüştür. V_j/V_k oranı yükselmeye başladıkça bu olumsuz etkilerin kaybolmaya başladığı görülmüş ve kanatçık açısı arttıkça genel olarak elektronik elemanın üst yüzey sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir.

Elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının artan V_j/V_k oranına ve kanatçık açısına göre değişimi ise Şekil 11'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, V_j/V_k oranı arttıkça Nusselt sayısının artmaya başladığı görülmüştür. Kanatçık açısının artması ile bütün V_j/V_k oranlarında elektronik

elemanın sol yüzeyindeki Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Düşük V_j/V_k oranlarında elektronik elemanın üst yüzeyindeki Nusselt sayıları kanatçık açısı 45° 'de olana kadar artmıştır. Ancak bu değeri geçtikten sonra Nusselt sayısında bir azalma görülmüştür. Bu durumun sebebinin, çapraz akışın düşük V_j/V_k oranlarında gerçekleşen ısı transferi üzerinde daha baskın rol alması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Çünkü kanatçık açısı 45° olana kadar, kanatçığın çapraz akışı elektronik elemanın üst yüzeyine yönlendirerek, sınır tabakayı etkilediği ve ısı transferine

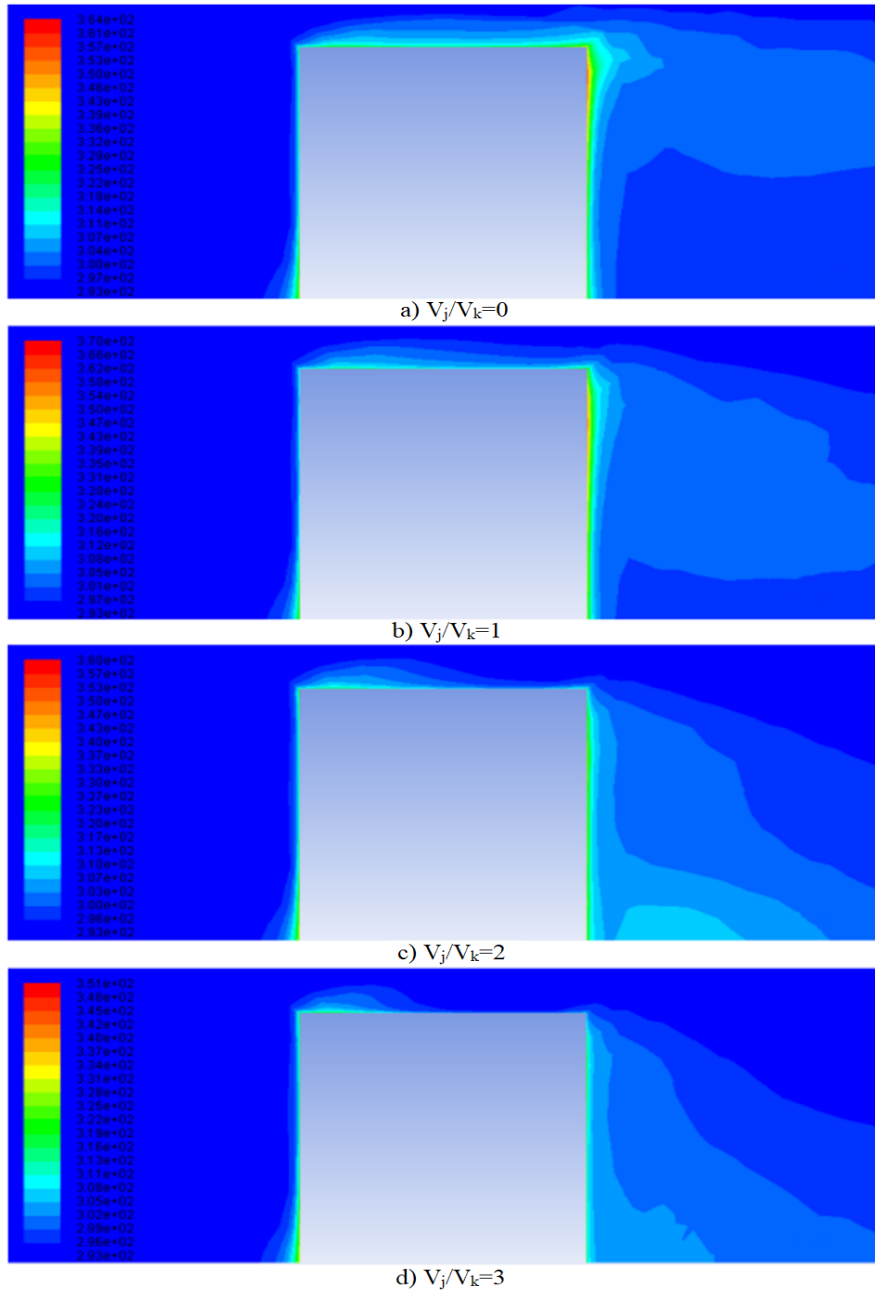


Şekil 8. $\alpha=45^\circ$ olduğunda, farklı V_j/V_k oranları için hız vektör dağılımları a) $V_j/V_k=0$, b) $V_j/V_k=1$, c) $V_j/V_k=2$ ve d) $V_j/V_k=3$ (For $\alpha=45^\circ$ velocity vector distribution for different V_j/V_k ratios)

olumlu katkı sağladığı söylenebilir. Ancak 45° 'nin üzerinde ise, kanatçığın çapraz akışı yönlendirmekten ziyade, kesiti daraltan bir engel gibi davrandığı ve ısı transferinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. V_j/V_k oranı 2 ve üzerine çıktığında ise, jet akışın gerçekleşen ısı transferi üzerinde daha baskın hala gelmesinden ötürü bu olumsuz etki kaybolmuş ve Nusselt sayısında bir artış görülmüştür. Maksimum Nusselt sayısına $V_j/V_k=3$ oranında kanatçık açısı 90° 'deyken ulaşılmıştır. Elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının artan V_j/V_k oranına ve kanatçık açısına göre değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, V_j/V_k oranı arttıkça bütün kanatçık açılarında elektronik

elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Genel olarak maksimum Nusselt sayısı elektronik elemanın üst yüzeylerinde gözlemlenmiştir. Ancak düşük jet giriş hızlarında maksimum Nusselt sayısının elektronik elemanın sol yüzeylerinde hesaplandığı görülmüştür. $V_j/V_k=2$ ve üzerindeki oranlarda ise kanatçık açısının artması bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmıştır ve maksimum Nusselt sayısındaki artışı daha belirgin hale getirmiştir.

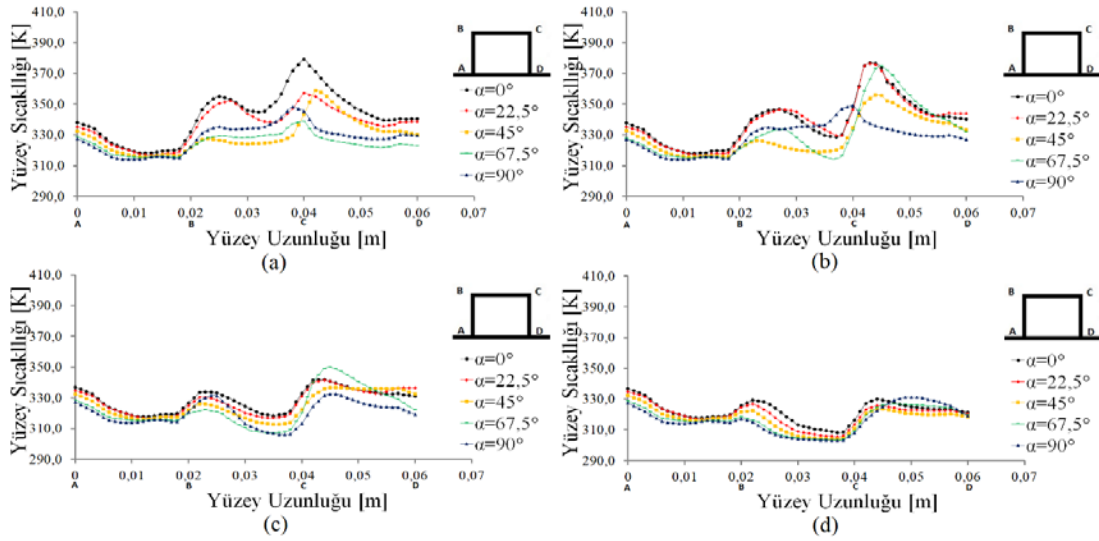
Şekil 13'de ortalama yüzey sıcaklığının V_j/V_k oranıyla değişimi farklı kanatçık açıları için birlikte verilmiştir.



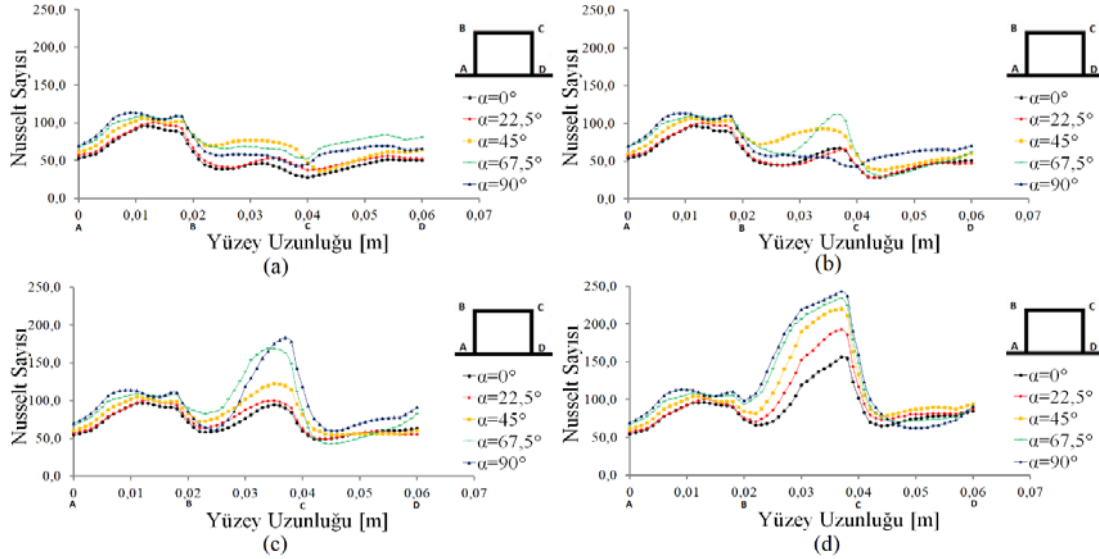
Şekil 9. Kanatçık açısı 45° de sabit iken V_j/V_k oranının değişmesinin sıcaklığa etkisi a) $V_j/V_k=0$, b) $V_j/V_k=1$, c) $V_j/V_k=2$ ve d) $V_j/V_k=3$ (When fin angle is constant at 45° , the effect of different V_j/V_k on temperature)

Şekilden de görüldüğü üzere, tüm kanat açıları için V_j/V_k oranının artması ile ortalama yüzey sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi kanal giriş hızı sabit iken jet giriş hızının artması sonucu, akım çizgilerinin elektronik elemana doğru sıkışması ve o bölgede sınır tabakayı bozması olarak söylenebilir. Ayrıca sabit V_j/V_k oranları için, kanat açısının etkisi incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=22,5^\circ$ için elektronik eleman yüzeylerinde yüksek değerlerde ortalama sıcaklık gözlemlenmiştir. Kanat açısının artması ile yüzey ortalama sıcaklık değerinin azaldığı $\alpha=90^\circ$ olduğunda ise minimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Şekil 14'de ise ortalama Nusselt sayısının V_j/V_k oranıyla değişimi farklı

kanatçık açıları için birlikte verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, tüm kanat açıları için V_j/V_k oranının artması ile ortalama Nusselt sayısının değerinin arttığı görülmektedir. Özellikle V_j/V_k oranının değeri 1'den sonra lineer bir artış söz konusudur. Bu durum V_j/V_k oranının 1 olması durumlarında, kanal üst yüzeyinde bulunan delikten jet akışının devreye girmesi ve V_j/V_k oranının artması ile bu jet akışın kanal akışa göre daha baskın hale gelmesi olarak açıklanabilir. Ayrıca sabit V_j/V_k oranları için, kanat açısının etkisi incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ için elektronik eleman yüzeylerinde en düşük seviyede ortalama Nusselt sayısının değeri gözlemlenmiştir. Kanat açısının artması ile yüzey



Şekil 10. Elektronik elemanın yüzeylerindeki sıcaklığın yüzey uzunluğu ile değişimi a) $V_j/V_k=0$, b) $V_j/V_k=1$, c) $V_j/V_k=2$ ve d) $V_j/V_k=3$ (The change of electronic component surface temperature with surface length)



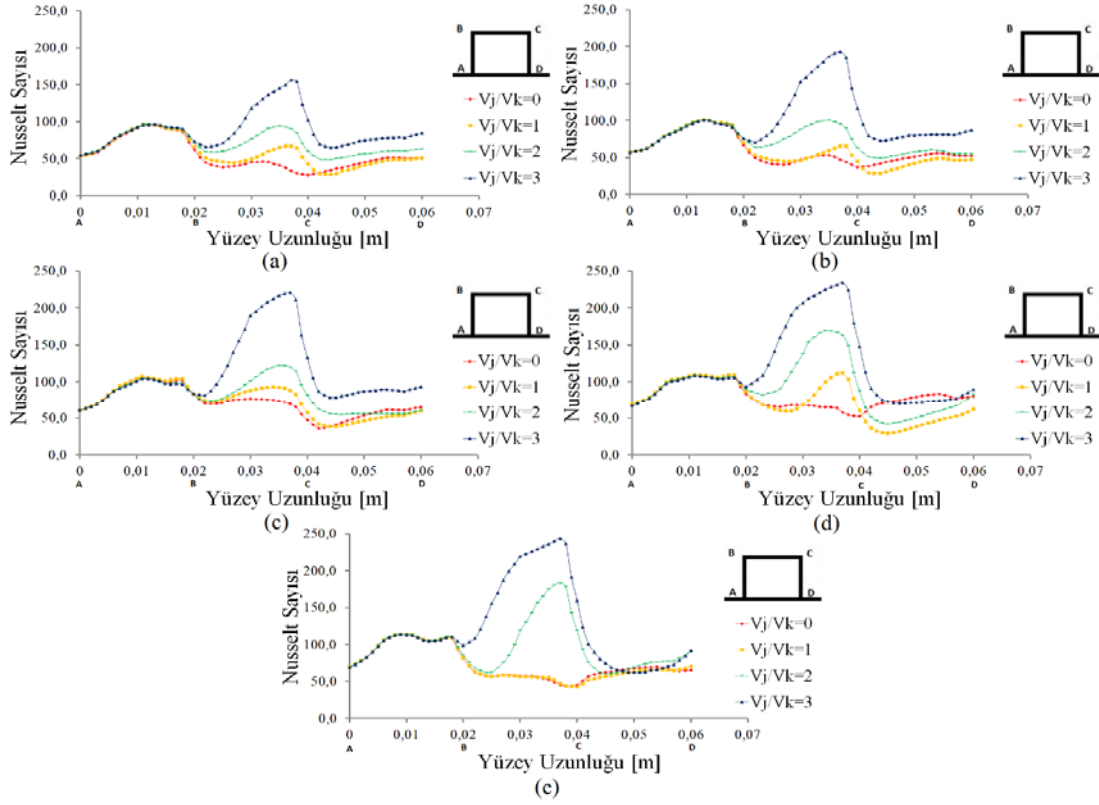
Şekil 11. Elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının yüzey uzunluğu ile değişimi a) $V_j/V_k=0$, b) $V_j/V_k=1$, c) $V_j/V_k=2$ ve d) $V_j/V_k=3$ (The change of electronic component surface Nusselt number with surface length)

ortalama Nusselt sayısının değerinin arttığı ve $\alpha=90^\circ$ olduğunda ise en yüksek seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Dolayısıyla kanatçık açısı $\alpha=90^\circ$ olduğunda maksimum ısı transferi gerçekleştiği ve yüksek sıcaklıktaki elektronik bir elemandan maksimum soğutma sağlanabileceği söylenebilir. Bu durumun ele alınan tüm V_j/V_k oranları için geçerli olduğu gözlemlenmiştir.

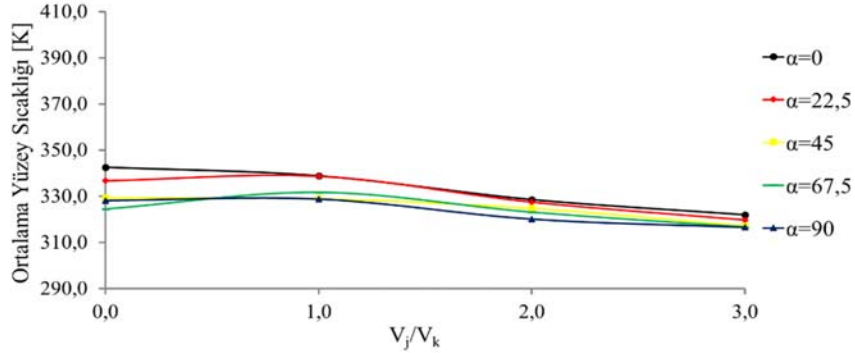
Bu çalışmada ele alınan tüm parametreler için yapılan analizlerde, ısıtıcı eleman için ortalama yüzey sıcaklığı ve ortalama Nusselt sayısı değerleri hesaplanmıştır. Yapılan tüm analizlerde ortalama Nusselt sayısının minimum değeri, kanatçık açısının $\alpha=0^\circ$ olduğu durumda, yani geometride hiçbir yönlendirici kanatçık olmadığı durumda ve jet akışın hiç olmadığı V_j/V_k oranı 0 için gözlemlenmiştir. Ortalama Nusselt sayısının maksimum değeri ise kanatçık açısının en

yüksek olduğu $\alpha=90^\circ$ ve jet akış hızının en yüksek olduğu V_j/V_k oranı 3 olduğu durumda gözlemlenmiştir. En yüksek ortalama Nusselt sayıları ise sabit $V_j/V_k=0$, $V_j/V_k=1$, $V_j/V_k=2$, ve $V_j/V_k=3$ oranları için sırasıyla kanatçık açısı $\alpha=67.5^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=90^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ olduğu durumlarda gerçekleşmiştir.

Dolayısıyla kanal içerisindeki elektronik bir elemanın sol tarafına yerleştirilen akış yönlendirici bir kanatçığın etkisi ile elektronik elemandan gerçekleşen ısı transferinin arttığı söylenebilir. Ayrıca kanatçık açısı ve V_j/V_k oranının değiştirilmesinin ise gerçekleşen ısı transferini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Genel olarak kanatçığın kanal üst yüzeyi ile yaptığı açı ve V_j/V_k oranındaki artış ile gerçekleşen ısı transferinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür.



Şekil 12. Elektronik elemanın yüzeylerindeki Nusselt sayısının yüzey uzunluğu ile değişimi a) $\alpha=0^\circ$, b) $\alpha=22,5^\circ$, c) $\alpha=45^\circ$, d) $\alpha=67,5^\circ$ ve e) $\alpha=90^\circ$
(The change of electronic component surface Nusselt number with surface length)

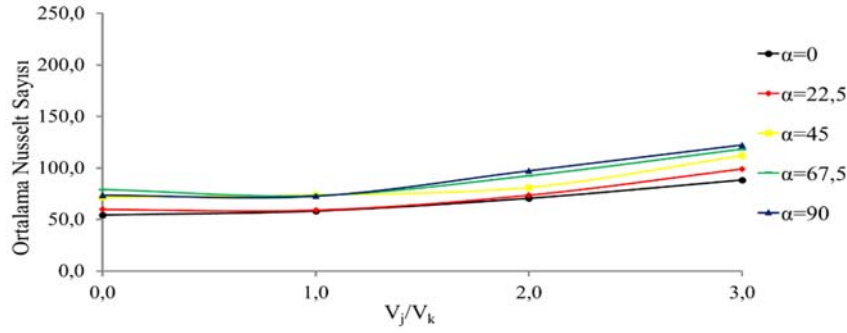


Şekil 13. Elektronik elemanın yüzeylerindeki ortalama yüzey sıcaklığının V_j/V_k oranıyla değişimi
(The change of electronic component surface average surface temperature with V_j/V_k ratio)

5. SİMGELER (SYMBOLS)

| | |
|----------|--|
| A_k | : Kanalın kesit alanı (m^2) |
| D | : Jet çapı (m) |
| D_{kh} | : Kanal hidrolik çapı (m) |
| G_k | : Türbülanslı kinetik enerji üretimi |
| H | : Kanal yüksekliği (m) |
| h | : Elektronik elemanın bir kenar uzunluğu (m) |
| h | : Taşınım ısı transferi katsayısı (W/m^2K) |
| H/D | : Kanal yüksekliğinin jet çapına oranı |
| k | : Türbülanslı akışın kinetik enerjisi |
| k_h | : Havanın ısı iletim katsayısı (W/mK) |

| | |
|-----------------|--|
| L | : Elektronik elemanın uzunluğunu (m) |
| Nu | : Nusselt sayısı |
| \overline{Nu} | : Ortalama Nusselt sayısı |
| P_c | : Kanal çıkış basıncı (Pa) |
| P_{atm} | : Atmosfer basıncı (Pa) |
| P_k | : Kanalın ıslak çevresi (m) |
| Pr | : Prandtl sayısı |
| q'' | : Isı akısı (W/m^2) |
| Re_j | : Jet Reynolds sayısı |
| Re_k | : Kanal Reynolds sayısı |
| T_j | : Jet giriş sıcaklığı ($^\circ C$) |
| T_k | : Kanal giriş sıcaklığı ($^\circ C$) |



Şekil 14. Elektronik elemanın yüzeylerindeki ortalama Nusselt sayısının V_j/V_k oranıyla değişimi
(The change of electronic component surface average Nusselt number with V_j/V_k ratio)

| | |
|-------------------|--|
| T_w | : Elektronik elemanın yüzey sıcaklığı (°C) |
| T_b | : Havanın giriş sıcaklığı (°C) |
| u | : x yönündeki hız bileşeni (m/s) |
| v | : y yönündeki hız bileşeni (m/s) |
| V_j | : Jet giriş hızı (m/s) |
| V_k | : Kanal giriş hızı (m/s) |
| V_j/V_k | : Jet giriş hızının kanal giriş hızına oranı |
| W | : Kanal genişliği (m) |
| ρ | : Havanın yoğunluğu (kg/m ³) |
| α | : Kanatçık açısı |
| μ | : Havanın dinamik viskozitesi |
| μ_t | : Türbülanslı akışın viskozitesi |
| σ_k | : Türbülanslı kinetik enerji Prandtl sayısı |
| σ_ϵ | : Türbülanslı yutulma Prandtl sayısı |

6. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpan jet ve çapraz akış kombinasyonu ile soğutulması sayısal olarak incelenmiş ve akış yönlendirici kanatçığın açısının değişiminin ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda, jet giriş hızının kanal giriş hızına (V_j/V_k) oranı ve kanatçık açısının (α) elektronik elemanın üzerinde oluşan akış yapılarına, sıcaklık dağılımına ve Nusselt sayısına etkileri irdelenmiştir. Bu kapsamda, sabit kanat açısı için, V_j/V_k oranının artması ile elektronik elemanın yüzey sıcaklığının düşmeye başladığı, Nusselt sayısının ve gerçekleşen ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. V_j/V_k oranının sabit olduğu durumda ise, kanatçık açısının artması ile bütün V_j/V_k oranlarında elektronik elemanın sol yüzeyinde gerçekleşen ısı transferinin kademeli olarak arttığı görülmüştür. Düşük V_j/V_k oranlarında kanatçık açısının artması ile elektronik elemanın üst ve sağ yüzeylerindeki ısı transferinin kanatçık açısı 45°'ye ulaşana kadar arttığı, bu açıyı geçtikten sonra ise ısı transferinin azalmaya başladığı görülmüştür. V_j/V_k oranı yükselmeye başladıkça bu olumsuz etkilerin kaybolmaya başladığı ve kanatçık açısı arttıkça genel olarak elektronik elemanın yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Elektronik elemanın yüzeylerinde gerçekleşen en düşük Nusselt sayısı kanatçık açısının $\alpha=0^\circ$ olduğu durumda, yani geometride hiçbir yönlendirici kanatçık olmadığı durumda gerçekleştiği görülmüştür. En

yüksek ortalama Nusselt sayıları ise sabit $V_j/V_k=0$, $V_j/V_k=1$, $V_j/V_k=2$, ve $V_j/V_k=3$ oranları için sırasıyla kanatçık açısı $\alpha=67,5^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=90^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ olduğu durumlarda gerçekleşmiştir. Çalışılan parametreler için, en yüksek ortalama Nusselt sayısının değeri, en düşük Nusselt sayısının değerinin, $V_j/V_k=0$, $V_j/V_k=1$, $V_j/V_k=2$, ve $V_j/V_k=3$ oranları için sırasıyla yaklaşık olarak %145, %126, %137 ve %138'i kadarı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, kanal içerisindeki elektronik bir elemanın sol tarafına yerleştirilen akış yönlendirici bir kanatçığın etkisi ile gerçekleşen ısı transferini artırdığı söylenebilir. Ayrıca kanatçık açısı ve V_j/V_k oranının değiştirilmesinin ise, gerçekleşen ısı transferini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Genel olarak kanatçığın kanal üst yüzeyi ile yaptığı açı ve V_j/V_k oranındaki artış ile gerçekleşen ısı transferinin olumlu yönde etkilendiği söylenebilir. Yapılan literatür incelemesinde, çapraz akış ve jet akış kombinasyonuna akış yönlendirici kanatçık eklentisinin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği benzer çalışmalara pek rastlanılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın çıktılarının, gelecekte etkin elektronik soğutma üzerine yapılabilecek yeni çalışmalara ışık tutabileceği, makine ve elektronik sanayi uygulamalarında yeni tasarımların geliştirilmesine katkı sağlayabileceği umut edilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Hadipour A., Zargarabadi M. R., Heat transfer and flow characteristics of impinging jet on a concave surface at small nozzle to surface distances, Applied Thermal Engineering 138, 534-541, 2018.
2. Wongchareea K., Chuwattanakul V., Eiamsa-ard S., Influence of CuO/water nanofluid concentration and swirling flow on jet impingement cooling, International Communications in Heat and Mass Transfer 88, 277-283, 2017.
3. Çalışır T., Çarpan Akışkan Jetleri Kullanarak Kanatçıklı Yüzeyler Üzerindeki Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
4. Baydar E., Confined impinging air jet at low Reynolds numbers, Experimental Thermal and Fluid Science 19, 27-33, 1999.

5. Köseoğlu M.F., Çarpan Akışkan Jetleri Kullanılarak Elektronik Elemanların Soğutulmasının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
6. Choo K., Kang T.Y., Kim S.J., The effect of inclination on impinging jets at small nozzle-to-plate spacing, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, 3327-3334, 2012.
7. Çelik N., Optimum Lüle Şeklinin Çarpan Jet Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
8. Bölek A., Farklı Düzlemler Üzerine Çarpan Jetlerin Akış Ve Isı Transfer Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
9. San J.Y., Chen J.J., Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 71, 8-17, 2014.
10. Sun B., Qu Y., Yang D., Heat transfer of Single Impinging Jet with Cu Nanofluids, *Applied Thermal Engineering* 102, 701-707, 2016.
11. Lv J., Hu C., Bai M., Zeng K., Chang S., Gao D., Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science* 84, 39-46, 2017.
12. Yu P., Zhu K., Shi Q., Yuan N., Ding J., Transient heat transfer characteristics of small jet impingement on high-temperature flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114, 981-991, 2017.
13. Barewar S.D., Tawri S., Chougule S.S., Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 136, 1-10, 2019.
14. Zhu K., Yu P., Yuan N., Ding J., Transient heat transfer characteristics of array-jet impingement on high-temperature flat plate at low jet-to-plate distances, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127, 413-425, 2018.
15. Kılıç M., Muhammad A.H., Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple impinging jets on heat transfer, *Thermal Science*, 23 (5), 3165-3173, 2019.
16. Kılıç M., Özcan, O., A numerical investigation of combined effect of nanofluids and impinging jets for different parameter, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1501-1515, 2019.
17. Ingole S.B., Sundaram K.K., Experimental average Nusselt number characteristics with inclined non-confined jet impingement of air for cooling application, *Experimental Thermal and Fluid Science* 77, 124-131, 2016.
18. Karabulut K., Alnak D.E., Değişik Şekilde Tasarlanan Isıtılmış Yüzeylerin Hava Jeti Çarpmalı Soğutulmasının Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26 (1), 88-98, 2020.
19. Karabulut K., Heat Transfer Improvement Study of Electronic Component Surfaces Using Air Jet Impingement, *Journal of Computational Electronics*, 18 (4), 1259-1271, 2019.
20. Çalışır T., Çalışkan S., Kılıç M., Başkaya Ş., Numerical investigation of heat transfer using impinging jets on triangular and square ribbed roughened wall, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*, 37, 13-24, 2017.
21. Nakod P.M., Prabhu S.V., Vedula R.P., Heat transfer augmentation between impinging circular air jet and flat plate using finned surfaces and vortex generators, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1168-1187, 2008.
22. Alnak D.E., Karabulut K., 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 (1), 78-86, 2019.
23. Kılıç M., Başkaya Ş., Improvement of heat transfer from high heat flux surfaces by using vortex promoters with different geometries and impinging jets, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 693-707, 2017.
24. Wang C., Luo L., Wang L., Sundén B., Effects of vortex generators on the jet impingement heat transfer at different cross-flow Reynolds numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 96, 278-286, 2016.
25. Karabulut K., Alnak D.E., Koca F., Analysis of Cooling of the Heated Circle Patterned Surfaces by Using an Air Jet Impingement, *ICENS 4th International Conference on Engineering and Natural Science, Kiev-Ukraine*, 411-420, 2018.
26. Çalışır T., Çalışkan S., Kılıç M., Başkaya Ş., Numerical investigation of flow field on ribbed surfaces using impinging jets, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 119-130, 2017.
27. Larraona G.S., Rivas A., Antón R., Ramos J.C., Pastor I., Moshfegh B., Computational parametric study of an impinging jet in a cross-flow configuration for electronics cooling applications, *Applied Thermal Engineering* 52, 428-438, 2013.
28. Demircan T., Numerical analysis of cooling an electronic circuit component with cross flow and jet combination, *Journal of Mechanics*, 35 (3), 395-404, 2019.
29. Mergen S., Kanal İçi Akış Ve Çarpan Jet İle Birlikte Elektronik Eleman Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
30. Saleha N., Fadela N., Abbes A., Improving cooling effectiveness by use chamfers on the top of electronic components, *Microelectronics Reliability* 55, 1067-1076, 2015.
31. Örs E., Kanal İçi Akış Ve Çarpan Jet Kullanımı İle Elektronik Elemanların Soğutulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.

32. Maghrabie H.M., Attalla M., Fawaz H.E., Khalil M., Numerical investigation of heat transfer and pressure drop of in-line array of heated obstacles cooled by jet impingement in cross-flow, Alexandria Engineering Journal 56, 285-296, 2017.
33. Masip Y., Rivas A., Larraona G.S., Anton R., Ramos J.C., Moshfegh B., Experimental study of the turbulent flow around a single wall-mounted cube exposed to a cross-flow and an impinging jet, International Journal of Heat and Fluid Flow 38, 50-71, 2012.
34. Incropera F.P., Dewit D.P., Bergman T.L., Lavine A.S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Sixth Edition), John Wiley&Sons, Indiana, 447-487, 2007.
35. Konecni S., Flow Measurements and Heat Transfer Studies of impinging Jets on Simulated Electronic Packages, Master Thesis, Texas University, Arlington, 1990.
36. Ma C.F., Bergles A.E., Boiling Jet Impingement Cooling of Simulated Microelectronic Chips, Heat Transfer in Electronic Equipment HTD 28, 5-12, 1983.